



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA**

**BALANCE ENERGÉTICO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS  
SEPARADAS DEL MEDIO ACUOSO.**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**I.Q. ISAAC NAVA BRAVO**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DRA. MARÍA TERESA ORTA LEDESMA, INSTITUTO DE INGENIERÍA.**

**COMITÉ TUTOR:**  
**M.C. VICENTE FUENTES GEA, FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DR. OMAR RAÚL MASERA CERUTTI, PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN**  
**INGENIERÍA.**  
**DRA. LEONOR PATRICIA GÜERECÁ HERNÁNDEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**DR. GERMÁN BUITRÓN MÉNDEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA.**

**MÉXICO D.F. NOVIEMBRE 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.C. Vicente Fuentes Gea  
Secretario: Dra. Leonor Patricia Güereca Hernández  
1 er Vocal: Dr. Omar Raúl Maserá Cerutti  
2 do Vocal: Dr. Germán Buitrón Méndez  
3 er. Vocal: Dra. María Teresa Orta Ledesma

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: **Instituto de Ingeniería, UNAM**

**TUTOR DE TESIS:**

Dra. María Teresa Orta Ledesma.

-----  
**FIRMA**

## ***AGRADECIMIENTOS.***

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me fue asignada durante la maestría para poder realizar mi proyecto de investigación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por abrir sus puertas y darme la oportunidad de desarrollarme como profesional en la maestría en ingeniería ambiental.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme hacer uso de sus instalaciones para terminar mi proyecto de investigación de maestría.

A la Doctora María Teresa Orta Ledesma por todo el apoyo que me brindó durante la elaboración de mi tesis de maestría, y darme esa oportunidad de ser parte de su grupo de investigación.

Al Maestro Vicente Fuentes Gea y al Doctor Omar Masera Cerutti por sus comentarios, correcciones, apoyo y confianza durante el desarrollo de la tesis.

Al Doctor Germán Buitrón Méndez y a la Doctora Leonor Patricia Güereca Hernández por su incorporación a mi comité tutor, apoyo, comentarios y correcciones que me permitieron mejorar mi trabajo de investigación.

Al Doctor Ignacio Monje Ramírez por sus grandes consejos durante el desarrollo de mi tesis. Además gracias por su apoyo académico y profesional.

A la Maestra Isaura Yañez Nogues quien también me ofreció su apoyo y consejos durante la maestría.

## ***DEDICATORIA.***

A Dios por darme vida y fortaleza para lograr concluir con mis estudios de maestría. Gracias por estar siempre conmigo en cualquier momento de mi existencia.

A mis padres Antonio Isaac Nava Salinas y María Blanca Bravo Evilde por confiar en mí desde que a los 18 años me salí del buen hogar para cumplir mis sueños. Por todo el apoyo, amor y comprensión que siempre me han ofrecido. Son un gran ejemplo de vida, de fuerza y cariño que he heredado de ustedes, y me ha caracterizado a donde dejo mi pequeña huella en este mundo. ¡Gracias!

A mis hermanos Hector Hugo Nava Bravo y Eloy Tomás Nava Bravo por estar siempre a mi lado en las buenas y en las malas. Para mis sobrinos Isaac Nava y Gabriel Nava por esos apapachos y pláticas que siempre me regalan cuando llego a visitarlos. Sus locuras y energías me ayudan a comprender que en muchas ocasiones la vida la tengo que ver como su corazón les permite hacerlo, para sonreír y fortalecerme.

A mis compadres de Morelia y D.F.: Rogelio Lachino, Selene Jiménez, Ulises Montes, Víctor Romero, Salvador Sánchez, Fátima Alcantar y Jesús Grajeda, a pesar que en la facultad nos separamos un poco, siempre que nos vemos es una fiesta triunfal y lleno de bendiciones. También a César Alberto y Verónica Esquivel por el apoyo que me ha dado y consejos.

A mis compañeros de posgrado y D.F.: Adrián Ortega, Abraham Chávez, Miguel Gutiérrez, Arnoldo Martínez, Arturo Álvarez, Sandra Carlos, David Sebastián, Javier Navarro, Javier Orlando, Mario Hernández, David Ubaldo, Jesús Granados, Ana Lucía López, Gabriela Mariscal, Sandra Arzate, Judith Oliveros, Longino Estrada, Lupe Paredes y Mónica López, por permitirme acercarme y convivir en todos aquellos buenos momentos. En general, gracias compañeros por su confianza y sinceridad.

A mis compañeros del cubículo 410 del instituto de ingeniería: Teresa Valeriano, Andrea Hernández, Gabriel Capetillo, Alberto Pineda, Beatriz Casasola, Pablo Fournier, Verónica Rodríguez, Bernardo Dávila, Jorge Cázares, Vania Rodríguez y Julieta Jiménez, por todos los buenos momentos y detalles que me han brindado.

A mis compañeros de Ecotecnologías, UNAM campus Morelia, en especial a Alfredo Fuentes porque de ti aprendí y conocí grandes áreas de los biocombustibles. A René Martínez por su gran apoyo y confianza que me brindó cuando me incorporé a su grupo de trabajo y en el laboratorio de bioenergía. A Carlos Bustamante, Montse Serrano, Cinthya Armendaris, José Luis Martínez, Jorge Ortiz, Vanesa Salasar, Tania Arroyo, Fermín Moralez y Ana Castrejón por su amabilidad y amistad. Nunca los olvidaré.

A Ada porque alguna vez también fuiste parte de este proyecto, gracias por el apoyo que me diste en su momento.

*¡GRACIAS A TODOS!*

## INDICE

RESUMEN .....	1
CAPÍTULO 1                    INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Introducción .....	2
1.2 Objetivo general.....	5
1.3 Objetivos específicos.....	5
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Alcance y limitaciones.....	5
CAPÍTULO 2                    MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Panorama mundial de las fuentes de energía.....	6
2.2 Gases de efecto invernadero.....	7
2.3 Biodiesel.....	9
2.4. Materias primas para producción de biodiesel.....	11
2.5 Microalgas.....	12
2.6 Selección de especies nativas de microalgas para biodiesel.....	15
2.7 Balance energético para producción de biodiesel.....	16
2.8 Resumen de los procesos involucrados para el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas.....	21
2.8.1 Cultivo de microalgas.....	21
2.8.2 Separación de la microalga del medio acuoso: Etapa de cosechado.....	23
2.8.3 Extracción de los lípidos de las microalgas.....	26
2.8.4 Transesterificación (conversión a biodiesel) y producción de biogás.....	27
CAPÍTULO 3                    METODOLOGÍA.....	29
3.1 Metodología para el balance energético.....	29
3.1.2 Límites del sistema.....	30
3.1.3 Consideraciones para el balance energético de producción de biodiesel.....	33
3.2 Cultivo de microalgas.....	34
3.2.1 Cultivo de microalgas y energías específicas involucradas.....	36
3.3 Consumo energético en el sistema de cosechado, secado y tratamiento de biomasa.....	37
3.4 Extracción de los lípidos.....	39
3.5 Conversión de los lípidos a biodiesel (transesterificación).....	41

3.6 Digestión de la biomasa después de la extracción de lípidos. ....	42
3.7 Suma de magnitudes energéticas. ....	43
3.8 Cuantificación del producto final y su energía. ....	44
3.9. Relación de energías. ....	45
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....</b>	<b>46</b>
4.1 Balance energético de producción de biodiesel, cosechado con coagulación-floculación. ....	46
4.2 Balance energético de producción de biodiesel, cosechado con Ozoflotación. ....	49
4.3 Balance energético teórico de la producción de biodiesel con generación de gas metano a partir de la biomasa residual de la extracción de lípidos. ....	51
4.4 Análisis de sensibilidad para producción de biodiesel. ....	54
4.4.1 Producción de biodiesel al año. ....	54
4.4.2 Rendimiento en peso de la reacción de transesterificación de los lípidos. ....	55
4.4.3 Contenido de lípidos en la biomasa. ....	57
4.5. Calidad del agua después de la ozoflotación. ....	58
4.6. Costo del proceso para ozoflotación. ....	61
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES. ....</b>	<b>69</b>
<b>RECOMENDACIONES. ....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO. ....</b>	<b>75</b>

## **LISTA DE FIGURAS.**

Figura 1.-Energías primarias utilizadas en el mundo, 2011 (IEA, 2013). ....	6
Figura 2.- Tipos de combustibles consumidos a nivel mundial, 2011(IEA, 2013). ....	7
Figura 3.- Consumo de petróleo a nivel mundial en el 2011, (IEA, 2013) ....	8
Figura 4.- Reacción química de la transesterificación del aceite. ....	10
Figura 5.-Panorama general del Análisis de Ciclo de Vida del proceso de producción de biodiesel, Fuente: Batan et al., 2010. ....	18
Figura 6.- Tipos de sistemas de cultivo utilizados para la producción de microalgas. Fuentes: Chisti, 2007, y Garibay Hernández et al., 2009. ....	21
Figura 7.-Sistema de coagulación-floculación mecánica. Fuente: Peralta-Ruiz et al., 2012. ....	24
Figura 8.-Equipo de secado para biomasa. Fuente: (Zhang, et al., 2013) ....	25
Figura 9.-Sistema de trituración. Fuente: (Zhang, et al., 2013). ....	25

Figura 10.- Diagrama del ozonador conformado por un generador de ozono Labo 76 (Emery Trailigaz, USA), Fuente: Valeriano González, 2013.....	30
Figura 11.- Límites del sistema para el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso.....	31
Figura 12.- Límites del sistema para el balance energético de la producción de biodiesel y gas metano a partir de microalgas separadas del medio acuoso.....	32
Figura 13.- Distribución porcentual de energías consumidas para la producción de biodiesel, utilizando cosechado con coagulación—floculación.....	48
Figura 14.- Distribución porcentual de energías consumidas para biodiesel, cosechado con ozoflotación.....	50
Figura 15.- Distribución porcentual de las energías consumidas en el balance energético de producción de biodiesel con generación teórica de gas metano.....	53
Figura 16.- Proceso de Ozoflotación: lado izquierdo es la columna de separación con microalgas al minuto cero; de lado derecho el proceso a los treinta y cinco minutos.....	59
Figura 17.- Lago Nabor Carrillo, México.....	60
Figura 18.- Costo de unidad de producción de ozono, Fuente: Langlair B., et. Al., 1991..	61
Figura 19.-Gráfica para el costo del contactor, Fuente: Langlais et al., 1991.....	62
Figura 20.-Contactores en paralelo. Fuente: Langlais et al., 1991.....	63
Figura 21.-Programa del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas.....	75
Figura 22.-Variables que pueden ser modificadas dentro del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas.....	76

## LISTA DE TABLAS.

Tabla 1.- Rendimiento de producción de biodiesel por materia prima.....	13
Tabla 2.-Clasificación de las microalgas, Fuente: Garibay Hernández et al., 2009.....	14
Tabla 3.-Contenido lipídico y productividad de diferentes especies de algas marinas. Fuente: Garibay Hernández et al., 2009.....	15
Tabla 4.- Balance energético de biodiesel con diferentes materias primas.....	20
Tabla 5.- Reactivos y productos para biodiesel del aceite de soya. Fuente: Razon & Tan, 2011.....	27
Tabla 6.- Energías específicas para el cultivo de microalgas.....	36
Tabla 7.- Energías específicas utilizadas para la separación de microalgas del medio acuoso.....	38
Tabla 8.- Energías específicas involucrados para la extracción de lípidos. Fuente: Duarte Murillo, 2010.....	40
Tabla 9.-Energía para la producción de hexano. Fuente: Duarte Murillo, 2010.....	40
Tabla 10.- Energías específicas para el proceso transesterificación. Fuente: Duarte Murillo, 2010.....	41



Tabla 11.-Energía específica de la producción de metanol y NaOH. Fuente: Duarte Murillo, 2010. ....	42
Tabla 12.-Valores de energías específicas para la digestión de biomasa. ....	43
Tabla 13.-Contenido de energía por biodiesel y metano. ....	45
Tabla 14.-Producción de 1000 toneladas de biodiesel al año, Coagulación-floculación. ....	47
Tabla 15.- Gasto energético en la producción de biodiesel, Coagulación-floculación. ....	48
Tabla 16.- Gasto energético por actividad en el proceso de cosechado. ....	48
Tabla 17.- Producción de biodiesel 1000 toneladas al año, ozoflotación.....	49
Tabla 18.- Gasto energético en la producción de biodiesel, ozoflotación. ....	50
Tabla 19.- Gasto energético por actividad involucrada en cosechado con ozoflotación.....	51
Tabla 20.- Energías consumidas en la producción de gas metano, cosechado por medio de Coagulación-floculación.....	52
Tabla 21.-Energías consumidas en la producción de gas metano, cosechado por medio de Ozoflotación. ....	52
Tabla 22.- Cantidad de biodiesel al año, técnica de cosechado de coagulación-floculación. ....	54
Tabla 23.- Cantidad de biodiesel al año, técnica de cosechado de ozoflotación.....	55
Tabla 24.- Rendimiento de la reacción de transesterificación, técnica de cosechado de coagulación-floculación.....	56
Tabla 25.- Rendimiento de la reacción de transesterificación, técnica de cosechado de ozoflotación. ....	56
Tabla 26.- Contenido de lípidos en las microalgas, técnica de cosechado de Coagulación-floculación. ....	57
Tabla 27.- Contenido de lípidos en las microalgas, con técnica de cosechado de Ozoflotación. ....	58
Tabla 28.- Parámetros físico químicos del agua antes y después de la recuperación de las microalgas.....	60
Tabla 29.- Costo Capital para la ozoflotación. ....	66
Tabla 30.- Costo de operación y mantenimiento (COyM) para ozoflotación. ....	66
Tabla 31.-Costo de ozoflotación de microalgas de agua residual. ....	67
Tabla 32.-.- Costo unitarios de tratamientos secundario de agua residual en México evaluados para 2013. ....	67

## LISTA DE ECUACIONES.

Ecuación 1.-Ecuación general de la obtención de gas metano. ....	28
Ecuación 2.-Productividad de microalgas para estanques abiertos. ....	34
Ecuación 3.-Cantidad de lípidos de microalgas para la producción de biodiesel al año.....	34
Ecuación 4.-Microalgas necesarias.....	35
Ecuación 5.-Área de cultivo requerido. ....	35
Ecuación 6.- Consumo energético del mezclado. ....	36

Ecuación 7.-Cálculo de consumo energético por bombeo de microalgas. ....	37
Ecuación 8.-Consumo energético total por cultivo. ....	37
Ecuación 9.-Consumo energético por parte de coagulación-floculación. ....	38
Ecuación 10.-Consumo energético por parte de centrifugación. ....	38
Ecuación 11.-Consumo energético por parte de secado de biomasa. ....	38
Ecuación 12.- Consumo energético por parte del triturado para microalgas.....	39
Ecuación 13.-Consumo energético para la ozoflotación. ....	39
Ecuación 14.- Energía eléctrica para extracción de lípidos.....	40
Ecuación 15.- Energía como calor para extracción de lípidos. ....	40
Ecuación 16.- Energía indirecta por el hexano.....	40
Ecuación 17.- Energía eléctrica consumida en la transesterificación de los lípidos. ....	42
Ecuación 18.- Energía como calor consumida en la transesterificación de los lípidos. ....	42
Ecuación 19.- Energía indirecta por el metanol e hidróxido de sodio.....	42
Ecuación 20.- Energía eléctrica por el mezclado en el digestor. ....	43
Ecuación 21.- Energía eléctrica por la centrifugación de lodos en el digestor.....	43
Ecuación 22.- Energía como calor utilizado en el digestor según Ventura et al., 2013. ....	43
Ecuación 23- Energía consumida producción de biodiesel. ....	44
Ecuación 24.-Consumo energético total por todos los procesos. ....	44
Ecuación 25.- Energía obtenida por biocombustible.....	45
Ecuación 26.-Gasto energético. ....	45
Ecuación 27.-Proporción Energética Neta.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS.

**CEPCI**...Chemical Engineering's Plant Cost Index.

**CH<sub>4</sub>** Metano.

**DBO<sub>5</sub>** Demanda Bioquímica de Oxígeno.

**FAME** Fatty Acid Methyl Esters (Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos).

**GEI** Gases de Efecto Invernadero.

**IE** Índice Energético.

**IEA** International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía).

**IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático).

**LCA** Life Cycle Assessment (Análisis de Ciclo de Vida).

**MXN** Pésos Mexicanos.

**NER** Net Energy Ratio (Proporción Energética Neta).

**NH<sub>3</sub>** Amoníaco.

**O<sub>3</sub>** Ozono.

**ONU** Organización de las Naciones Unidas.

**PE** Productividad Energética.

**UK** United Kingdom (Reino Unido).

**USD** United States Dollar (Dolares)

**VS** Sólidos volátiles.

## RESUMEN

Esta tesis presenta el balance energético de la producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso determinando la viabilidad del proceso con un enfoque de ciclo de vida.

Para realizar el balance energético se desarrolló “un programa de hoja de cálculo” que involucra el inventario de energías específicas requeridas en las cuatro etapas principales del proceso de producción: cultivo de microalgas, cosechado, extracción y transesterificación de lípidos. Se compararon dos tipos de técnicas de cosechado como métodos de separación de microalgas del medio acuoso: la coagulación-floculación y la ozoflotación, siendo este último un método que se encuentra en fase de desarrollo y cuyo consumo energético fue obtenido a partir de datos experimentales. Las pruebas de cosechado por ozoflotación fueron realizadas en reactor por lote escala laboratorio utilizando un consorcio de microalgas del Lago Nabor Carrillo y condiciones de estudios previos. Como parte del balance energético se consideró la posible valoración de la biomasa residual (post-extracción de lípidos) para su aprovechamiento en la producción de gas metano.

Experimentalmente y en reactores abiertos de 20L se determinó que las microalgas pueden crecer en aguas residuales municipales y alcanzar concentración de 354 mg/L como SST a los 14 días de cultivo. Con este crecimiento la productividad teórica estimada para la zona de Texcoco México fue de 26 g/m<sup>2</sup>\*d.

Bajo las condiciones y suposiciones establecidas para el balance energético en la presente tesis, se encontró que la etapa de mayor consumo energético en el proceso de producción de biodiesel fue la de cosechado, representando un 52% (54.3 MJ/kg de biodiesel) en el caso de la coagulación-floculación y, 77% (97MJ/kg de biodiesel) para la ozoflotación.

El balance de energía para el proceso de producción de biodiesel sin tomar en cuenta la valoración de la biomasa residual resultó ser negativo para ambas técnicas de cosechado, esto de acuerdo a los valores de índice energético obtenidos (Coagulación-floculación, NER: 0.38; y ozoflotación, NER: 0.31). Al considerar la generación de gas metano a partir de la biomasa residual, el índice energético NER se incrementa a 1.12 y a 0.76, respectivamente. Adicionalmente, haciendo un análisis de sensibilidad del proceso productivo de biodiesel, modificando la variable del contenido de lípidos de la biomasa microalgal (entre el 10-20%), se encontró que es posible obtener un balance energético positivo con ambas técnicas de cosechado aún sin considerar la valorización de la biomasa residual (Coagulación - floculación, NER: 1.15; ozoflotación, NER: 1.17).

De esta investigación se concluye que para que el proceso productivo de biodiesel a partir de un consorcio de microalgas sea viable energéticamente, es necesario considerar la valoración de la biomasa residual o bien incrementar el contenido de lípidos en la biomasa microalgal.

## CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Introducción

El mundo se está enfrentando desde las recientes décadas con una crisis energética por el aumento de la demanda de los recursos fósiles y los impactos ambientales derivados de su uso. Además, su utilización como fuente principal de energía es insostenible (Amaro et al., 2011).

El sector transporte presenta mayor demanda de esta fuente energética, y el responsable de emitir la quinta parte de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y la perspectiva para su reducción no parece prometedor, ya que se estima que aumentará por más de 2000 millones de vehículos en el 2050 (Rawat et al., 2013). Debido a esta problemática, para reducir dichas emisiones, así como la dependencia energética hacia el combustible fósil, muchas investigaciones se están enfocando a nuevas alternativas de generación de energía. Dentro del alcance del hombre, existen varias fuentes energéticas con gran potencial, como lo son el sol, el viento, las mareas, olas y la biomasa. La biomasa ha cobrado gran importancia en los últimos años, y dentro de ella, están los biocombustibles líquidos a partir de la biomasa vegetal. Entre estos biocombustibles líquidos se encuentran el biodiesel y el bioetanol.

En la actualidad la producción de biodiesel proviene del aceite de plantas oleaginosas como son del aceite de palma, soya o girasol (Amaro et al., 2011). Sin embargo, este tipo de producción es muy controversial, ya que requiere tierra cultivable que puede no estar disponibles en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades de consumo de combustible, afectando la seguridad alimentaria debido al aumento de los altos precios y sustancialmente por la sobre explotación de los recursos naturales (Brennan & Owende, 2010).

Se ha estimado que sólo el 1 % (14 millones de hectáreas) de la tierra cultivable disponible a nivel mundial es utilizada para el cultivo de biocombustibles de primera generación cubriendo sólo el 1% de la demanda global del transporte (Rawat et al., 2013; Brennan & Owende, 2010). Por otro lado, según la Secretaría de Agricultura de Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en sus prospectivas para el 2007 estimó que se ocuparían 10 plantas industriales de biodiesel con capacidad de 100,000 toneladas por año o más de 140 plantas pequeñas con capacidad de 5,000 t/año sólo para sustituir un 5% del diésel de petróleo utilizado en México (Sigler, 2013)

Para esto, es necesario buscar nuevas fuentes de materia oleaginosa que no compita y afecte la seguridad alimentaria, y por consiguiente, que pueda ser utilizado en la producción de biodiesel. Por esta razón, varios autores han sugerido que el biodiesel a partir de lípidos o

aceite natural (Rawat et al., 2013) de microalgas puede ser una solución, ya que tienen varias ventajas que la hacen ser una materia prima viable para la producción de este bioenergético. Las microalgas presentan mayor productividad en biomasa que las plantas oleaginosas (el tiempo de crecimiento puede ser tan corto aproximadamente a los 3.5 h). Algunas especies pueden acumular lípidos del 20 hasta el 50% en peso seco de biomasa de microalga (Amaro et al., 2011), lo cual, como ventaja competitiva más importante del biodiesel a partir de esta materia prima, es que los rendimientos de producción de lípidos por unidad de área son considerablemente superiores a los obtenidos por las plantas oleaginosas. Por otro lado, la producción de biomasa de microalgas no necesita grandes espacios de tierra para su cultivo, ya que éstas crecen en medios acuosos como aguas salobres, dulces o residuales (Garibay Hernández et al., 2009), y los nutrientes para su crecimiento las pueden tomar del medio acuoso donde se cultiven.

Así mismo, la torta residual del proceso de extracción de lípidos de la biomasa de microalgas puede ser usada para alimento de ganado, fertilizante o como materia prima para la producción de otro tipo de biocombustible como etanol o gas metano, debido al contenido de almidón (40 % en peso seco) y proteína (20% en peso seco) (Zhang et al., 2013). Dichos subproductos tienen un contenido energético favorable que pueden hacer la producción de biodiesel sustentable. Por ejemplo, mientras el biodiesel a partir de microalgas tiene un contenido energético de 37.8 MJ/kg, el etanol de microalgas presenta un valor de 8.2 MJ/L (Zhang et al., 2013), y el gas metano de microalgas tiene un poder energético de 50 MJ/kg (Ventura et al., 2013).

Por otro lado, existen diferentes tipos de estudios que permiten determinar la viabilidad y sustentabilidad de producción de algún biocombustible en particular. Dichos estudios pueden ser análisis técnicos y de proceso, estudios de mercado y el Análisis de Ciclo de Vida (LCA: por sus siglas en inglés). Este último ha sido muy concurrido por muchos autores, ya que es una técnica que ayuda evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales de impactos asociados con un producto mediante la recopilación de un inventario de entradas y salidas de materia, energía y emisiones, la evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados, y la interpretación de resultados (Calzadía Ramírez, 2012).

El estudio del Análisis de Ciclo de Vida trata los aspectos ambientales así como los impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, desde la materia prima involucrada para su producción, tratamiento final, reciclado hasta la disposición final cuando llega a las manos del usuario. Lo más importante es que dentro del LCA podemos encontrar los balances energéticos y de emisiones de dióxido de carbono (Duarte Murillo, 2010). El balance energético permite al usuario visualizar que el impacto de producción de un producto (en nuestro caso el biodiesel) sea mínimo o nulo, ya que con este, se puede cuantificar las emisiones asociadas a la energía fósil utilizada.

Muchos autores que desarrollan un análisis del balance energético de biodiesel a partir de cualquier materia prima oleaginosa con un enfoque de ciclo de vida, toman en cuenta el parámetro NER (Net Energy Ratio) que es la proporción energética neta (energía de salida por el biodiesel entre la energía total invertida en el proceso de su producción). Un valor de NER mayor a la unidad refiera un balance energético positivo, mientras que un valor de NER por debajo de la unidad es representativo de que el balance energético es negativo, siendo entonces más energía necesaria que la que el producto biodiesel puede proporcionar, y por lo tanto, no es viable su producción según dependiendo de la materia prima que se requiera utilizar. Muchos autores manejan este parámetro adimensional para sus estudios, siendo algunos ejemplos tales como lo son Sudhakar et al. (2012), Zhang et al. (2013), Batan et al. (2010), Jorquera et al. (2010), Razon et al. (2011), y Duarte Murillo (2010), quien este último el valor de NER lo llama como “relación energética”.

Para desarrollar un balance energético de producción de biodiesel, es necesario identificar las etapas o unidades de producción que están involucradas en el procesamiento de este biocombustibles. Por consiguiente, se debe asignar factores de energías o energías específicas para cada etapa. Estos factores se refieren a la energía necesaria fósil (MJ, kWh, etc.) por la biomasa u aceite a procesar (ton, kg, etc.), dependiendo de la etapa que se esté estudiando como lo es cultivo, cosechado, extracción de lípidos o aceite, conversión a biodiesel, etc. Y finalmente, se hace la relación energética NER de la energía entregada por el biocombustible con respecto a la energía invertida en todo el tren del proceso de su obtención, para determinar si el balance es negativo o positivo.

Este trabajo desarrolló el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas que fueron obtenidos del lago de Texcoco con un enfoque de ciclo de vida, para determinar su viabilidad como materia prima en dicha producción de este biocombustible. Además de la integración de la técnica de cosechado de ozoflotación de microalgas, que se está desarrollando experimentalmente, en el balance energético de producción de biodiesel

Debido a la falta de información y experiencia de producción de biodiesel a partir de microalgas nivel industrial en México, se tuvieron que hacer una serie de suposiciones en este trabajo para lograr dicho estudio, haciendo estimaciones basadas en los datos obtenidos de otros países en la producción de biodiesel. Esto con el fin, de que nos permita tener un mejor panorama con respecto al aprovechamiento de las microalgas en la producción de biodiesel en nuestro país.

## 1.2 Objetivo general.

Realizar el balance energético de la producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso.

## 1.3 Objetivos específicos

1. Desarrollar un programa de cálculo para obtener el consumo de energía utilizando un enfoque de ciclo de vida y el inventario de las energías específicas involucradas en cada etapa de producción del biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso.
2. Determinar experimentalmente la concentración de biomasa a nivel laboratorio considerando su crecimiento en agua residual y estimar la productividad teórica de microalgas para la zona del ex lago de Texcoco.
3. Determinar el consumo energético de la recuperación de microalgas de aguas residuales por ozoflotación mediante pruebas experimentales escala laboratorio.
4. Determinar el balance energético del proceso de producción de biodiesel comparando dos técnicas de cosechado, la coagulación-floculación y la ozoflotación.
5. Comparar los balances energéticos de producción de biodiesel considerando la generación teórica de gas metano a partir de la biomasa residual post-extracción de lípidos.

## 1.4 Hipótesis

Mediante la evaluación del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso, se identificará la etapa de cosecha a la que se debe dirigir mejoras tecnológicas de separación.

## 1.5 Alcance y limitaciones.

Se desarrolló el balance energético con un enfoque de ciclo de vida, para evaluar el consumo energético así como el parámetro NER (Net Energy Ratio por sus siglas en inglés) para la producción de biodiesel a partir de las microalgas separadas del medio acuoso. Se tomaron de literatura las energías específicas de las etapas de cultivo, cosechado con coagulación-floculación, extracción de lípidos, transesterificación y producción de gas metano a partir de microalgas, para los escenarios propuestos de producción de biodiesel a partir de microalgas y compararlos con la técnica de cosechado de ozoflotación que fue desarrollado experimentalmente.



## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.

En el presente capítulo se presenta una extensa revisión bibliográfica para fundamentar la metodología del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas que fue utilizada para el desarrollo de este trabajo. De esta manera se abordan las generalidades acerca de este biocombustible, y su importancia, el tipo de proceso y materia primas que se han usado para su elaboración, la relevancia de las microalgas dentro de este ámbito, así como el Análisis de Ciclo de Vida que ha sido muy concurrida para la elaboración de balances energéticos de diferentes biocombustibles.

### 2.1 Panorama mundial de las fuentes de energía.

Para el año 2008, el consumo mundial de energía primaria anual fue estimado en 11,295 millones de toneladas equivalentes de petróleo. Para lo cual, el petróleo ocupó el 35% de los combustibles fósiles, mientras que el carbón un 29%, y el gas natural el 24%. El 5% y el 6% del consumo total de la energía primaria fue por parte de la energía nuclear e hidroeléctrica respectivamente (Brennan & Owende, 2010).

En el año 2011 el consumo de la energía primaria total aumentó a un 13,113 millones de toneladas equivalentes de petróleo, donde el 31.5% fue proporcionado por el petróleo siendo todavía para este entonces la fuente de energía más explotada (ver figura 1).

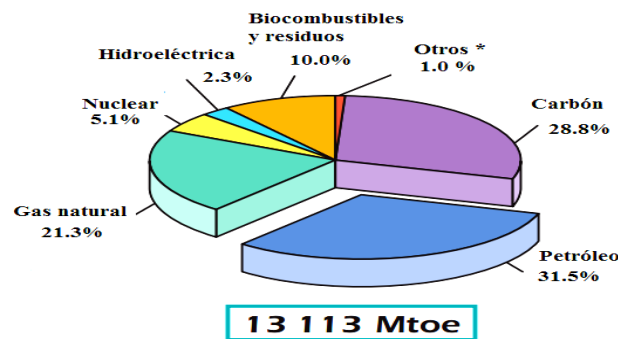
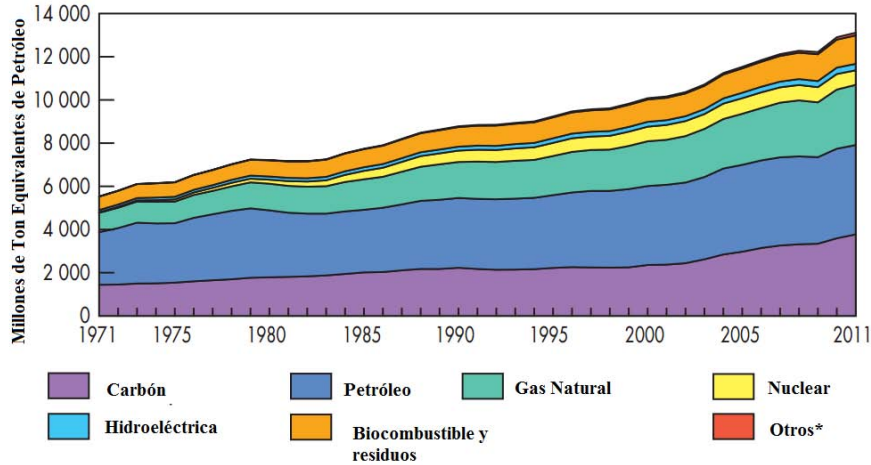


Figura 1.-Energías primarias utilizadas en el mundo, 2011 (IEA, 2013).

El diferente porcentaje que ocupa el petróleo del 35% para el 2008 a 31.5% en el 2011 no significa que hubo un descenso en la utilización de este recurso fósil, sino lo contrario, ya que hubo implementación de otras fuentes energéticas (ver figura 1 y 2) que se han estado

utilizando en diferentes países, como lo son la energía solar, geotérmica, y eólica que corresponde al rubro “Otros\*” de la figura uno (IEA, 2013).



**Figura 2.- Tipos de combustibles consumidos a nivel mundial, 2011(IEA, 2013).**

Como se observa anteriormente, la demanda energética está teniendo un crecimiento importante a nivel mundial, siendo el 81% de esta energía liberada por los combustibles fósiles. Además del problema del agotamiento del recurso del petróleo, también existe un incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (Schlagermann et al., 2012).

## 2.2 Gases de efecto invernadero.

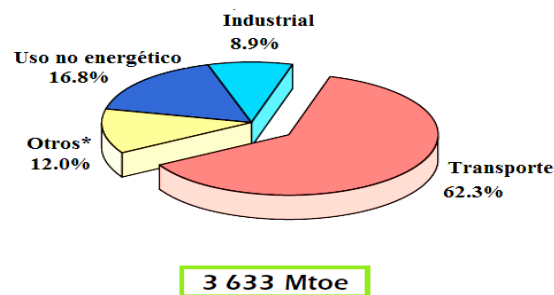
Los gases de efecto invernadero más conocidos son los conformados por vapor de agua, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), clorofluorocarbonos (CFC) y ozono ( $\text{O}_3$ ), siendo el  $\text{CO}_2$  el más importante ya que su fuente principal proviene de la quema de combustibles fósiles como los son el petróleo, gas natural y carbón (Calzadiaz Ramírez, 2012).

Los clorofluorocarbonos y sus derivados son gases sintéticos fabricados para su utilidad industrial como refrigerantes, aerosoles y compuestos electrónicos, cuyo uso desmedido han disminuido la capa de ozono (Calzadiaz Ramírez, 2012). El gas metano por lo regular es producido por disposición de residuos en rellenos sanitarios y plantas de tratamiento anaeróbica de agua residual; además, por efecto natural ya sea por bacterias de los pantanos o el rumiar del ganado, y que ha ido en aumento debido a la creciente actividades humanas

con la explotación y excavación de las minas de carbón y en la extracción de petróleo y gas natural (Hernández, 2001). Mientras que los gases de óxido nitroso proviene regularmente por prácticas agrícolas, específicamente por la digestión del estiércol animal.

Por otro lado, se sabe que desde la revolución industrial en el siglo XIX, hasta en la actualidad con la creciente demanda de automotores de combustión interna ha hecho que el porcentaje de dióxido de carbono aumente en la atmósfera, ocasionando el conocido efecto invernadero que ha traído como consecuencia el cambio climático.

Como se observó anteriormente, siendo el petróleo la fuente primaria de energía más consumida en todo el mundo, el sector transporte ocupó el 62.3% de los 3,633 millones de toneladas equivalentes de petróleo que fueron producidos en el 2011 (ver figura 3).



**Figura 3.- Consumo de petróleo a nivel mundial en el 2011, (IEA, 2013)**

A pesar que los sectores industriales como el de fundición y plantas de cemento son grandes fuentes generadoras del gas CO<sub>2</sub>, prácticamente el principal responsable de emitir la quinta parte de las emisiones globales de emisiones de dióxido de carbono es el sector transporte, y la perspectiva de reducción de CO<sub>2</sub> a nivel mundial por este sector no parece prometedor, ya que se estima que aumentará a más de 2000 millones de vehículos para el 2050 (Rawat et al., 2013). En cambio, miembros del IPCC han observado ciertos patrones con el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI) que han propiciado al cambio climático en el planeta. Entre ellos el aumento de la temperatura en la superficie de la tierra de 0.6 grados centígrados (1.1 grados Fahrenheit) desde 1860, atribuibles al incremento de la actividad humana, con la predicción de que para el siguiente siglo puede aumentar 6 °C (WWF, 2005). Esto ocasionaría que el nivel de mar incremente y cese hasta que la temperatura atmosférica se estabilice. Por otro lado, las pérdidas económicas anuales derivadas de los desastres climáticos se multiplicaron hasta 40000 millones de dólares americanos en el periodo de los años 50 hasta los 90, y se espera que la situación empeore (WWF, 2005).

Con el incremento de los gases antropogénicos de efecto invernadero se han buscado estrategias para la mitigación de estos gases y neutralizar el exceso de CO<sub>2</sub>. Dentro de estos compromisos se creó el protocolo de Kyoto de 1997. Este protocolo fue establecido para la reducción de un 5.2% de las emisiones de gases de efecto invernadero global por debajo de los producidos en 1990 para los países de mayor emisiones (Brennan & Owende, 2010).

De esta manera se dividió el mundo en Anexo I (industrializados) y no-Anexo I (en vía de desarrollo), siendo los primeros los responsables del 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) determinadas para 1990 (WWF, 2005). Para entonces, México lo ratificó en el año 2000, entrando en vigor el 16 de febrero del 2005, como país no-Anexo I, participando en el mecanismo de flexibilidad de desarrollo limpio. Este mecanismo consiste en proporcionar a los países del Anexo I facilidades para su desarrollo sostenible, apoyando la reducción de sus GEI mediante proyectos certificados que se llevaran a cabo en los países de no-Anexo I, tal es el caso de los bonos de carbono.

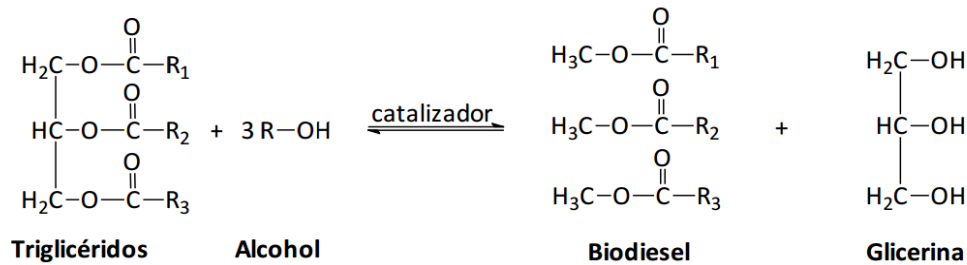
Expertos sugieren que dentro de las estrategias para la seguridad energética y mitigación de gas de dióxido de carbono, se debe al menos incluir la necesidad de incrementar la eficiencia energética que es disminuir el incremento de uso de energía por unidad de producto, proceso o servicio, así como el incremento del uso de energías renovables que generen dichos recursos energético un CO<sub>2</sub> neutral (Brennan & Owende, 2010).

En los recientes años, los biocombustibles líquidos se han perfilado como candidatos potenciales para sustituir a los combustibles derivados del petróleo que son consumidos en su mayor parte por el sector transporte, mostrando un crecimiento por el interés social, con la creación de políticas enfocadas para lograr una seguridad energética y mitigación de GEI (Sandoval, 2010; Brennan & Owende, 2010). Dentro de los biocombustibles están los de primera generación que implican el uso de tierra e insumos (agua, fertilizantes, etc.) que eventualmente pudieran dedicarse a cultivos alimenticios. Los de segunda generación cuya materias primas no compiten con la seguridad alimentaria, y los de tercera generación que son los producidos por microalgas y otros microorganismos (Sandoval, 2010).

### **2.3 Biodiesel.**

El biodiesel es un biocombustible líquido que se obtiene a partir del aceite de las semillas, o grasa animal. En esencia, es un conjunto de esteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos (Amaro et al., 2011). La reacción (ver figura 4) comúnmente requiere un alcohol, generalmente metanol, y de un catalizador de base fuerte (como hidróxido de sodio o potasio) o de un ácido fuerte (ácido sulfúrico). De esta manera, nuevos componentes químicos llamados *metil ésteres de ácidos grasos* (FAME por sus siglas en inglés) se producen y estos

ésteres son conocidos como “biodiesel” (Gerpen, 2005). Además, también se genera un subproducto químico que es la glicerina.



**Figura 4.- Reacción química de la transesterificación del aceite.**

El contenido de carbón en el aceite vegetal es originado en su mayoría a partir del dióxido de carbono que se encuentra en el aire (ciclo del carbón), de aquí, el biodiesel es considerado como un biocombustible renovable que contribuye mucho menos al calentamiento global en comparación a los combustibles fósiles no renovables (Gerpen, 2005).

Los motores que operan con biodiesel tienen menos emisiones de dióxido de carbono, y componentes tóxicos hacia el aire, en comparación cuando los motores de combustión de los vehículos operan con combustible derivado del petróleo. De antemano, se sabe que el biodiesel no puede reemplazar completamente la demanda del combustible fósil total, pero existen cinco razones por las cuales se puede implementar su desarrollo (Gerpen, 2005):

1. Existe un gran mercado para el exceso de producción de aceite vegetal y grasas animales.
2. Se puede reducir más no eliminar la dependencia de los países hacia la importación del petróleo.
3. El biodiesel es renovable y no contribuye al calentamiento global, debido al ciclo del carbón que presentan las plantas para la síntesis de semillas oleaginosas. Un Análisis del Ciclo de Vida del biodiesel demostró la reducción global de las emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo de hasta un 78% comparado con el diésel derivado del petróleo.
4. La reducción de emisiones de dióxido de carbono, hidrocarburos aromáticos policíclicos, emisiones de partículas de hollín, óxido de azufre y metales a partir del biodiesel son bajas en comparación del combustible diésel. Desafortunadamente, algunas pruebas de emisiones han mostrado un ligero aumento de óxidos de nitrógeno.
5. Además, posee propiedades lubricantes que reducen el desgaste del motor y es un material seguro para su almacenamiento y manejo debido a su baja volatilidad y elevado punto de inflamación (100-170 °C) (Garibay Hernández et al., 2009).

Como el biodiesel tiene propiedades físicas y químicas muy similares al del diésel de petróleo, este puede utilizar la infraestructura actual del combustible derivado del petróleo. El uso del biodiesel no requiere de modificaciones alguna en los motores de diésel convencionales, por lo que puede ser empleado en estos motores en mezclas con petro-diésel al 2% (B2), 5% (B5), 20% (B20), e inclusive, usar directamente como un B100 (Song et al., 2008).

#### **2.4. Materias primas para producción de biodiesel.**

Actualmente la producción de biodiesel en gran parte proviene de las plantas oleaginosas tales como el del aceite de palma, colza, soya, girasol, coco, oliva, etc. (Song et al., 2008). El biodiesel proveniente de este tipo de materias primas se les conoce como biocombustible de primera generación, el cual, han sido muy criticados debido que para su producción compiten con la producción de los cultivos para alimentos.

Ejemplo de esta situación, para poder producir 2500 billones de litros de biodiesel a partir del aceite de colza (ejemplo de la demanda de diésel de petróleo en toda la UK), se necesitan 17.5 Mha para plantar colza, y que corresponde más de la mitad de la superficie terrestre disponible de UK (Amaro et al., 2011). Por otro lado, se tiene la experiencia como en Brasil y sureste asiático, su tasa de producción de biodiesel a partir de la palma y soya ha ocasionado problemas ambientales inherentes a la deforestación de regiones tropicales (Dismukes et al., 2008).

Han surgido nuevas propuestas de plantas oleaginosas para la producción de biodiesel, el cual, dichas materias primas pueden proliferar en suelos áridos, bajo en nutrientes, con altos niveles de radiación y baja precipitación pluvial, y cuyo aceite no es comestible. Siendo entre ellas, los cultivos marginales tales como el de la *jatropha curcas* (piñón), *calophyllum inophyllum* (tamanu), *pongamia pinnata*, *madhuca indica*, *ricinus communis* (higuerilla), etc., siendo estos la materia prima para el biodiesel de segunda generación, que además no atenta contra la seguridad alimentaria (Garibay Hernández et al., 2009). Estas últimas plantas presentan mejor opción en comparación con el de las semillas comestibles o biocombustibles de primera generación. Por otro lado, otra alternativa está el aceite usado o desechado de cocina, solo que el alto contenido de ácidos grasos libres y la humedad obliga a un pequeño refinamiento del aceite para poder ser procesado y por ende, un aumento al costo de producción. De esta manera, algunos puntos relevantes con respecto a la producción de biodiesel a partir de las plantas oleaginosas comestibles y no comestibles se pueden mostrar a continuación (Garibay Hernández et al., 2009; Chisti, 2007):

1. La producción se limita por cuestiones de los periodos de producción (meses, años) inherentes a la tecnología agrícola.

2. La dependencia a las condiciones climáticas.
3. La ubicación geográfica.
4. La fertilidad de los suelos y la variedad cultivada.
5. La falta de extensa superficie de cultivo requerida.
6. El enorme volumen de agua necesario para el riego.

Sandoval (2010) hace énfasis que para que un biocombustible sea realmente sustentable debe ser un “biocombustible avanzado” proveniente de:

1. Residuos agrícolas municipales (residuos ligno celulósico, rastrojos, bagazos, etc.).
2. Bosques manejados sustentablemente.
3. Procesos que minimizan el uso de químicos provenientes de combustibles fósiles.
4. Biocombustibles provenientes de microorganismos (algas, hongos, levaduras, bacterias).

Recientemente, existen varias investigaciones donde se han identificado a las microalgas como un recurso renovable prometedora para la producción de biocombustibles, debido a su contenido de lípidos, conocidos como aceite natural (Rawat et al., 2013).

## **2.5 Microalgas.**

Actualmente las microalgas están ganando un gran interés para los nuevos escenarios de producción de biodiesel, debido a su rápido crecimiento, por su alto contenido de lípidos, carbohidratos y nutrientes. Todas esas propiedades las hacen ser un excelente recurso, no solo para biodiesel, sino además, estudios actuales han señalado que también para biocombustible tales como bioetanol y biometano; así como un número de otros productos farmacéuticos y nutrimental que se pueden obtener de ellas (Singh & Gu , 2010).

Las microalgas presentan mayor productividad en biomasa que las plantas oleaginosas (el tiempo de crecimiento puede ser tan corto aproximadamente a los 3.5 h). Algunas especies pueden acumular aceite del 20 hasta el 50% en peso seco de biomasa de microalga (Amaro et al., 2011), lo cual, como ventaja competitiva más importante del biodiesel a partir de esta materia prima es que los rendimientos de producción de biodiesel por unidad de área son considerablemente superiores a los obtenidos a las plantas oleaginosas (ver tabla 1).

A pesar de que el crecimiento de las microalgas se da en medio acuoso tales como aguas marinas, dulces, salobres u residuales (Garibay Hernández et al., 2009) estas necesitan una menor tasa de renovación de agua, en comparación de los cultivos terrestres que demandan agua de riego (Amaro et al., 2011). Por ejemplo, para la producción de 1 litro de biodiesel con aceite de semilla oleaginoso, se requiere alrededor de 3000 litros de agua, mientras que por ejemplo, si se hiciera uso de microalgas con un contenido de 50% de lípido, sólo son necesarios 10 a 20 litros tomando en cuenta la demanda estequiométrica para fijar 1 mol de



CO<sub>2</sub> a partir de un mol de agua durante la fotosíntesis y la evaporación que puede surgir en los sistemas abiertos (Schlagermann et al., 2012).

**Tabla 1.- Rendimiento de producción de biodiesel por materia prima.**

Materia prima	Productividad de biodiesel (L/ha/año)	Referencia.
Palma	5950	(Garibay Hernández et al., 2009)
Jatropha	1892	(Garibay Hernández et al., 2009)
Colza	1190	(Singh & Gu , 2010)
Aceite de coco	2689	(Garibay Hernández et al., 2009)
Canola	1190	(Singh & Gu , 2010)
Aceite de palma	5950	(Singh & Gu , 2010)
Girasol	952	(Garibay Hernández et al., 2009)
Soya	446	(Garibay Hernández et al., 2009)
Microalgas (70% de lípidos/peso)	136900	(Singh & Gu , 2010)
Microalgas (30% de lípidos/peso)	58700	(Singh & Gu , 2010)

Dentro de las virtudes de las microalgas que ya fueron descritos arriba, son consideradas como las responsables de la producción del 50% del oxígeno y de la fijación del 50% del carbono en el planeta. Además para la producción de 1 kg de biomasa de algas utiliza 1.83 kg de CO<sub>2</sub> (Brennan & Owende, 2010). Algunas investigaciones se apuntan en acoplar a las microalgas para reciclaje de dióxido de carbono liberado en las emisiones industriales, especialmente por las plantas de producción de electricidad a partir de combustibles fósiles (Garibay Hernández et al., 2009). Con respecto a los nutrientes para las microalgas, tales como nitrógeno y fósforo, estos pueden ser proporcionado por medio de las aguas residuales o del mismo medio acuoso donde se cultiven, con la posibilidad de ser acopladas para tratamiento de efluentes orgánicos de la industria agroalimentaria (Brennan & Owende, 2010).

De forma general, las microalgas son un conjunto heterogéneo de microorganismos fotosintéticos unicelulares procariontes (cianobacterias) y eucariontes, cuya diversidad es



enorme, y se han identificado alrededor de 40000 especies, de los cuales, se desconoce su composición y metabolismo (Garibay Hernández et al., 2009). Las microalgas se clasifican de acuerdo a como se presenta en la tabla 2. Las especies más estudiadas corresponden a las algas verdes y a las diatomeas (Amaro et al., 2011).

**Tabla 2.-Clasificación de las microalgas, Fuente: Garibay Hernández et al., 2009**

Clase	Características
Chlorophyta (algas verdes)	<p>División conformada por una gran cantidad de especies, en partículas por las que proliferan en ambientes dulceacuícolas. Pueden existir ya sea como células o colonias y su principal reserva de carbón es el almidón.</p> <p>A determinadas condiciones pueden almacenar lípidos. Entre ellas destacan especies como la de pico-plancton.</p>
Becillariophyta (diatomeas)	<p>Las diatomeas predominan en agua oceánicas, no obstante también se les puede encontrar en aguas dulces y residuales. Se caracterizan por contener silicio en sus paredes celulares. Almacenan carbono de maneras diversas, ya sea como aceites o como crisolaminarina (polímero glucídico)</p>
Heterokontophyta	<p>Está constituida por una gran diversidad de clases dentro de los cuales destaca la Crysophyceae (algas doradas), conformadas por especies similares en términos de composición bioquímica y pigmento. Las algas doradas se caracterizan por los complejos pigmentos que lo conforman, los cuales les proporcionan tonalidades amarillas, cafés o naranjas. Principalmente son de agua dulce. Sus reservas de carbono son los lípidos y los carbohidratos. Así mismo otras clases relevantes de esta división son: Phaeophyceae (algas cafés), Xantophyceae (algas verdes-amarillas), Eustigmatophyceae (forma parte del pico-plancton), etc.</p>
Cianobacteria	<p>Las cianobacterias son microorganismos procariotes cuya estructura y organización son similares a las de las bacterias. Las cianobacterias desempeñan un papel relevante en la fijación de nitrógeno atmosférico.</p>
Otras divisiones	Rhodophyta (algas rojas), Dinophyta (dinoglagelados).

## 2.6 Selección de especies nativas de microalgas para biodiesel.

Se ha reportado que hay especies de microalgas que en promedio su contenido lipídico puede variar entre el 1% al 70%, y en ocasiones, pueden alcanzar el 90% en peso de lípido/peso seco de biomasa a ciertas condiciones (Chisti, 2007; Amaro et al., 2011). Por otro lado, existen especies de microalgas que al ser inducidas a ciertas condiciones de estrés pueden acumular lípidos en porcentajes altos.

En la tabla 3, se presentan algunas de las especies de microalgas con mayor potencial para la producción de biodiesel debido a su alto contenido de lípidos.

**Tabla 3.-Contenido lipídico y productividad de diferentes especies de algas marinas.  
Fuente: Garibay Hernández et al., 2009.**

	Especie microalga	Contenido lípido (%peso/peso en seco)	Productividad lípido (mgL <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )
Agua dulce	Botryococcus sp.	25-75	-
	Chaetoceros muelleri	33.6	21.8
	Chlorella vulgaris	5-58	11.2-40
	Chlorella emersonii	25-63	10.3-50
	Chlorella sp.	18-57	42.1
	Scenedesmus obliquos	11-55	-
	Haematococcus pluvialis	25	-
Agua marina	Dunaliella salina	6-25	116
	Nannochloris sp.	20-56	60.9-76.5
	Spirulina platensis	4-16.6	-
	Neochlorisoleo abundans	29-65	90-134

La microalga que comúnmente se ha reportado ser una buena opción para la producción de biodiesel es la Chlorella, que no solo posee niveles de contenido de lípidos entre el 20% al

50%, sino además, tiene una alta productividad de biomasa (Amaro et al., 2011). Entre otras especies que presenta la misma situación, son la *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum* y *Porphyridium* sp, etc.

Además de la alta productividad de biomasa y la selección de la especie de microalga más adecuada para la producción de biodiesel, también se debe tomar en cuenta otros factores, como por ejemplo el perfil de ácidos grasos (componentes de los lípidos) de las microalgas. Esto es muy importante, debido a que de estas depende el poder calorífico, así como ciertas propiedades físico-químicas tales como viscosidad, densidad, número de cetano, etc., del biodiesel. Dichas propiedades se deben a que están en función del tamaño de la cadena de los metil ésteres de ácidos grasos presentes, así como la saturación e insaturación de los mismos.

El número de cetano, índice que relaciona la calidad de ignición del combustible diésel del petróleo, disminuye con el decrecimiento de la longitud de cadena de carbonos de los metil ésteres de ácidos grasos en el caso del biodiesel, así como la presencia de ramificaciones y aumento de las insaturaciones en la cadena. Por otro lado, entre más saturación esté presente en la cadena del metil éster de ácido graso, mejor será la estabilidad oxidativa, de forma contraria, se presentan con las cadenas insaturadas o poli-insaturadas. Pero esta situación se compensa debido a que se genera una consistencia del punto de fusión para condiciones climáticas de baja temperatura (Knothe, 2008).

Un ejemplo de investigación acerca de las diferencias de perfil de ácidos grasos según el tipo de microalgas, está el trabajo de Thomas et al. (1984), que en su investigación: screening for lipids yield in microalgae, estudiaron la composición de ácidos grasos de siete especies de microalgas de agua dulce. Dichas microalgas podían sintetizar C14:0, C16:0, C18:0, C18:2 y C18:3 de ácidos grasos, mientras que su contenido de otros ácidos grasos como residuales se observaron los de cadena C16:4 y C18:4 en *Ankistrodesmus* sp, C18:4 y C22:6 en *Isochrysis* sp, C16:2, C16:3 y C20:5 en *Nannochloris* sp., C16:2, C16:3 y C20:5 en *Nitzschia* sp. (Amaro et al., 2011).

## **2.7 Balance energético para producción de biodiesel.**

La energía es la capacidad para poder efectuar cualquier tipo de trabajo. La energía existe de distintas formas, desde energía térmica, química, electromecánica y metabólica (Duarte Murillo, 2010) la cual, conforme se va manifestando, puede transformarse a otro tipo de energía, siguiendo la primera ley de la termodinámica. Dependiendo del tipo de fuente al que provenga, pueden ser catalogadas como renovables o no renovables.

Las energías renovables son aquellas que tienen como recursos materias primas que se pueden utilizar de manera continua por su capacidad regenerativa (Duarte Murillo, 2010). Mientras que las no renovables, no pueden permanecer constantemente en uso, ya que llega

a un punto de agotamiento y desequilibrio tanto por la explotación del hombre, así como la incapacidad de la naturaleza de poder regenerarlas, por ejemplo, el petróleo.

Un balance energético para los biocombustibles se refiere al análisis de la diferencia entre la energía disponible por unidad de combustible que es producido y la energía que fue requerida para su fabricación, tomando en cuenta todas las etapas de producción, desde el cultivo de la materia prima, el transporte de esta a la industria, la industrialización que es la parte de la transformación química mediante transesterificación (en el caso del biodiesel), hasta el transporte para uso final (Duarte Murillo, 2010). En algunos casos, también se hace la integración y evaluación de la disposición final de los residuos generados en el proceso de producción.

Bajo esta definición, mediante el cálculo del balance energético se determina si el biocombustible proporciona más energía durante su combustión de la que fue requerida para su elaboración. Otra definición del balance energético para biocombustibles líquidos “es la cantidad de energía contenida en el biocombustible con respecto a la energía consumida en su fabricación. Sus resultados generan índices energéticos (IE) que pueden variar de acuerdo a las diversas metodologías utilizadas, por lo mismo puede haber diferencias de un estudio a otro y es siempre recomendable comparar el mayor número de estudios” (Sandoval, 2010).

Por otro lado, el balance energético por lo regular, se usa como un indicador de sostenibilidad en cuanto a la temática de biocombustibles líquidos. Recordando, la ONU estableció como última definición en el tercer principio de la “Declaración de Río”, que la sostenibilidad se refiera a la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes, sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos y ecológicos (Sandoval, 2010), esto después de más de 10 años cuando en el informe Brundtland se estableció el término de sustainable development en 1987. Dicho informe para la ONU tenía el nombre de “our common future (nuestro futuro común)”.

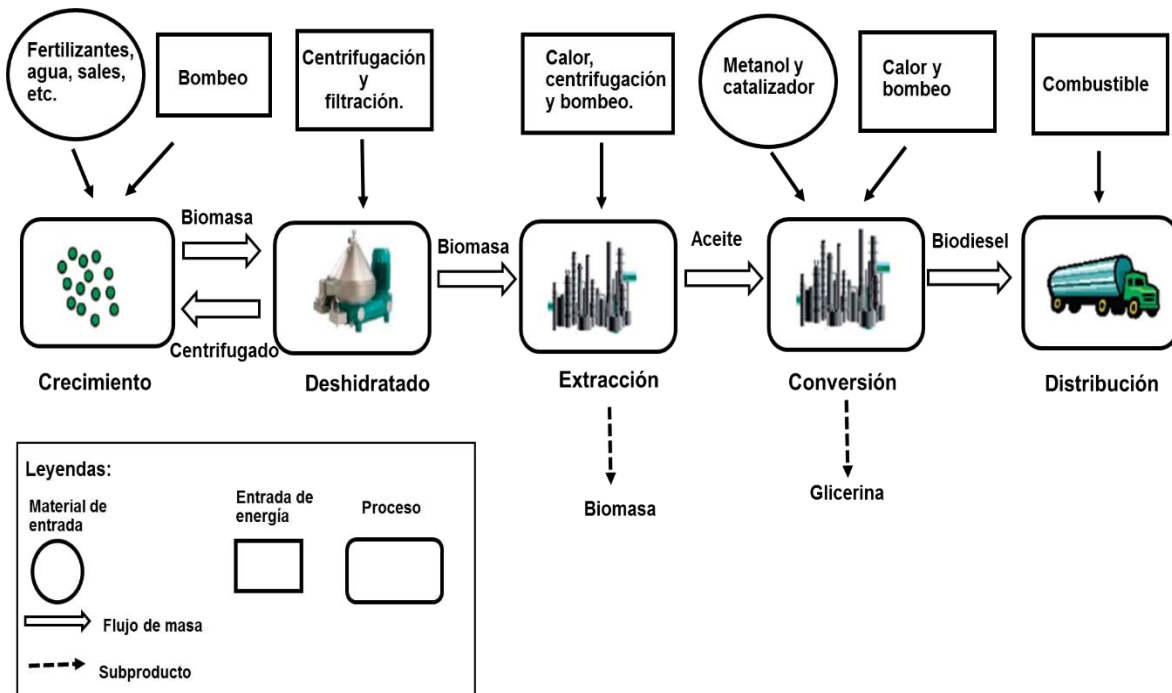
Existen diferentes tipos de estudios que permiten determinar la viabilidad y sustentabilidad de producción de algún biocombustible en particular. Dichos estudios pueden ser análisis técnicos y de proceso, estudios de mercado y el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés) que incluyen dentro de esta última los balances energéticos y de emisiones de dióxido de carbono (Duarte Murillo, 2010).

El Análisis de Ciclo de Vida está estandarizada y descrita por la International Standard Organization, ISO-14040, y establece que el LCA es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impactos en relación con los objetivos del estudio. Las distintas fases del ciclo de vida se encuentran en las normas ISO-14041-14043 (Duarte Murillo, 2010) y se involucran 4 etapas:

- Definición del objetivo y alcance.
- Análisis del inventario.
- Evaluación del impacto.
- Interpretación.

De esta manera, se logra visualizar en que área o proceso están las oportunidades para reducir los impactos ambientales y mejoramientos tecnológicos para la producción de un bien material. Ya de manera más general, con respecto al balance energético, se sugiere la definición de los límites del sistema, entradas y salida de los tipos de energías considerados, así como las suposiciones hechas (Yáñez Angarita et al., 2009; Sudhakar et al., 2012; Duarte Murillo, 2010).

Varios autores basan sus estudios de balance energético en escenarios como el que se presenta en la figura 5, de los cuales, la mayoría son escenarios hipotéticos que permiten hacer un estudio de forma más cercana a la realidad de como sería una producción de biodiesel a partir de cierto material oleaginoso, siendo algunos autores Sudhakar et al. (2012), Razon et al. (2011), Batan et.al. (2010) y Zhang et al. (2013), los que han usado este tipo de esquemas para sus estudios de biodiesel a partir de microalgas.



**Figura 5.-Panorama general del Análisis de Ciclo de Vida del proceso de producción de biodiesel, Fuente: Batan et al., 2010**

Los tipos de energías que regularmente se consideran al hacer al análisis del balance energético para biocombustibles líquidos son los siguientes según Duarte Murillo (2010):

1. *Energía de la materia prima o indirecta*: es la energía contenida en la materia prima que termina en el producto final, como por ejemplo: la energía del metanol, catalizadores, solvente, nutrientes, etc...
2. *Energía de proceso o directa*: es la energía que no contribuye al contenido energético del producto, pero es necesaria para la conversión del producto: gas, electricidad, diesel, etc...
3. *Energía fósil*: es la energía fósil o derivados de combustibles fósiles utilizado para el proceso de fabricación.
4. *Energía final de combustible*: es la energía contenida en el producto que puede ser convertida en trabajo, es decir, el contenido energético del biodiesel.

Finalmente, el cálculo de la relación de energía de salida/energía de entrada en la producción de biodiesel también puede ser usado como un indicador tecno-económico y como análisis de la factibilidad ambiental cuando se comparan diferentes plantas oleaginosas. Este indicador puede mostrar el mejor tipo de cultivo para la producción de biodiesel y un escenario económico y geográfico específico (Yáñez Angarita et al., 2009).

Otros indicadores o parámetros utilizados en los análisis del balance de energético se presentan a continuación:

1. Energía total de entrada: es la suma de todas las energías de los subprocesos involucrados en la producción de biocombustible (Yáñez Angarita et al., 2009).
2. Crédito energético: es la energía proporcionada por los subproductos (Zhang et al., 2013).
3. NER (Net Energy Ratio por sus siglas en inglés) conocido como proporción energética neta: es la energía de salida (proporcionado por el biocombustible) entre la energía total de entrada (Duarte Murillo, 2010; Sudhakar et al., 2012; Zhang et al., 2013; Batan et al., 2010)
4. Productividad energética (PE): es la relación de la cantidad producida del bien, en unidades de volumen o masa, con respecto a la energía invertida en su obtención (Duarte Murillo, 2010).
5. Rendimiento unitario: es la cantidad de biocombustible obtenido (en volumen, peso, o energía) por unidad de superficie utilizada (en hectáreas) (Sandoval, 2010).

Existen varios balances energéticos con este tipo de conceptos, siendo algunos ejemplos presentados en la tabla 4. Cabe mencionar que algunos balances energéticos de una misma materia prima pueden variar en sus resultados dependiendo de las suposiciones que haga el autor. Por ejemplo, varios autores se limitan en la producción de biodiesel y no hasta el punto de transporte del biocombustible para su uso final. Otros autores hacen sus estudios

energéticos de no sólo la producción de biodiesel, sino además de otro biocombustible a partir de los residuos de extracción de lípidos de la microalga, sea biogás (Ventura et al., 2013; Sialve et al., 2009), o bioetanol (Zhang et al., 2013).

**Tabla 4.- Balance energético de biodiesel con diferentes materias primas.**

Materia prima	Proporción Energética Neta (NET)	Referencia
Aceite de soya	0.61	(Batan et al., 2010)
Aceite de soya	0.75	(Zhang et al., 2013)
Aceite de palma	4.2	(Yáñez Angarita et al., 2009)
Microalgas fototróficas	2.03	(Zhang et al., 2013)
Microalga heterotróficas	1.71	(Zhang et al., 2013)
Microalga <i>Nannochloropsis</i>	1.07	(Batan et al., 2010)
Microalga <i>Chlorella V.</i>	2.6	(Ventura et al., 2013)

Debido a la escasa existencia de datos de producción de biodiesel a gran escala con microalgas, varios autores hacen suposiciones para lograr un acercamiento a los escenarios posibles de producción de biocombustibles con esta materia prima en los Análisis de Ciclo de Vida. Por ejemplo, Batan et al. (2010) hace un pequeño resumen de autores que hacen suposiciones en sus análisis de balance energéticos para la estimación del valor NER (proporción energética neta). Está el caso de Campbell et al. (2008), que desarrolló un análisis energético basado en resúmenes de estudios previos, pero con combinación de diferentes datos de cepas de microalgas para producción de biodiesel en estanque abierto. Lardon et al. (2009), propuso a través de un estudio de ciclo de vida un sistema de producción tipo circuito (Open raceway pond en inglés) para la producción de biodiesel a partir de microalgas extrapolando resultados de escala laboratorio para asignar los valores de energía que se ocupan en el cultivo. Clarens et al. (2010) no incorporó la energía y materiales en la etapa de conversión de aceite de microalga a biodiesel, sólo incluyó la estimación el valor del CO<sub>2</sub>. Por otro lado, Yanfen et al. (2012), hace un análisis energético para producción de biodiesel con microalgas en China, y no habiendo datos a gran escala el cultivo, es su estudio hace la selección de un escenario hipotético para un proceso de producción probable tomando valores de otros países para los insumos energéticos, como suposiciones de tasa de crecimiento y biodigestión.

En consecuencia, los datos en que se basan los Análisis de Ciclo de Vida de las microalgas deben extrapolarse de los sistemas a escala laboratorio o de esquemas comerciales que han sido diseñados para la producción de productos de alto valor como pigmentos y suplementos como alimentos natural. A pesar de esta limitación, el LCA sirve como una herramienta para ayudar en el diseño de cualquier sistema de estudio (Slade & Bauen, 2013).

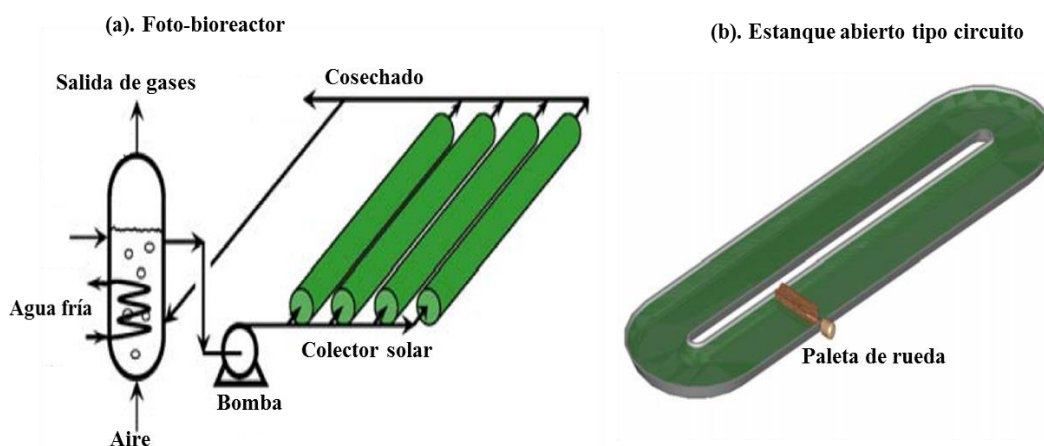


## 2.8 Resumen de los procesos involucrados para el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas.

Se dará un panorama general sobre aquellas etapas involucradas en la producción de biodiesel con microalgas, tomando en cuenta los factores energéticos e insumos involucrados en cada proceso para poder desarrollar un balance energético. Muchos datos para lograr el balance energético fueron tomados de las tecnologías que por experiencia de otros países nos permitirán tener un panorama amplio sobre los escenarios posibles para la explotación de las microalgas que crecen en agua residual.

### 2.8.1 Cultivo de microalgas.

Existe dos tipos de sistemas de cultivos para las microalgas, siendo los siguientes: los foto-bioreactores, que consisten en una serie de tubos transparentes, usualmente de plástico o cristal, que sirven como colectores solar, cuyo diámetro es de 0.1 m o menos para una mejor captación de la luz solar, alcanzando altas concentraciones del cultivo de microalgas (Chisti, 2007). Los estanques abiertos tipo circuito son los otros modelos de sistemas de cultivo, que por lo regular, son construidos con un área útil de 1000 m<sup>2</sup> (100 m de largo por 10 metros de ancho) con 30 cm de profundidad y son cubierto por una capa de acrílico para hacerlos impermeables. En ocasiones, algunos autores, presentan en sus análisis de producción de biodiesel a partir de microalgas, un área de cultivo de hasta 100 ha, siendo en total 100 estanques (Collet et al., 2011). Ambos sistemas de cultivo se presentan en la figura 6.



**Figura 6.- Tipos de sistemas de cultivo utilizados para la producción de microalgas.**  
Fuentes: Chisti, 2007, y Garibay Hernández et al., 2009.



Los sistemas de estanque abierto tipo circuito, son más aptos para la producción de microalgas, aun cuando la tasa de crecimiento de estas son menores que las obtenidas por los foto-bioreactores (Chisti, 2007). Esto es debido a la disponibilidad de la luz solar, el dióxido de carbono proveniente del aire, y los nutrientes provenientes del agua que son fáciles de asimilar por la naturaleza del crecimiento fototrófica de las microalgas (Brennan & Owende, 2010).

Por otro lado, existen sistemas de cultivos a escala piloto que utilizan lámparas fluorescentes para una continua producción de biomasa, siendo no viables su uso, debido a la gran entrada de energía, y con frecuencia es electricidad, que es producida a partir del combustible fósil (Collet et al., 2011) teniendo más impacto por generación de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Estudios más recientes han determinado que los cultivos de los sistemas abiertos tipo circuito son mejores que los foto-bioreactores, ya que su proporción energética (NER) para un total de producción de biomasa es mayor que el de los foto-bioreactores; además, de que los costos de esto últimos son casi de una magnitud mayor al de los estanques abiertos tipo circuito (Collet et al., 2011).

Los sistemas de cultivo de estanque abiertos tipo circuito no necesariamente compite con las tierra de cultivo, ya que estos pueden ser implementados en áreas con potencial marginal para cultivo (Brennan & Owende, 2010). Es importante enfatizar que la energía requerida de entrada es menor, además de que el mantenimiento y limpieza es fácil de lograrlo. Por lo regular, para una mejor producción de microalgas en continuo para estos sistemas, se introducen nutrientes frente de una rueda de paleta que ocasiona el mezclado de estos, y la circulación de agua para evitar sedimentación de las microalgas (Brennan & Owende, 2010; Zhang et al., 2013; Chisti, 2007; Wagener, 1983). Con base a la composición promedio de las microalgas  $CO_{0.48}H_{1.83}N_{0.11}P_{0.01}$  en algunos Análisis de Ciclo de Vida estiman los requerimientos de nitrógeno y fósforo por unidad de superficie o por año (Zhang et al., 2013; Ventura et al., 2013). Al determinar la cantidad necesaria de nutrientes, generalmente se hace la integración de fertilizantes como urea (22.3 MJ/kg producido) que proporciona el nitrógeno, y el fosfato diamónico o DAP (13.2 MJ/kg producido) como precursor de fósforo para el cultivo (Zhang et al., 2013).

El consumo energético para esta etapa del proceso se debe al mismo mezclado que se realiza por la rueda de paleta, cuyas condiciones de velocidad de mezclado debe estar en un rango de 20-25 m/s, con un valor de energía específica de 0.1 W/m (Zhang et al., 2013; Seambiotic Ltd., 2006; Wagener, 1983). Cuando se logra una concentración de 0.5 kg/m<sup>3</sup> por lo regular las microalgas son cosechadas mediante diferentes técnicas para concentrar lo mayor posible, el cual, después de este proceso, son bombeados al sistema de centrifugación y secado para su posterior extracción de lípidos. Pocos son los autores que dentro de su balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas incluyen el factor energético del bombeo,

y se reporta que esta actividad tiene un valor de  $32.6 \text{ kJ/m}^3$  (Zhang et al., 2013; Jorquera et al., 2010).

### **2.8.2 Separación de la microalga del medio acuoso: Etapa de cosechado.**

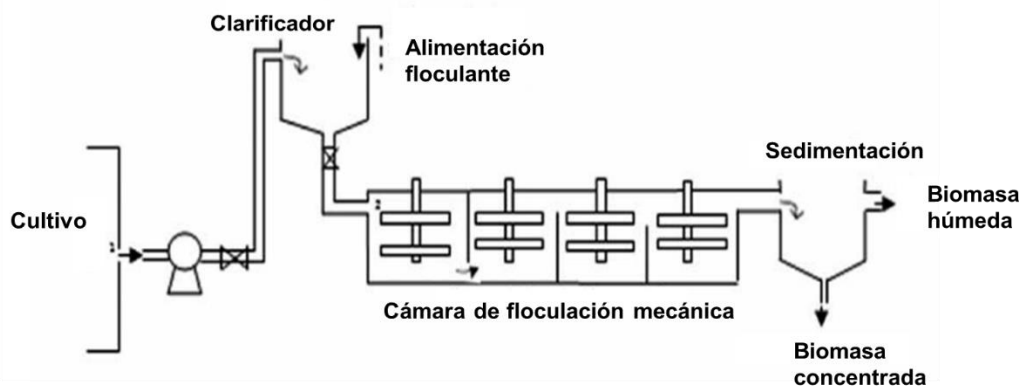
Cuando la concentración de las microalgas alcanza en los estanques de cultivo su máximo crecimiento son cosechadas para su posterior procesamiento. Existen varios métodos, siendo una de ellas mediante mallas de tamaño de 1 mm de diámetro, lo cual concentra la solución de algas hasta cuatro veces de la concentración inicial (Zhang et al., 2013) para después ser enviado a centrifugas y luego a secado de la biomasa.

Se ha reportado que la centrifugación de las microalgas tiene un valor de energía específica de consumo de  $1 \text{ kWh/m}^3$  para obtener una torta con contenido de sólidos del 15% en peso (Zhang et al., 2013).

Otro proceso de cosecha que autores reportan en el Análisis de Ciclo de Vida de producción de biodiesel a partir de microalgas es la coagulación-floculación. Cabe mencionar que este proceso consiste en la aglomeración de partículas entre sí para formar partículas de mayor tamaño y facilitar dicha recuperación mediante sedimentación, flotación o filtración. Ya que las células de las microalgas se encuentran dispersas debido a una carga negativa que impide la agregación natural de las células en suspensión, y la adición del floculante neutraliza dicha carga negativa dando resultados flóculos (Peralta- Ruiz et al., 2012)

Por otro lado, también se presenta los valores determinados para el cosechado con el proceso de coagulación floculación con agitación mecánica (ver figura 7). En el proceso de cosechado con floculación coagulación se tiene reportado que la concentración óptima de sulfato de aluminio es de  $0.74 \text{ mg/L}$ , obteniendo una concentración final de biomasa de  $30 \text{ g/L}$  con 97 % de recuperación de la biomasa del cultivo (Ventura et al., 2013). Cabe mencionar, que para la etapa de coagulación floculación los valores de energía específica como eléctrico para este proceso es de  $162 \text{ KWh/ton}$  microalga (Ventura et al., 2013; Xu et al., 2011).

Otro de los sistemas que se han utilizado para la recuperación de biomasa de microalgas es la flotación, siendo este un proceso de separación por gravedad en la que el aire es agregado en forma de burbujas para luego llevar las partículas sólidas a la superficie del líquido, siendo esta técnica más beneficiosa que la sedimentación en lo que respecta para la eliminación de microalgas (Peralta- Ruiz et al., 2012).



**Figura 7.-Sistema de coagulación-floculación mecánica. Fuente: Peralta-Ruiz et al., 2012.**

Actualmente se están desarrollando nuevas investigaciones tecnológicas para la recuperación de las microalgas mediante el uso del ozono. Dicho proceso consiste en la generación de ozono para la flotación de las microalgas, con beneficios de una dualidad de tratamiento del agua (oxidación avanzada) así como eliminación de microalgas para su uso en generación de biocombustible.

De forma general, la ozoflotación es un proceso donde se combina las propiedades oxidativas del ozono ( $O_3$ ) con el de flotación para remoción de las partículas suspendidas en agua. Una de las bondades de utilizar ozono disperso en la recuperación de microalgas es el fenómeno de la lisis que sufre la membrana de la biomasa, ocasionando un mejoramiento del contacto del solvente con los lípidos. Por ejemplo, a nivel laboratorio se ha observado que debido a este proceso de ruptura de la pared celular de las microalgas mejora el rendimiento de la extracción de lípidos con solvente (Valeriano González, 2013).

Estudios previos han reportado la remoción de algas en un 93% con una concentración de ozono de 3 mg/L que fue obtenida evaluando la acción de ozono con permanganato como preoxidante (Chen et al., 2009). Por lo regular, los reportes bibliográficos de ozoflotación de microalgas han sido sólo por especie, como es el caso de Chen et al., 2010 y 2011, donde logró una separación de *Scenedesmus obliquus* con una dosis de 0.2-0.5 mg  $O_3$ /mg de biomasa, y *Chlorella vulgaris* con 0.005-0.03 mg  $O_3$ /mg de biomasa respectivamente (Valeriano González, 2013).

Se ha encontrado que el tipo de microalga presente en la muestra y su contenido influye de manera directa con el consumo de ozono (Valeriano González, 2013), siendo muy poco reportes bibliográficos sobre la recuperación de consorcio de microalgas de agua residual con ozoflotación.

Para el proceso de secado de las microalgas, existen diferentes métodos con sus respectivas energías específicas correspondientes. Dentro de estos, se encuentra los sistemas de secado con gas, con un factor energético de 3.6 MJ/kg de agua eliminado (Zhang et al., 2013; Sander & Murthy, 2010). También existe el proceso de secado solar que no requiere energía de entrada, pero es muy lento que se ha considerado no viable para forma comercial (Zhang et al., 2013). El secado al vapor (ver figura 8) es el más utilizado comparado con el secado solar y gas, con un consumo de 134 kWh para producir una tonelada de biomasa seca de microalgas (Zhang et al., 2013; Equipment High efficient drying, 2011).



**Figura 8.-Equipo de secado para biomasa. Fuente: (Zhang, et al., 2013)**

A menudo, para que la extracción de lípidos de la biomasa no se vea afectada por el gran volumen de la biomasa de microalgas, es necesario la trituración para obtener un polvo fino fácil de extraerle los lípidos. Dichos sistemas (ver figura 9) tienen una energía específica de 16 kWh para producir una tonelada de producto fino (Zhang et al., 2013; Ball Grinding Machine, 2011).



**Figura 9.-Sistema de trituración. Fuente: (Zhang, et al., 2013)**

### 2.8.3 Extracción de los lípidos de las microalgas.

Debido a que en la actualidad, los procesos de extracción de lípidos de las microalgas hasta su conversión a biodiesel (transesterificación) no existen o se han practicado a gran escala, algunos autores toman datos de estas etapas del ciclo de vida del proceso de producción de biodiesel a partir del aceite de soya, ya que suponen son similares para las microalgas (Yang et al., 2011; Batan et al., 2010; Sander & Murthy, 2010).

Es importante recalcar que dentro del análisis con enfoque de ciclo de vida de esta etapa de la extracción de aceite, algunos de los procesos como son la molienda, descascarado, trituración y la disposición final de los residuos generados, que son parte de la pre-extracción del aceite son omitidas debido a la diferencia entre la biomasa de microalgas y la semilla de soya (Sander & Murthy, 2010).

Batan et al. (2010), proponen un proceso basado en la extracción de lípidos a partir de la industria del aceite de soya, que está conformado generalmente por procesos de mezclado, centrifugación, tanques decantadores y dos unidades de destilación para recuperación de solventes, dando consumos de energía eléctrica de 0.126 kWh/ kg de lípido extraído de microalgas, así como el calor consumido generado en parte por gas natural con una energía específica de 1.404 MJ/ kg lípido extraído, con un 90% de eficiencia de extracción de lípidos, con una utilización de solvente de cloroformo/metanol en proporción de volumen de 2:1, 20 ml de solvente por gramo de lípido extraído.

Duarte Murillo (2010), en su tesis de “Balance de energético y ecológico de biodiesel a partir de *Jatropha Curca*”, presenta los equipos necesarios para la extracción de aceites a partir de este tipo de semilla. Él describe que se necesita un extractor rotativo, donde el hexano es el solvente más utilizado a una relación de 1,2 kg hexano/kg de semilla. Dicho proceso tiene un consumo específico eléctrico de 3.6 kWh/ton de semilla debido al extractor contra corriente rotativo, precalentador del solvente y bombas (Duarte Murillo, 2010)

De forma general, desde la recuperación del hexano en la biomasa hasta la de los lípidos que quedan en las micela, el proceso tiene un gasto energético total de 0.02343 kWh/kg de semilla como energía eléctrica, y 0.71892 MJ/kg de semilla como calor (Duarte Murillo, 2010). Las consideraciones para el sistema anterior son que la planta de extracción no contempla las operaciones de desgomado, las fuentes generadoras de vapor son calderas de bajo consumo utilizando gas natural, y que la producción de hexano se contempla dentro de los gastos energéticos del balance energético.

Para esta tesis, el proceso de extracción y transesterificación de aceite se tomaron de los datos de Gerardo Murillo (2010) por ser un caso muy aproximado a México.

#### 2.8.4 Transesterificación (conversión a biodiesel) y producción de biogás.

La reacción de ácidos grasos con un alcohol e hidróxido de sodio como catalizador que produce glicerol y tres ésteres metílicos es conocido como la reacción de transesterificación. La reacción de transesterificación es reversible, lo que es necesario agregar un exceso de alcohol para lograr mejor rendimiento, desplazando el equilibrio para la obtención de metil éster de ácidos grasos (biodiesel). La elección del tipo del alcohol que será utilizado en la reacción de transesterificación depende de aspectos económicos, técnicos y ambientales. Dentro del mercado existe la venta de metanol, etanol, isopropanol y butanol, pero el metanol es el más utilizado debido a que ha dado mejores rendimientos de obtención de biodiesel a temperaturas menores y presión atmosférica.

Los tipos de catalizadores que se han usado en la transesterificación son desde tipo ácido hasta los básicos homogéneos. Dependiendo la cantidad de ácidos grasos libres se recomienda un tipo específico de catalizador. Por ejemplo, se ha reportado que los aceites no deben tener agua a no más del 0.06% en peso del aceite y menos del 0.5% en peso para los ácidos grasos libres cuando se va usar catalizadores homogéneos, como el hidróxido de sodio, ya que éste es muy sensible a dichas características creando jabones en la reacción (Fangrui et al., 1998). Por lo tanto, se recomienda usar catalizadores ácidos como el sulfúrico para disminuir dicha cantidad de ácidos grasos libres y evitar la formación de jabones.

La transesterificación de los ácidos grasos es una etapa clave en todo el proceso, ya que si hay pocos rendimientos de la reacción, el balance energético puede verse afectado. Algunos autores reportan que los rendimientos de la reacción por debajo del 80% puede hacer el proceso no viable para producir biodiesel. La etapa de la conversión de los lípidos recuperado de la biomasa microalgal puede tomar las mismas consideraciones y proceso de la transesterificación de aceites de las plantas oleaginosas convencionales como ya se mencionó anteriormente. Algunos datos que pueden ser de gran utilidad, están en la tabla 5 provenientes del Análisis de Ciclo de Vida del aceite de soya (Razon & Tan, 2011).

**Tabla 5.- Reactivos y productos para biodiesel del aceite de soya. Fuente: Razon & Tan, 2011**

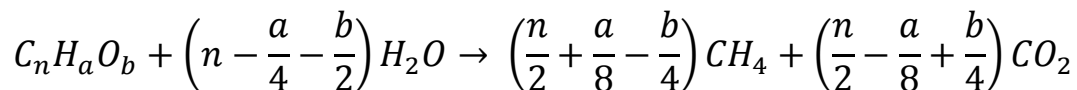
<i>Entradas al proceso de transesterificación</i>	
Aceite soya	1kg
Metanol	0.1 kg
NaOH	0.011 kg
Calor (proveniente de planta CHP)	2.06 MJ
<i>Salida al proceso de transesterificación</i>	
Metil esters (biodiesel)	1 Kg
Glicerina	0.47 kg



La digestión anaerobia es un proceso clave que puede resolver la problemática del manejo de la biomasa residual, así como el mejoramiento de los balances energéticos, donde al obtener biogás, este mismo se puede consumir dentro del mismo proceso de obtención de biodiesel (Sialve et al., 2009). En pocas palabras, la conversión de la biomasa de microalgas después de la extracción de lípidos a metano es un proceso que puede obtener más energía que ni los mismo lípidos (Sialve et al., 2009).

En bibliografía sugieren agregar una unidad de digestión después de la extracción de lípidos de las microalgas para la reutilización de la biomasa residual y para producción de biogás. La temperatura del digestor debe ser para condiciones mesofílicas, con un operación de 14 días a una tasa de carga de 0.006 ton VS/ m<sup>3</sup>\*d para la producción de gas metano (CH<sub>4</sub>) a 0.2 L/g VS de microalga. La concentración de sólidos totales debe estar a 93 g/L con un contenido de 0.9 g VS/ g TS (Ventura et al., 2013).

Razon et al., 2011, para su estudio del análisis energético de producción de biodiesel y biogás, estiman la producción de este último con la ecuación 1, asumiendo un 60% de conversión y un 60% de transformación de nitrógeno a amoníaco. Ellos suponen el consumo energético de la producción de gas a partir de microalgas de haematococcus pluvialis and nannochloropsis, similar al requerimiento energético de la obtención de biogás con la digestión de lodos descritos en la base de datos de Ecoinvent ®, requiriendo 0.91 MJ/m<sup>3</sup> de biogás generado.



**Ecuación 1.-Ecuación general de la obtención de gas metano.**

El único rubro energético que Razon et al. (2011) no toman en cuenta en su estudio es el del requerimiento de calor, ya que hacen la suposición de dicho sistema de producción de biogás se localiza en una zona tropical y finalmente reportan que se obtiene una producción de que por 1 kg de metil ester de ácidos grasos, existe una producción de 2.6 m<sup>3</sup> de biogás a condiciones de temperatura y presión estándar.

## CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA.

En este capítulo se presenta la información recabada de la literatura que le dio sustento al balance energético a partir de las microalgas separadas del medio acuoso. Por otro lado, la dinámica desarrollada para el balance energético de la producción de biodiesel a partir de las microalgas, comenzó con la asignación de los factores energéticos conocidos como energías específicas a cada proceso involucrado. Al final, se relacionaron dichos factores de energía con la cantidad de materia prima a procesar y productos obtenidos de cada etapa del proceso de producción de biodiesel, permitiendo cuantificar la energía utilizada como eléctrica o el gas en la generación de calor para el proceso de biodiesel a partir de microalgas.

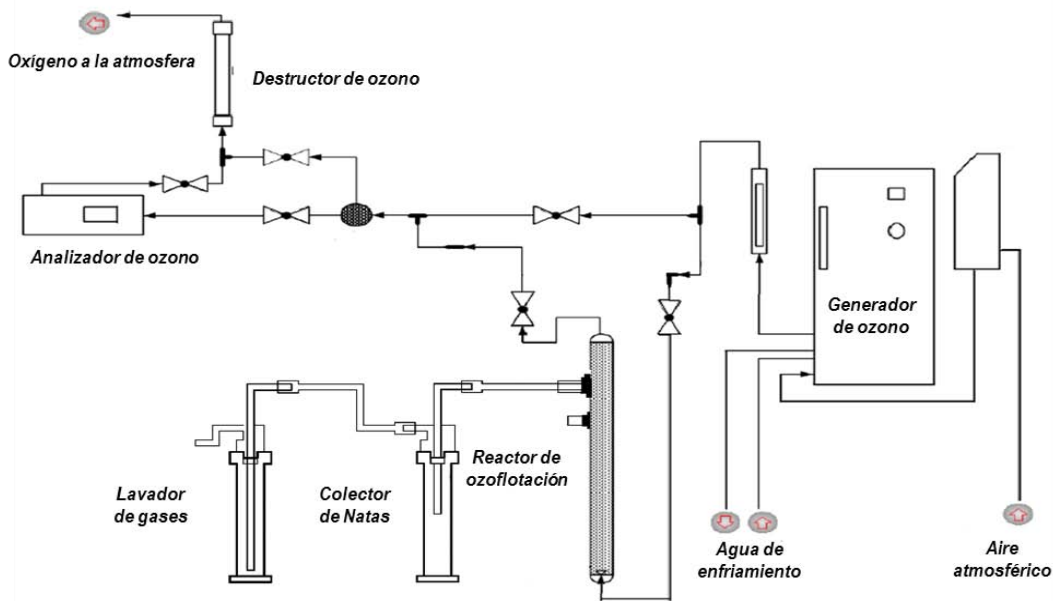
### 3.1 Metodología para el balance energético.

Gran parte de la metodología que fue utilizado en este caso de estudio, fue mediante la recopilación de diversas fuentes bibliográficas para el desarrollo del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso, dándole un enfoque de ciclo de vida. La forma con que se evaluó la eficiencia energética del proceso se presenta a continuación:

1. Se establecieron los límites del proceso de la producción de biodiesel a partir de microalgas.
2. Se identificaron las operaciones involucradas en el proceso de la producción de biodiesel.
3. Se determinaron las variables del proceso que definen el volumen de producción, base de cálculo y suposiciones hechas.
4. Se recopiló de bibliografía las energías específicas de cada actividad involucrada en el proceso de producción de biodiesel, así como los factores de consumo sobre el volumen de producción.
5. Se multiplicaron dichas energías específicas por la cantidad de materia prima a procesar, así como los co-productos, y reactivos utilizados en cada etapa del proceso.
6. En el proceso de ozoflotación se midió la cantidad de energía necesaria para la separación de microalgas del medio acuoso a partir de su tiempo de operación y la potencia de un generador de ozono (ver diagrama de la figura 10) Labo 76 (Emery Trailigaz, USA) con capacidad de producción de 19 g de O<sub>3</sub>/h, que está conformado por una unidad de destrucción de ozono (PCL Ozono & Control Systems inc., Fairfield Crescent, West Alwell, NJ) y un analizador de ozono en fase gas (Ozone Monitor 465H, Teledyne Instruments.).
7. Se sumaron las magnitudes energéticas obtenidas en las diferentes actividades involucradas en una misma etapa de proceso, para poder finalmente agruparlos y obtener la cantidad de energía requerida en cada unidad de producción.



8. Se cuantificaron los productos finales, y se calculó su energía aprovechable a partir de su poder calorífico.
9. Se relacionó las energías disponibles de los productos finales con la energía requerida para su producción.

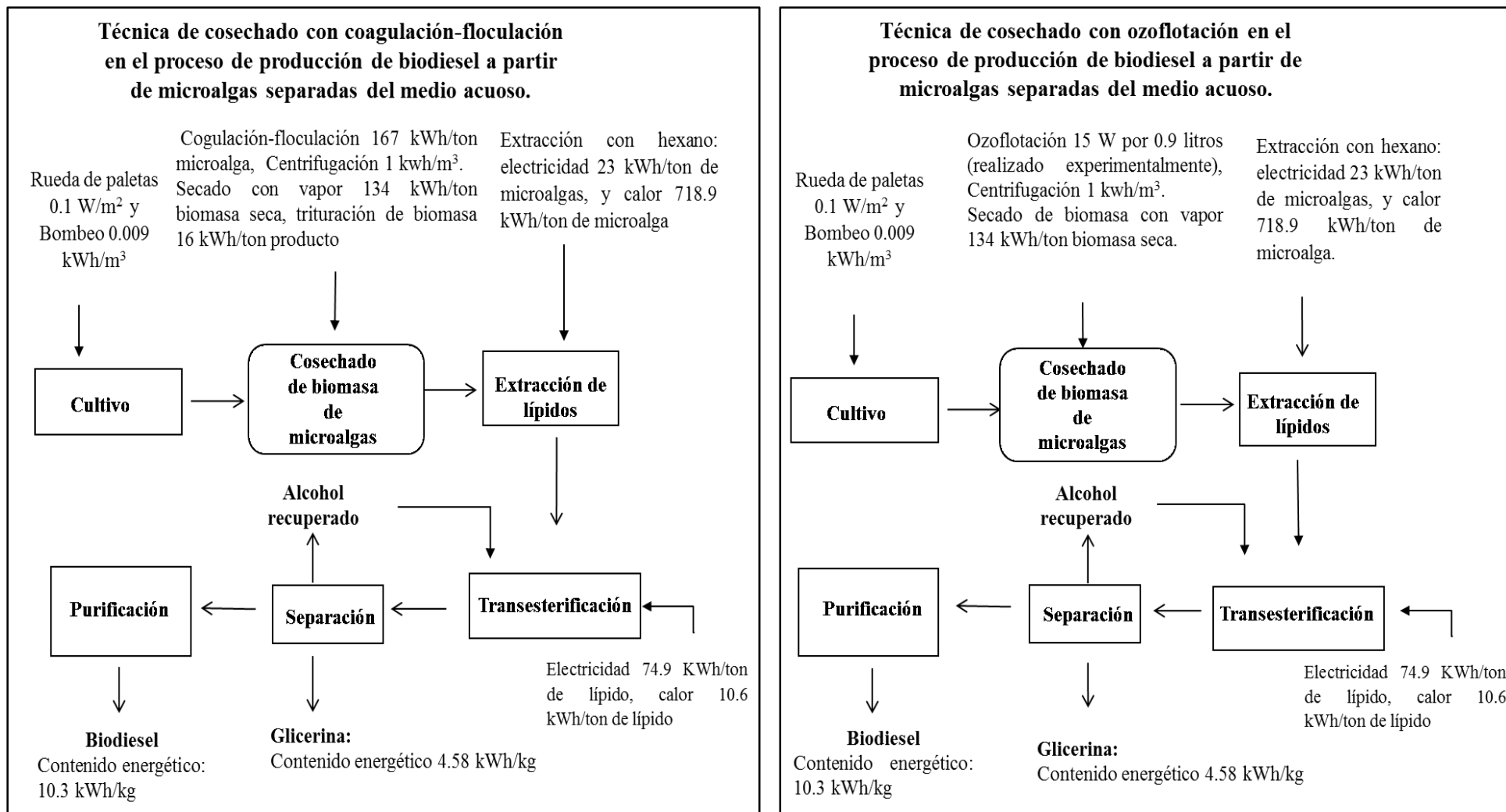


**Figura 10.- Diagrama del ozonador conformado por un generador de ozono Labo 76 (Emery Trailigaz, USA), Fuente: Valeriano González, 2013.**

### 3.1.2 Límites del sistema.

Actualmente en México no existe la experiencia de producción de microalgas a gran escala para obtención de biodiesel. Por lo tanto, para este tipo de situaciones, se recomienda seleccionar un escenario hipotético para poder desarrollar el balance energético (Yanfen et al., 2012).

Para lograr el estudio del balance energético de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso, se desarrollaron diferentes escenarios de producción de biodiesel, los cuales podemos observarlos en la figura 11 y 12. En estas figuras se pueden apreciar los límites del sistema, así como la mayoría de las energías específicas de cada etapa involucrada en el tren de producción de biodiesel con microalgas, obtenidos de literatura, excepto sólo para ozoflotación ya que dicho dato fue determinado experimentalmente en el laboratorio.



**Figura 11.- Límites del sistema para el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso.**

Como parte del balance energético de la producción de biodiesel, también se consideró la posible valoración de la biomasa residual de la etapa de extracción de lípidos para su aprovechamiento en la generación de gas metano, siendo los escenarios de la figura 12

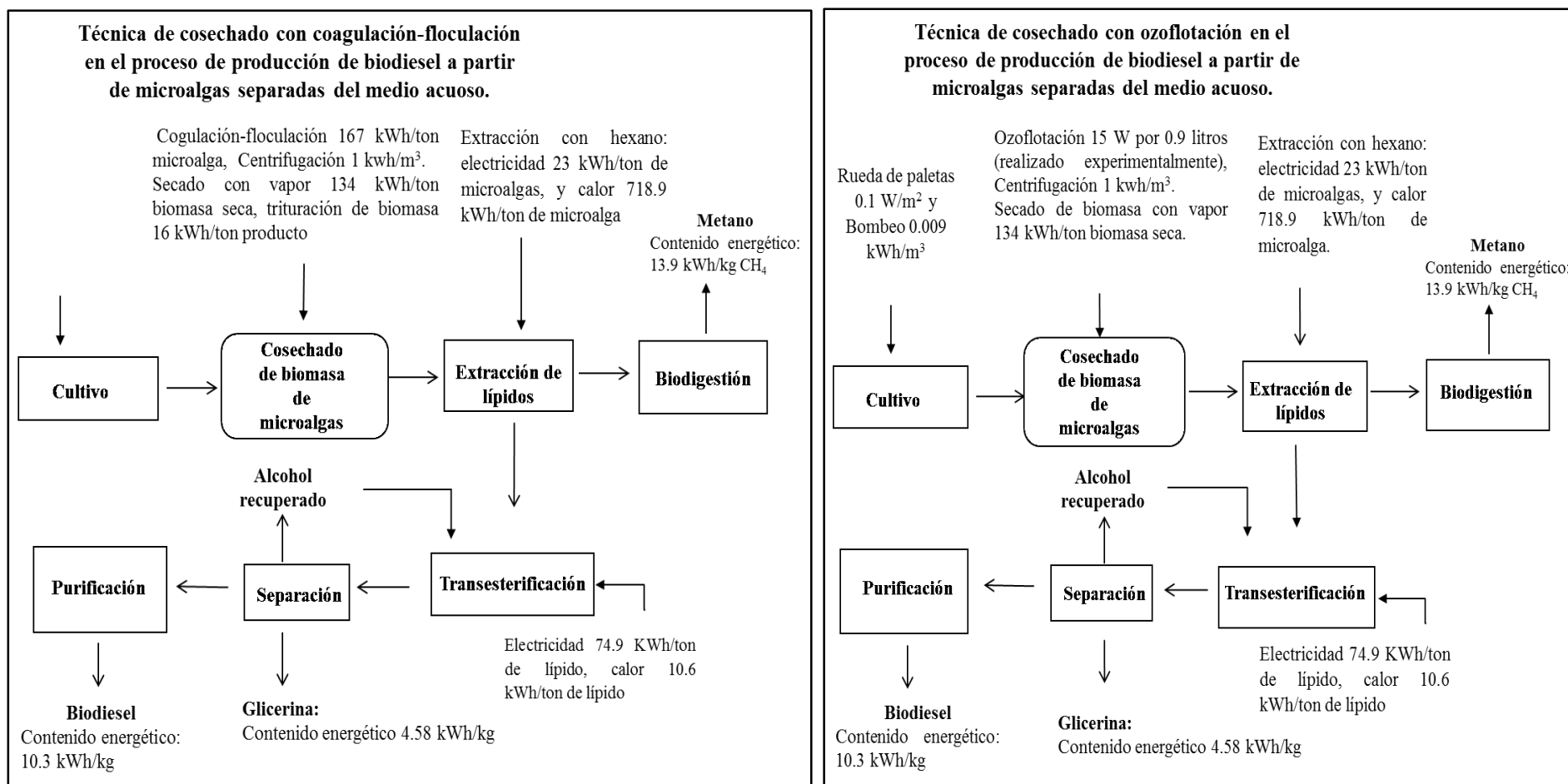


Figura 12.- Límites del sistema para el balance energético de la producción de biodiesel y gas metano a partir de microalgas separadas del medio acuoso.

Asimismo, se pueden apreciar de las figuras anteriores que la etapa de cosechado difiere en los escenarios propuestos para el balance energético de producción de biodiesel, siendo coagulación-floculación, cuyos datos de energías específicas son muy concurrenciosos en la literatura, con respecto a ozoflotación, que está en desarrollo experimentalmente para su mejoramiento, y que se propuso para este estudio como una nueva técnica de cosechado de las microalgas del medio acuoso.

### 3.1.3 Consideraciones para el balance energético de producción de biodiesel.

Los escenarios de la producción de biodiesel a partir de microalgas que fueron usados, estuvieron bajo una serie de consideraciones que permitieron desarrollar el balance energético. Dichas suposiciones son parecidas a como otros autores han realizado en sus estudios (Batan et al., 2010; Sudhakar et al., 2012; Yanfen et al., 2012; Ventura et al., 2013; Zhang et al., 2013), siendo los siguientes:

1. Los límites del sistema que fueron analizados están conformados desde el cultivo de las microalgas hasta la producción de biodiesel, tomando en cuenta cuatro etapas principales: cultivo en sistema de estanque abierto, cosechado, extracción de los lípidos, producción de biodiesel y gas metano según sea el caso.
2. Se integró a la etapa de cosechado los procesos de secado y centrifugación como actividad necesaria antes de la extracción de los lípidos.
3. Se integró la digestión anaerobia para los residuos de biomasa, generados en la etapa post-extracción de lípidos, con el fin de una producción de gas metano teórico. fueron tomados los datos de producción y consumo de energías del trabajo de Ventura et al. (2013), que son datos para balances energéticos de biodiesel, junto con la producción de gas metano, pero para la microalga *Chlorella vulgaris*. Esto debido a que no hay datos para consorcio de microalgas de agua residual. Dichos datos son los más completos en cuanto a los factores energéticos para esta etapa de producción, que nos permitirán hacer una aproximación del balance energético de la obtención de biodiesel con la integración de la generación de gas  $\text{CH}_4$  a partir de microalgas.
4. Se estimó y utilizó un valor de tasa de productividad de las microalgas de 26 g de biomasa seca/m<sup>2</sup>.d para el balance energético de producción de biodiesel.
5. Se asumió el contenido de lípidos en las microalgas del 2.5 % de lípido por masa seca sin usar ozoflotación, y 5% extraído con ozoflotación (valores determinados en laboratorio).
6. La tasa de extracción del aceite de las microalgas utilizado fue del 99%.
7. Se utilizaron los contenidos energéticos para el biodiesel de microalga y gas metano de 37.8 MJ/kg de biodiesel (Zhang et al., 2013) y 50 MJ/kg gas metano (Ventura et al., 2013) respectivamente.

8. El estudio del balance energético se hizo para una producción de 1000 toneladas de biodiesel al año.

### 3.2 Cultivo de microalgas.

La capacidad máxima de producción de biomasa con microalgas está en función de la radiación solar disponible, entre otros factores (Acién et al., 2012). México está privilegiado con respecto a la irradiación solar promedio anual de 5.3 KWh/m<sup>2</sup>\*d (Hernández Cruz, 2012), que equivale a 19.08 MJ/m<sup>2</sup>\*d. De los cuales, esta energía solar es aprovechable para el consorcio de microalgas que es asimilada dentro de su fotosíntesis. Dicho proceso biológico de las microalgas, tiene una eficiencia fotosintética del 2.7% (Sudhakar et al., 2012) y que se traduce en una fijación neta de energía química aproximado de 0.52 MJ/m<sup>2</sup>\*d.

Por otro lado, se ha reportado en literatura que el valor del contenido energético de la biomasa seca de las microalgas es de 20 MJ/kg (Acién et al., 2012). Con este valor y la energía solar aprovechable en la ciudad de México, se estimó una productividad de biomasa de microalga con un valor de 0.026 kg/m<sup>2</sup>\*d (26 g/m<sup>2</sup>\*d). Este valor fue obtenido con la ecuación 2, y utilizado para los cuatro escenarios del balance energético de producción de biodiesel.

$$\text{Productividad microalgas} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{ha año}} \right] = \frac{\left( \text{irradiación solar} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{ha año}} \right] \right) * (\text{Ef microalgas})}{\left( \text{Contenido energético de las microalgas} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] \right) * 1000}$$

#### Ecuación 2.-Productividad de microalgas para estanques abiertos.

Donde:

Ef=Eficiencia fotosintética de las microalgas.

La cantidad de aceite necesario (lípidos) para producir biodiesel, se basa a partir del rendimiento de la reacción de transesterificación y se estimó a partir de la ecuación 3.

$$\text{Aceite} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = \frac{\left( \text{Biodiesel} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right)}{\left( \% w \frac{\text{masa de biodiesel}}{\text{masa de aceite}} \right)}$$

#### Ecuación 3.-Cantidad de lípidos de microalgas para la producción de biodiesel al año.

Las toneladas de microalgas que se requirieron para la producción de los lípidos según la cantidad de biodiesel requerida, fue determinado con la ecuación 4, donde la variable del contenido lípido por biomasa seca de microalgas es una variable importante en dicho cálculo.

$$\text{microalgas seca } \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] = \frac{\left( \text{Aceite } \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right)}{\left( \%w \frac{\text{masa de aceite}}{\text{masa de microalgas}} \right)}$$

**Ecuación 4.-Microalgas necesarias.**

El área necesaria para cultivar las microalgas y lograr dicha producción de biodiesel, se calculó a partir de la tasa de productividad de las microalgas (Zhang et al., 2013; Acien et al., 2012), así de la misma manera también se determina para cultivos oleaginosos (Duarte Murillo, 2010), pero con su respectivo valor de productividad (sea microalgas o semilla oleaginosas). Para un mejor panorama, dicho valor se evaluó a partir de la ecuación 5.

$$\text{Area de cultivo } \left[ \frac{\text{ha}}{\text{año}} \right] = \frac{\left( \text{microalga seca } \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right)}{\left( \text{Productividad de microalgas } \left[ \frac{\text{ton}}{\text{ha año}} \right] \right)}$$

**Ecuación 5.-Área de cultivo requerido.**

Con las ecuaciones anteriores, se puede observar que las variables que determinan la capacidad de producción de biodiesel son:

1. El contenido de lípidos, %w
2. El rendimiento del cultivo, ton/ha\*año
3. El rendimiento en peso de la transesterificación, %.

La variable número uno y dos dependen de la forma en que se lleve el cultivo de las microalgas (sea mediante estanque abierto tipo circuito o foto-bioreactores), mientras que el punto tres depende de la tecnología actual usada para este tipo de reacciones, que es la transesterificación de aceites para la obtención de metil ésteres de ácidos grasos (biodiesel).

### 3.2.1 Cultivo de microalgas y energías específicas involucradas.

Se determinó bajo condiciones naturales una concentración del consorcio de microalgas de 0.354 g/L aproximadamente a los 14 días, por el cual, se supuso que las microalgas al lograr dicha concentración serán cosechadas para después ser bombeadas al sistema secado y trituración para su acondicionamiento a la extracción de lípidos. Para ello, en la tabla 6 se presentan los valores de las energías específicas para las actividades involucradas en el cultivo.

**Tabla 6.- Energías específicas para el cultivo de microalgas.**

Cultivo	Energía específica	Referencias.
Mezclado	0.1 W/m <sup>2</sup>	(Zhang et al., 2013; Wagener, 1983; Seambiotic Ltd., 2006)
Bombeo	32.6 kJ/m <sup>3</sup>	(Zhang et al., 2013; Jorquera et al., 2010)

Las ecuaciones que fueron utilizadas y que describen el cálculo para el consumo energético a partir de las energías específicas del cultivo de microalgas en estanque abiertos son las siguientes:

$$\text{Mezclado con paleta de rueda} \left( \frac{\text{Kwh}}{\text{año}} \right) = 0.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * \left( \frac{8760}{1000} \right) * \left( \frac{\text{A}}{10000} \right)$$

**Ecuación 6.- Consumo energético del mezclado.**

Donce:

A = Área de cultivo de las microalgas.

El factor de 10000 ayuda a transformar las hectáreas a metros cuadrados, mientras que el valor de 8760 nos permite convertir el año a horas. Finalmente, el número 1000 ayuda a modificar los wh a kWh.

$$\text{Bombeo} \left( \frac{\text{Kwh}}{\text{año}} \right) = \frac{23.6 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^3}}{\text{C}_{\text{final}} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) * \left( \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \right)} \left( \frac{\left( \frac{\text{ton microalgas}}{\text{año}} \right) (\% \text{ recuperación})}{3.6 \left( \frac{\text{MJ}}{\text{kWh}} \right)} \right)$$

**Ecuación 7.-Cálculo de consumo energético por bombeo de microalgas.**

De la ecuación anterior, el valor de ton microalgas /año es igual a las cantidad de microalgas a procesar según la producción del biodiesel al año que se establezca. Mientras que el porcentaje de recuperación y C<sub>final</sub> (concentración final) dependerá del tipo de cosechado que se aplique dentro del proceso (coagulación-floculación u ozoflotación). Finalmente el factor 3.6 es para transformar los MJ a kWh.

Por otro lado, el consumo de energía total por parte del sistema de cultivo se estimó con la ecuación 8.

$$\text{Cultivo} \left( \frac{\text{KWh}}{\text{año}} \right) = (\text{kwh pos sistema de mezclado}) + (\text{kwh bombeo de cosechado})$$

**Ecuación 8.-Consumo energético total por cultivo.**

**3.3 Consumo energético en el sistema de cosechado, secado y tratamiento de biomasa.**

El cosechado es una de las etapas más importantes dentro de la producción de biodiesel a partir de las microalgas. El proceso de cosecha de la biomasa desde la solución de cultivo, es un importante factor en la determinación de los costos y calidad de los productos. Esto debido a que el fin del proceso de la cosecha es el de eliminar grandes cantidades de agua y recuperar grandes volúmenes de biomasa de microalgas (Peralta- Ruiz et al., 2012), el cual, no se lograría si existe una baja recuperación de las microalgas.

En la tabla 7 se puede observar las energías específicas que fueron utilizadas para el proceso de cosechado de coagulación-floculación con una recuperación de microalgas del 97%, logrando una concentración 60 veces de la inicial (Ventura et al., 2013).

Cabe mencionar que fue necesario adicionar el proceso de centrifugación para lograr eliminar agua hasta un 15 % en peso, así como el proceso de secado para evitar la presencia de agua antes de la etapa de extracción de lípidos, ya que esta puede ocasionar problemas en la recuperación de los lípidos precursores de los metil ésteres de ácidos grasos (FAME por sus siglas en Inglés).



**Tabla 7.- Energías específicas utilizadas para la separación de microalgas del medio acuoso.**

Actividades involucradas en el cosechado.		Referencia
Coagulación-floculación con Sulfato de Aluminio KWh/ton biomasa	167	(Ventura et al., 2013; Xu et al., 2011)
Centrifuga para deshidratado, KWh/m <sup>3</sup> agua	1	(Zhang et al., 2013)
Secado con Vapor, KWh/ton biomasa seca	134	(Zhang et al., 2013; Equipment High efficient drying, 2011)
Pulverizado con trituración, KWh/ton biomasa triturada.	16	(Zhang et al., 2013; Ball Grinding Machine, 2011)

Se recurrió a la ecuación 9 para lograr el cálculo de la energía consumida por el proceso del cosechado con esta técnica.

$$\text{Coagulación – floculación} \left[ \frac{\text{KWh}}{\text{año}} \right] = 167 \left[ \frac{\text{KWh}}{\text{ton}} \right] * \left( \text{microalgas} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right)$$

**Ecuación 9.-Consumo energético por parte de coagulación-floculación.**

Después del proceso de coagulación-floculación, las microalgas fueron enviadas a la etapa de centrifugación con la finalidad de eliminar agua que hay en ellas. El consumo de energía para esta situación se determinó mediante con la ecuación 10.

$$\text{Centrifugación} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \frac{\text{Energía específica centrifugación} \left[ \frac{\text{KWh}}{\text{m}^3} \right]}{\text{Concentración final}} * \left( \text{microalga} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right)$$

**Ecuación 10.-Consumo energético por parte de centrifugación.**

Después, la biomasa fue enviada a la etapa de secado, y finalmente al de triturado (ver ecuaciones 11 y 12).

$$\text{Secado} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \left( (\text{microalgas – aceite}) \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right) * \left( \text{Secado} \left[ \frac{\text{KWh}}{\text{ton}} \right] \right)$$

**Ecuación 11.-Consumo energético por parte de secado de biomasa.**

$$\text{Triturado} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \left( (\text{microalgas} - \text{aceite}) \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right) * \left( \text{triturado} \left[ \frac{\text{KWh}}{\text{ton}} \right] \right)$$

**Ecuación 12.- Consumo energético por parte del triturado para microalgas.**

Para el escenario del balance energético de producción de biodiesel con flotación mediante ozono como técnica de cosechado, a partir de trabajos previos realizados en laboratorio, se logró una recuperación de las microalgas en un 98%, a una dosis de ozono aplicado de 54.5 mg/L, con un tiempo de retención de 35 minutos. Dicho valor tuvo un gasto energético de 15 W por 0.9 litros de volumen de microalgas. Para el cálculo del consumo energético de dicha etapa en el balance energético de producción de biodiesel, se hizo a partir de la ecuación 13.

$$\text{Ozoflotación} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \frac{P[\text{W}] * t * 1000}{v * 60 * C_{\text{final}} * 1000} * \left( \text{Microalgas} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] \right)$$

**Ecuación 13.-Consumo energético para la ozoflotación.**

Donde:

t= Tiempo en minutos del proceso de ozoflotación.

P= Potencia que consume el proceso para recuperar las algas, watts.

v= Volumen de las microalgas que fueron tratadas para recuperarlas, litros.

C<sub>final</sub>= Concentración de las microalgas recuperadas, kg/m<sup>3</sup>

Se midió el consumo de energía total de este escenario, sumándole al proceso de cosechado con ozoflotación los procesos de secado de biomasa y centrifugado. El proceso de trituración se omitió ya que en el laboratorio se encontró que el uso de ozono para recuperar microalgas mejora el rendimiento de extracción.

### 3.4 Extracción de los lípidos.

Como ya se mencionó, los valores de energías específicas, tanto de la transesterificación como el de la extracción de los lípidos, fueron tomados del modelo de los procesos para el de las semillas oleaginosas (debido a la falta de experiencia a gran escala para microalgas). En la tabla 8 se presentan las energías específicas tanto como el de la electricidad y el calor involucrados en dichos procesos por tonelada de semilla que en este caso se tomará como “por tonelada de microalgas”.

**Tabla 8.- Energías específicas involucrados para la extracción de lípidos. Fuente: Duarte Murillo, 2010**

Tipo de energía	kWh/kg biomasa	kWh/ton biomasa
Energía eléctrica	0.02	20
Energía como calor	0.72	720

Para la energía proporcionada por el hexano se tomó como referencia de la tesis de balance energético y ecológico de la producción de biodiesel a partir de *Jatropha Curca* de Gerardo Murillo, 2010. Ver tabla 9.

**Tabla 9.-Energía para la producción de hexano. Fuente: Duarte Murillo, 2010**

Relación de solvente: 1.2 kg hexano/kg biomasa	MJ/kg biodiesel	MJ/ton biodiesel
Energía por producción de hexano	0.05	50

De la misma manera como en los procesos anteriores, para estimar la energía por parte del proceso de extracción de lípidos, se obtuvo a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\text{Extracción} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \left( \text{Energía eléctrica} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{ton}} \right] \right) * (\text{microalgas}) \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$$

**Ecuación 14.- Energía eléctrica para extracción de lípidos.**

$$\text{Extracción} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \left( \text{Calor} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{ton}} \right] * \left( \frac{\text{kWh}}{3.6 \text{ MJ}} \right) \right) * (\text{microalgas}) \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$$

**Ecuación 15.- Energía como calor para extracción de lípidos.**

$$\text{Hexano} \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right] = \left( \text{Energía}_{\text{específica}} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{ton lípido}} \right] * \left( \frac{\text{kWh}}{3.6 \text{ MJ}} \right) \right) * (\text{lípido}) \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$$

**Ecuación 16.- Energía indirecta por el hexano.**

### 3.5 Conversión de los lípidos a biodiesel (transesterificación).

Para los escenarios propuestos del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso, se tomaron los datos para la transesterificación del caso de producción de RYMSA S.A. de C.V. en México. Dicha empresa fue fundada desde 1977, con la finalidad de la producción de plastificantes poliméricos y plastificantes epoxidados de soya. El proceso de producción de este bioplástico consiste en la producción de ésteres metílicos de ácido graso que son epoxidados en sus dobles enlaces, y por lo tanto, se recurre a la reacción de transesterificación que es similar al del biodiesel, con formación de subproducto de glicerina (Duarte Murillo, 2010).

El proceso de conversión de aceite a biodiesel es a temperatura de 60 a 70 °C, a presión atmosférica. Dicho sistema está integrado por separación de glicerina y biodiesel, para después enviar la fase oleica que contiene los metil ésteres de ácidos grasos a una serie de torres de lavado con agua por adsorción contracorriente. Esta empresa tiene una producción al mes de 1,226 toneladas, con un consumo específico de gas de 39.42 MJ/ton biodiesel y electricidad de 277.80 kWh/ton biodiesel (Duarte Murillo, 2010).

Los factores de consumo específicos deben ser normalizados a valores de aceite a procesar al año, por el cual tomando en cuenta el 97% de eficiencia de transformación de aceite a biodiesel y la productividad al año es de 14712 toneladas, los valores de consumo específico se podrán usar en función de la cantidad de aceite a procesar (ver tabla 10), debido a que esta puede variar por el contenido de aceite o ácido graso de la biomasa.

**Tabla 10.- Energías específicas para el proceso transesterificación. Fuente: Duarte Murillo, 2010.**

Energía	Consumo normalizado (MJ/ton lípidos)
Eléctrica	269.71
Gas natural	38.27

Al igual que el hexano, también fueron considerados los gastos energéticos derivados de los procesos de producción de las materias primas que están involucrados en el proceso de transesterificación. Dichas materias primas son: metanol e hidróxido de sodio que en la tabla 11 se presentan sus respectivas energías específicas que se emplearon en el balance energético.

**Tabla 11.-Energía específica de la producción de metanol y NaOH. Fuente: Duarte Murillo, 2010.**

Materia prima	MJ/kg	MJ/ton
Metanol	28.89	28,890
NaOH	1.19 MJ/kg	1,190

El consumo de energía por parte del proceso de transesterificación, fue calculado a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Consumo} \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] = \left( \text{Energía específica electricidad} \left[ \frac{kWh}{\text{ton lipido}} \right] \right) * \text{lipidos} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]$$

**Ecuación 17.- Energía eléctrica consumida en la transesterificación de los lípidos.**

$$\text{Consumo} \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] = \frac{\left( \text{Energía específica calor} \left[ \frac{MJ}{\text{ton lipido}} \right] \right) * \text{lipidos} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]}{3.6}$$

**Ecuación 18.- Energía como calor consumida en la transesterificación de los lípidos.**

$$\text{Consumo} \left[ \frac{kWh}{\text{año}} \right] = \frac{\sum \left( \text{Energía específica reactivos} \left[ \frac{MJ}{\text{ton lipido}} \right] \right) * \text{reactivo} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{año}} \right]}{3.6}$$

**Ecuación 19.- Energía indirecta por el metanol e hidróxido de sodio.**

### 3.6 Digestión de la biomasa después de la extracción de lípidos.

Se tomó en cuenta para el análisis del aprovechamiento de la biomasa residual de microalgas, de la post-extracción de lípidos, que la temperatura de la unidad del digestor debe ser para condiciones mesofílicas, con un tiempo de operación de 14 días a una tasa de carga de 0.006 ton VS/ m<sup>3</sup>\*d para una producción de gas metano (CH<sub>4</sub>) de 0.2 L/g VS de microalga (Ventura et al., 2013).

Los sólidos digeridos del efluente son recuperados por centrifugación para ser usada como fertilizante o como alimentación para el cultivo. En la tabla 12 se presentan los valores de energía específica para cada rubro involucrado en la digestión anaerobia de las microalgas después de la extracción de lípidos.

**Tabla 12.-Valores de energías específicas para la digestión de biomasa.**

Operación	Energía específica (kwh/ton microalga)	Referencia
Mezclado	108	(Ventura et al., 2013) ; Collet et al., 2011)
Centrifugación de la biomasa digerida	25.2	(Ventura et al., 2013) ; Collet et al., 2011)
Calor	612	(Ventura et al., 2013)

De la misma manera, para la producción de gas metano a partir de las microalgas, a las condiciones anteriores, Ventura et al. (2013) reportaron que sólo se produce gas metano en un porcentaje de 76% en peso de la biomasa después de la extracción de lípidos. Para el cálculo energético de esta etapa se recurrieron a las siguientes ecuaciones:

$$Energía \left[ \frac{kWh}{año} \right] = \text{mezclado} \left[ \frac{kWh}{ton biomasa} \right] (biomasa - lípidos) \left[ \frac{ton}{año} \right] * 0.76$$

**Ecuación 20.- Energía eléctrica por el mezclado en el digestor.**

$$Energía \left[ \frac{kWh}{año} \right] = \text{centrifugación} \left[ \frac{kWh}{ton biomasa} \right] (biomasa - lípidos) \left[ \frac{ton}{año} \right] * 0.76$$

**Ecuación 21.- Energía eléctrica por la centrifugación de lodos en el digestor.**

$$Energía \left[ \frac{kWh}{año} \right] = \text{calor} \left[ \frac{kWh}{ton biomasa} \right] (biomasa - lípidos) \left[ \frac{ton}{año} \right] * 0.76$$

**Ecuación 22.- Energía como calor utilizado en el digestor según Ventura et al., 2013.**

### 3.7 Suma de magnitudes energéticas.

Dentro de la metodología que se estableció para el balance energético de la producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso, la parte más importante fue la recolección de datos de las energías específicas por actividad en cada etapa involucrada en el proceso de producción de biodiesel. Es de resaltar que para el tratamiento de los datos de

energía, estas fueron transformados a una misma unidad de energía, por el cual, los valores obtenidos de kWh/año fueron convertidos a MJ/año, utilizando la equivalencia de 3.6 MJ es igual a 1 Kwh.

Entonces, del paso anterior de la metodología al haber obtenido el consumo energético por cada actividad involucrada en el proceso de producción de biodiesel, el siguiente punto fue la suma de cada uno de los consumos energéticos, para obtener el total de la energía necesaria del proceso de producción de biodiesel como se muestra a continuación con la ecuación 23:

$$Energía\ total = \sum_{n=1}^4 Energía\ consumida\ n$$

**Ecuación 23- Energía consumida producción de biodiesel.**

De forma desglosada la ecuación anterior se presenta en la ecuación 24.

$$Energía_{total} = E_{cultivo} + E_{cosechado,secado,trituración} + E_{extracción\ de\ aceite} + E_{transesterificación}.$$

**Ecuación 24.-Consumo energético total por todos los procesos.**

Para la etapa donde está involucrado la producción de gas metano después de la extracción de lípidos se sumó el valor de consumo de dicho proceso a la ecuación 23 y 24.

**3.8 Cuantificación del producto final y su energía.**

El producto final fue el biodiesel para los dos primeros escenarios cuya recuperación de microalgas en el cultivo es mediante coagulación-floculación y ozoflotación. Los escenarios 3 y 4 los productos finales fueron biodiesel con la implementación de digestión de la biomasa residual de microalgas después de la extracción de lípidos para la producción de gas metano. Para eso, la tabla 13 se presenta los valores del contenido energético reportados para biodiesel y gas metano obtenido a partir con microalgas y que fueron usados para estimar la energía dada por dicho biocombustibles.

**Tabla 13.-Contenido de energía por biodiesel y metano.**

Producto	Contenido energético MJ/kg	Contenido energético MJ/ton	Referencia
Biodiesel	30-38.5	30,000-38,500	(Zhang et al., 2013; Duarte Murillo, 2010; Ventura et al., 2013; Yanfen et al., 2012)
Glicerina	19	19,000	(Ventura et al., 2013; Xu et al., 2011)
Biogás	50	50,000	(Ventura et al., 2013; Xu et al., 2011)

Para determinar la energía cedida por el biocombustible, se estimó mediante la ecuación 25.

$$Energía\ salida = (Biocombustible * Contenido_{Energético})_{biodiesel\ o\ gas\ metano}$$

**Ecuación 25.- Energía obtenida por biocombustible.**

**3.9. Relación de energías.**

El gasto energético es otra magnitud que permite relacionar las energías involucradas en el proceso (Duarte Murillo, 2010), donde se considera la energía consumida por etapa con respecto al biodiesel obtenido. De esta manera también se conocerá si el proceso es energéticamente favorable o desfavorable, y esta fue determinada con la ecuación 26

$$Gasto_{energético} \left[ \frac{MJ}{kg\ biodiesel} \right] = \frac{\sum_{n=1}^n Energía\ consumida\ [MJ]}{kg\ biodiesel}$$

**Ecuación 26.-Gasto energético.**

Finalmente, la magnitud de Proporción Energética Neta (NER por sus siglas en inglés se estimó a partir de la ecuación 27.

$$NER = \frac{\sum Energía\ de\ salida\ o\ Energía\ contenida\ en\ el\ biocombustible}{\sum Energía\ primaria\ invertida\ al\ proceso}$$

**Ecuación 27.-Proporción Energética Neta.**



## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados del balance energético para producción de biodiesel y biodiesel con gas metano, incorporando en la etapa de recuperación de microalgas de los escenarios propuesto, la técnica de cosechado de coagulación-floculación, cuyos datos de energías específicas involucradas fueron obtenidos de literatura, y con la técnica de ozoflotación, que fue desarrollado experimentalmente. Después se muestra un análisis de sensibilidad donde se observó cómo se comporta la proporción energética neta (NER por sus siglas en inglés) cuando varían diferentes variables en el proceso de producción de biodiesel, con el fin de encontrar la situación más favorable para poder utilizar este tipo de microalgas de agua residual en la producción de biodiesel.

### 4.1 Balance energético de producción de biodiesel, cosechado con coagulación-floculación.

Durante el desarrollo del programa de cálculo se determinaron las variables que afectan balance de energético. Las variables que nos permite estudiar la producción de biodiesel son:

1. Contenido de lípidos en las microalgas.
2. El rendimiento de la reacción de transesterificación.
3. La concentración máxima del cultivo.

La concentración de microalgas utilizada en el análisis del balance energético fue de  $0.354 \text{ kg/m}^3$  que se determinó en el laboratorio. La productividad de las microalgas fue estimada a partir de la irradiación solar de  $5.3 \text{ Kwh /m}^2\cdot\text{d}$  (Hernández Cruz, 2012). Considerando este valor de irradiación para la ciudad de México, se estimó que la productividad promedio de las microalgas al año fue de un  $26 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$ . Dicho valor está dentro de los valores de productividad reportado para estanques abiertos de  $22\text{-}30 \text{ g/m}^2\cdot\text{d}$  (Zhang et al., 2013). El proceso biológico de las microalgas tiene una eficiencia fotosintética de 2.7% (Sudhakar et al., 2012), y dicho valor fue tomado en cuenta para el cálculo de la productividad anual de este tipo de microalgas para la situación en México. El valor del contenido energético de la biomasa de microalgas que fue utilizado para el cálculo de la productividad fue de  $20 \text{ MJ/kg}$  de biomasa (Acién et al., 2012).

De esta manera se presenta en la tabla 14 las energías que fueron consumidas en el proceso de producción de biodiesel con la técnica de cosechado de coagulación- floculación para la producción de 1000 toneladas de biodiesel al año. Dichos valores fueron obtenidos considerando un contenido de lípidos del 2.5% en peso seco de microalgas determinado en trabajos previos de laboratorio, y con la eficiencia de transesterificación de RYMSA S.A. de C.V. de México del 97%.

**Tabla 14.-Producción de 1000 toneladas de biodiesel al año, Coagulación-floculación.**

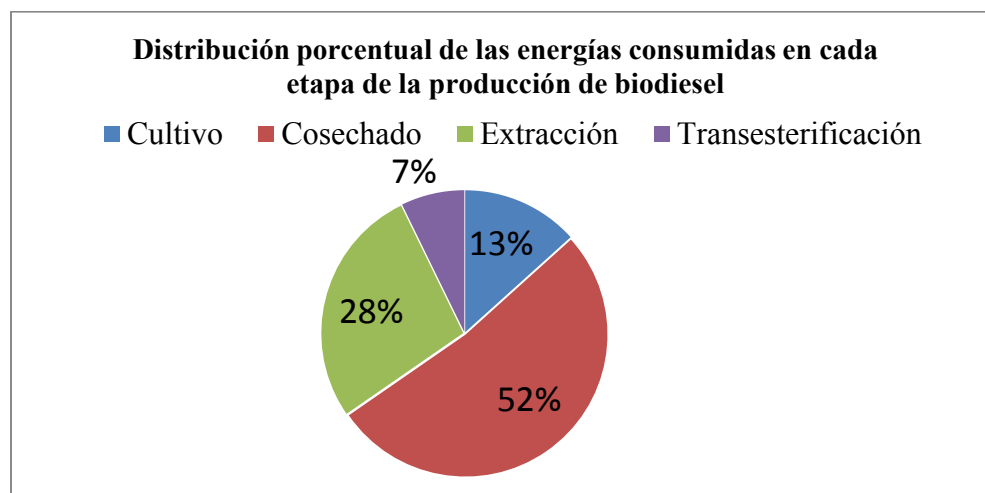
<b>Procesos para Coagulación-floculación.</b>	<b>Cantidad requerida (Ton/año)</b>	<b>Energía directa (KWh/año)</b>	<b>Energía directa equivalente (MJ/año)</b>	<b>Energía indirecta (MJ/año)</b>	<b>Unidades en GJ/año</b>
<b>Cultivo de Microalgas</b>					
Agua necesaria	112,541,488				
Biomasa necesaria	41,237				
Lípidos necesarios	1,031				
Mezclado		3,842,265	13,832,155		13,832.2
Bombeo		19,902	71,648		71.6
Total			13,903,804		13,903.8
<b>Cosechado</b>					
Sulfato de aluminio	86				
Proceso de coagulación-floculación		6,886,598	24,791,752		24,791.7
Centrífuga		2,197,802	7,912,088		7,912.1
secado		5,360,000	19,296,000		19,296
trituración		640,000	2,304,000		2,304
Total			54,303,840		54,303.8
<b>Extracción de lípidos</b>					
Hexano	1,200			48,883	48.9
Energía eléctrica		350,400	1,261,440		1,261.4
Calor			27,283,497		27,283.5
Total			28,593,817		28,593.9
<b>Conversión de lípidos a biodiesel</b>					
Hidróxido de sodio	10			11,900	11.9
Metanol	250			7,222,500	7,222.5
Energía eléctrica		74,919	269,709		269.7
Calor			38,270		38.3
Total			7,542,380		7,542.4
Energía total de entrada			104,343,844		104,343.8
Energía entregada por el biodiesel, MJ			37,422,000		37,422
Crédito de energía por subproductos					
Glicerina	140			2,310,000	2,310
Proporción Energética Neta (NER siglas en inglés), solo biodiesel	0.36				
Proporción Energética Neta (NER siglas en inglés), con crédito energético	0.38				

Por otro lado, en la tabla 15 se presentan los valores de gasto energético de cada etapa del proceso de producción de biodiesel que corresponden a su energía invertida por kilogramo de biodiesel producido.

**Tabla 15.- Gasto energético en la producción de biodiesel, Coagulación-floculación.**

Proceso	MJ/kg biodiesel
Cultivo	13.9
Cosechado	54.3
Extracción	29.0
Transesterificación	7.5

La figura 13 muestra la distribución porcentual de las energías consumidas por etapa de la producción de biodiesel, ocupando la etapa de coagulación-floculación el 52% de le energía total invertida, siendo la más intensa en consumo energético.



**Figura 13.- Distribución porcentual de energías consumidas para la producción de biodiesel, utilizando cosechado con coagulación—floculación.**

El gasto energético involucrado en esta etapa, indica que la actividad de mezclado para coagulación-floculación tuvo un valor de 24.8 MJ/kg biodiesel, mientras que el secado con vapor presentó un 19.3 MJ/kg biodiesel (ver tabla 16).

**Tabla 16.- Gasto energético por actividad en el proceso de cosechado.**

Energía consumida por proceso coagulación-floculación	MJ/kg biodiesel	24.8
Energía consumida por centrifuga	MJ/kg biodiesel	7.9
Energía consumida por secado a vapor	MJ/kg biodiesel	19.3
Pulverizado con triturador	MJ/kg biodiesel	2.3

#### 4.2 Balance energético de producción de biodiesel, cosechado con Ozoflotación.

La ozoflotación para la recuperación de las microalgas es una técnica que sigue en desarrollo en el laboratorio, pero siendo una alternativa como técnica de cosechado se realizó el balance energético, y dichos resultados se presentan en la tabla 17.

**Tabla 17.- Producción de biodiesel 1000 toneladas al año, ozoflotación.**

Procesos, ozoflotación	Cantidad requerida (Ton/año)	Energía directa (KWh/año)	Energía directa equivalente (MJ/año)	Energía indirecta (MJ/año)	unidades en GJ/año
<b>Cultivo de Microalgas</b>					
Agua necesaria	56,270,744				
Biomasa necesaria	20,619				
Lípidos necesarios	1,031				
Mezclado		1,921,133	6,916,078		6,916.1
Bombeo		20,128	72,461		72.5
Total			6,988,539		6,988.5
<b>Cosechado</b>					
Proceso de ozoflotación		22,028,373	79,302,141		79,302.1
Centrifuga		2,222,726	8,001,813		8,001.8
secado		2,710,392	9,757,411		9,757.4
Total			97,061,364		97,061.4
<b>Extracción de lípidos</b>					
Hexano	1,237			49,437	49.4
Energía eléctrica		177,187	637,873		637.9
Calor			13,796,449		13,796.5
Total			14,483,759		14,483.8
<b>Conversión de lípidos a biodiesel</b>					
Hidróxido de sodio	10.3			12,268	12.3
Metanol	258			7,445,877	7,445.9
Energía eléctrica		77,237	278,052		278.1
Calor			39,454		39.5
Total			7,775,650		7,775.7
Energía total de entrada			126,309,311		126,309.3
Energía entregada por el biodiesel, MJ			36,666,000		36,666
Crédito de energía por subproductos					
Glicerina	140			2,310,000	2,310
Proporción Energética Neta (NER siglas en inglés), solo biodiesel	0.29				
Proporción Energética Neta (NER siglas en inglés), con crédito energético	0.31				

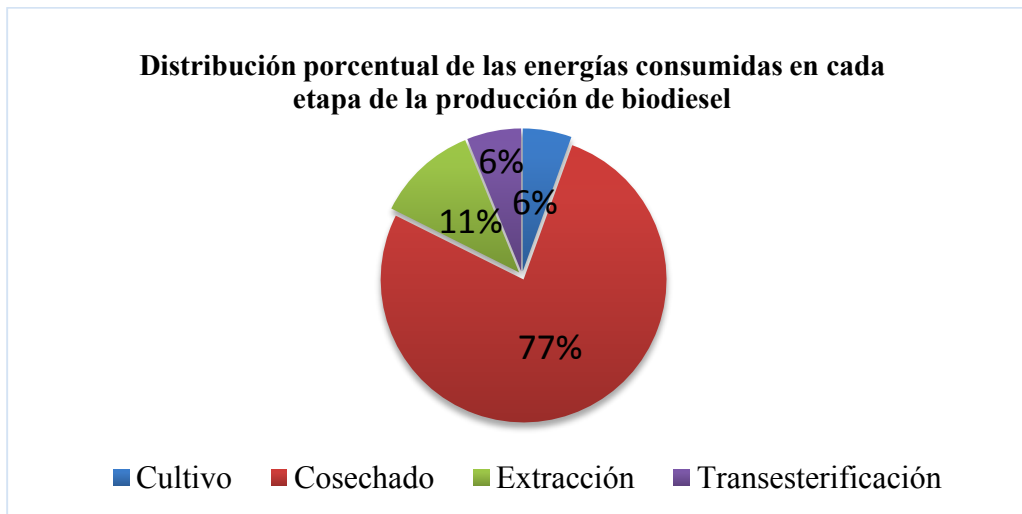
La ozoflotación además de funcionar como una técnica para la separación de partículas suspendidas en el agua, se presenta un proceso de oxidación como parte de tratamiento del agua residual donde las microalgas están presentes.

Por otro lado, se observó que la recuperación de lípidos después de la ozoflotación fue del doble al de la extracción de lípidos cuando no se recuperan las microalgas con ozono. Esto mejora el balance en cuanto en la cantidad de biomasa necesaria para poder cumplir la producción de biodiesel al año. En la tabla 18 se puede observar los gastos energéticos de las etapas involucradas en la cadena de producción de biodiesel con microalgas implementando a la ozoflotación como técnica de cosechado, siendo esta la etapa más intensa en cuanto al gasto energético.

**Tabla 18.- Gasto energético en la producción de biodiesel, ozoflotación.**

Proceso	MJ/kg biodiesel
Cultivo	7.0
Cosechado	97.1
Extracción	14.5
Transesterificación	7.8

Para un panorama más amplio, la figura 14 nos demuestra que de la distribución porcentual del consumo de energías en el proceso de producción de biodiesel, el cual, la ozoflotación ocupó un 77% con respecto a las demás etapas.



**Figura 14.- Distribución porcentual de energías consumidas para biodiesel, cosechado con ozoflotación.**

Algunos autores (Zhang et al., 2013; Ventura et al., 2013; Batan et al., 2010) dentro de la etapa de cosechado, incluyen los factores energéticos de la centrifugación, secado, y si es necesario la trituration de la biomasa, como rubros pertenecientes a la etapa de recuperación

de las microalgas. Para este análisis, no se tomó en cuenta el rubro de consumo energético por parte de la trituración de biomasa, ya que la ozoflotación tiene la ventaja de mejorar el rendimiento de recuperación de los lípidos de las microalgas.

En la tabla 19 sólo se presentaron las actividades de la centrifugación, ozoflotación y el secado, a diferencia de la coagulación-floculación del análisis anterior, donde estuvo involucrado la trituración de biomasa como algunos autores la introducen en su estudio del balance energético cuando se hace este tipo técnica de cosechado. Siendo de esta manera, la ozoflotación la etapa que más gasto energético presentó para lograr la separación de microalgas del medio acuoso, con un valor de 79.3 MJ/kg de biodiesel generado en el proceso al año.

**Tabla 19.- Gasto energético por actividad involucrada en cosechado con ozoflotación.**

Energía eléctrica consumida por ozoflotación	Valor en MJ/kg biodiesel	79.3
Energía eléctrica consumida por centrifugación	Valor en MJ/kg biodiesel	8.0
Energía eléctrica consumida por secado	Valor en MJ/kg biodiesel	9.8

#### **4.3 Balance energético teórico de la producción de biodiesel con generación de gas metano a partir de la biomasa residual de la extracción de lípidos.**

Se encontró que para ambas situaciones de producción de biodiesel (cosechado con coagulación-floculación y ozoflotación), la producción de gas metano permite mejorar el valor del NER debido a que el gas metano a partir de la digestión de la biomasa de microalgas tiene mayor contenido energético que el biodiesel producido a partir de sus lípidos.

Las energías específicas de las actividades involucradas para lograr la producción de gas metano fueron tomadas de Ventura et al. (2013), donde en dicho trabajo, él presentó los mismos rubros al implementar el análisis energético de la producción de este biocombustible (gas metano) después de la extracción de lípidos en el tren de producción de biodiesel a partir de microalgas. En la tabla 20 y 21 se presentan los resultados obtenidos para nuestro caso de estudio.

**Tabla 20.- Energías consumidas en la producción de gas metano, cosechado por medio de Coagulación-floculación.**

Procesos involucrados.	kWh/año	MJ/año	GJ/año
Digestión anaerobia (mezclado biomasa)	4,212,000	15,163,200	15,163.2
Centrifugado para lodos digeridos	982,800	3,538,080	3,538.1
Calor para mantener condiciones mesofílicas	23,868,000	85,924,800	85,924.8
Valor total	29,062,800	104,626,080	104,626.1
Total de energía entrada	58,047,201	208,969,924	208,969.9
Energía producida por biodiesel+gas metano	64,525,000	232,290,000	232,290
Crédito energético por la glicerina, KWh/año	641,667	2,310,000	2,310
NER sin crédito energético por glicerina	1.11		
NER con crédito energético por glicerina	1.12		

Los factores energéticos que fueron utilizados para el cálculo de la etapa de la digestión de las microalgas post-extracción de lípidos, están en función sólo de la biomasa a procesar. De esta manera, la tabla anterior y la tabla 21 fueron estimadas los rubros energéticos necesarios para dicha producción de gas metano (CH<sub>4</sub>).

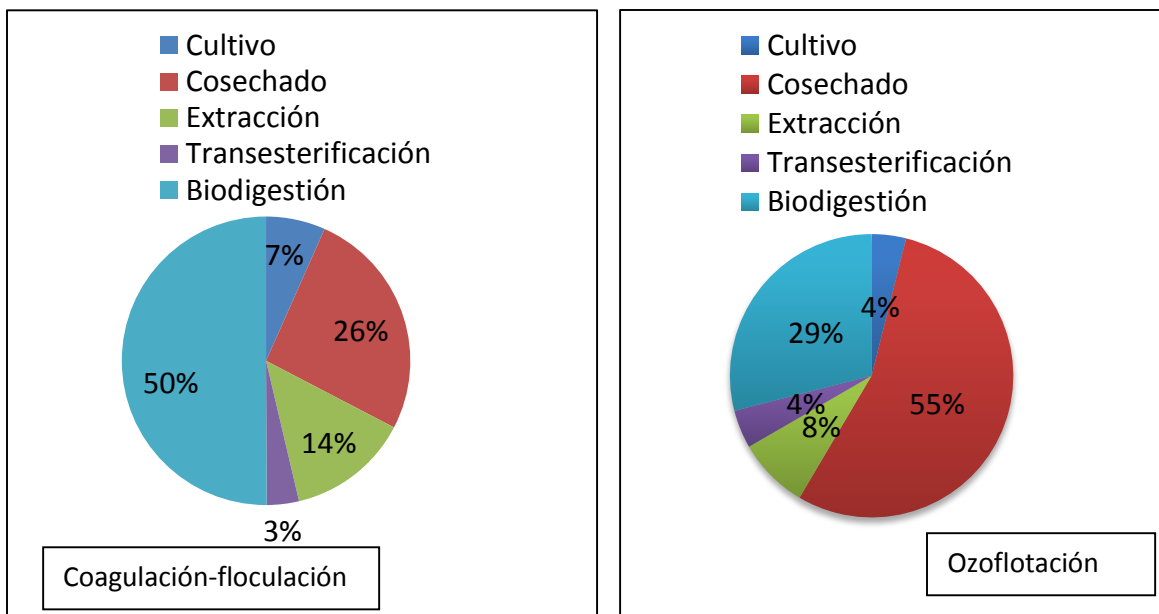
**Tabla 21.-Energías consumidas en la producción de gas metano, cosechado por medio de Ozoflotación.**

Procesos involucrados	kWh/año	MJ/año	GJ/año
Digestión anaerobia, (mezclado de biomasa)	2,075,270	7,470,972	7,470.9
Centrifugado para lodos digeridos	484,230	1,743,227	1,743.2
Calor para mantener a condición mesofílicas	11,759,864	42,335,510	42,335.5
Valor total	14,319,364	51,549,709	51,549.7
Total energía de entrada	49,405,283	177,859,020	177,859
Energía producida por biodiesel + gas metano	37,074,046	133,466,567	133,466.6
Crédito energético por glicerina		2,310,000	2,310
NER sin crédito energético	0.75		
NER con crédito energético	0.76		

Como se observaron en las tablas anteriores, la implementación de producción de gas metano después de la extracción de los lípidos de las microalgas, favoreció el valor NER en el escenario donde se hace uso de la coagulación floculación como técnica de recuperación de

biomasa del medio acuoso, ya que sólo para producción de biodiesel se obtendría un NER de 0.38 (con el crédito energético de la glicerina incorporado), aumentando a 1.12 al producir gas metano respectivamente. Esta situación no ocurrió para el escenario de ozoflotación, ya que sólo aumentó el valor del NER a 0.76 de los 0.31 cuando sólo hay producción de biodiesel. Esto se debe a que con el mejoramiento de la extracción de los lípidos por la ozoflotación, se reduce la demanda de biomasa necesaria para el abastecimiento de lípidos requeridos en la tasa que se fijó de producción de biodiesel. Con el programa desarrollado para el balance energético, se encontró que se requieren 19,215 toneladas de biomasa al año para la producción de las 1000 toneladas de biodiesel en el escenario donde está involucrada la ozoflotación; situación contraria para el balance energético de producción de biodiesel con coagulación-floculación como técnica de cosechado, ya que ésta requirió 39,000 toneladas de biomasa para abastecer los lípidos necesarios en la producción de biodiesel que se fijó. De esta forma, se puede explicar porque el valor NER se ve mejorado para el escenario donde se utiliza coagulación-floculación como técnica de cosechado de las microalgas, y es debido a que hay mayor cantidad de biomasa, después de la extracción de los lípidos para su digestión y producción de gas metano.

En la figura 15 se pueden apreciar la distribución de energías consumidas en la producción de biodiesel con la implementación de la generación de gas metano teórico. Se observó que la generación de este biocombustible es intenso en consumo energético, por la implementación del digestor para la obtención de gas metano CH<sub>4</sub>.



**Figura 15.- Distribución porcentual de las energías consumidas en el balance energético de producción de biodiesel con generación teórica de gas metano.**



#### 4.4 Análisis de sensibilidad para producción de biodiesel.

Para obtener un panorama más amplio y valores comparables para ambos procesos de cosechado, se eligieron tres variables bajo análisis y se modificaron mientras que el resto se mantuvieron constantes. Dichas variables que cambiaron en el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas fueron:

1. Producción de biodiesel al año.
2. Rendimiento en peso de la reacción de transesterificación.
3. Contenido de lípidos en las microalgas

##### 4.4.1 Producción de biodiesel al año.

El fin de haber supuesto diferentes cantidades de producción de biodiesel al año, fue para determinar si dicha variable afecta el balance energético establecido, y si está en función de la producción de biodiesel que se establezca.

Para el caso de cosechado con coagulación floculación, la tabla 22 presenta el comportamiento del balance energético a partir de los parámetros de la proporción energética total (NER), la relación energética (energía consumida en todo el proceso de producción por kg de biodiesel), y sobre cómo afectaría la necesidad de área de cultivo.

**Tabla 22.- Cantidad de biodiesel al año, técnica de cosechado de coagulación-floculación.**

Coagulación-floculación	Sólo producción de biodiesel		
	NER	Área de cultivo necesario, ha	Relación energética MJ/kg biodiesel
Cantidad de biodiesel al año			
1000	0.36	439	107
2000	0.36	877	107
4000	0.36	1,754	107
6000	0.36	2,632	107
8000	0.36	3,509	107
10000	0.36	4,386	107

Situación similar se hizo el análisis de sensibilidad para el biodiesel obtenido usando la técnica de cosechado con ozoflotación en la tabla 23.

**Tabla 23.- Cantidad de biodiesel al año, técnica de cosechado de ozoflotación.**

Ozoflotación	Sólo producción de biodiesel		
	Cantidad de biodiesel al año	NER	Área de cultivo necesario, ha
1000	0.29	219	129
2000	0.29	439	129
4000	0.29	877	129
6000	0.29	1,316	129
8000	0.29	1,754	129
10000	0.29	2,193	129

Como se observó en ambos casos, el balance energético no se ve modificado por las diferentes cantidades de producción de biodiesel al año, ya que la cantidad de energía empleada está en función de la materia prima a procesar (biomasa) y por lo tanto, si ésta crece proporcionalmente, el cambio total del balance energético es nulo.

También se encontró, que para utilizar el consorcio de las microalgas de agua residual con este contenido de lípidos, aumentará la necesidad de más área de cultivo para diferentes producciones de biodiesel que se establezcan, manteniéndose constante la relación energética y la Proporción Energética Neta (NER) de 0.29 en el caso de ozoflotación como técnica de cosechado, y 0.36 para coagulación-floculación respectivamente.

Además, el balance energético no se vio favorecido por el aumento de la tasa de producción de biodiesel al año.

#### **4.4.2 Rendimiento en peso de la reacción de transesterificación de los lípidos.**

Con las ecuaciones que se establecieron en la metodología, podemos observar que el rendimiento en peso de la reacción de conversión a biodiesel (transesterificación) tiene un efecto importante en el balance de energético establecido para los dos escenarios con diferentes tipos de técnica de cosechado. Se propuso diferentes rendimientos de la reacción hasta un nivel de caso extremo de 50% como lo establece Duarte Murillo (2010).

Los valores para coagulación floculación se pueden observar en la tabla 24 tomando como indicadores el NER, la cantidad de área de cultivo y la relación energética.

**Tabla 24.- Rendimiento de la reacción de transesterificación, técnica de cosechado de coagulación-floculación.**

<b>Rendimiento de la reacción de transesterificación de los lípidos.</b>	<b>producción de biodiesel</b>		
	NER	Área de cultivo necesario, ha	Relación energética: MJ/kg biodiesel
Rendimiento en peso de la reacción de 99	0.36	430	105
Rendimiento en peso de la reacción de 98	0.35	434	106
Rendimiento en peso de la reacción de 95	0.34	453	111
Rendimiento en peso de la reacción de 90	0.33	473	116
Rendimiento en peso de la reacción de 80	0.29	532	130
Rendimiento en peso de la reacción de 50	0.18	851	209

Los valores del balance energético de producción de biodiesel, utilizando ozoflotación como técnica de cosechado de microalgas, se pueden observar en la tabla 25, tomando los mismos indicadores como en la tabla anterior (NER, área de cultivo y relación energética).

**Tabla 25.- Rendimiento de la reacción de transesterificación, técnica de cosechado de ozoflotación.**

<b>Rendimiento de la reacción de transesterificación de los lípidos.</b>	<b>Producción de biodiesel</b>		
	NER	Área de cultivo necesario, ha	Relación energética: MJ/kg biodiesel
Rendimiento en peso de la reacción de 99	0.3	215	127
Rendimiento en peso de la reacción de 98	0.29	217	128
Rendimiento en peso de la reacción de 95	0.28	226	134
Rendimiento en peso de la reacción de 90	0.27	236	140
Rendimiento en peso de la reacción de 80	0.24	266	157
Rendimiento en peso de la reacción de 50	0.15	425	252

Para ambas situaciones (coagulación floculación y ozoflotación), se pudo contemplar que al no tener un rendimiento óptimo de la transesterificación, habrá más consumo energético

debido a la cantidad de lípidos que se tendría que procesar para satisfacer la producción establecida de las toneladas de biodiesel al año.

Es decir, al requerir más cantidad de lípidos, habrá mayor cantidad de biomasa para procesar. Por esta situación, todas las etapas involucradas en el proceso de producción de biodiesel aumentarán en sus consumos energéticos debido a que la mayoría de los factores energéticos de cada etapa de la producción de biodiesel están en función de la biomasa a tratar.

De aquí, a que la proporción energética neta va disminuyendo al reducir el rendimiento en peso de la reacción de transesterificación, mientras que la relación energética al año, y el área de cultivo aumenta para lograr satisfacer la cantidad necesaria de materia prima (biomasa) requerida y su procesamiento al cubrir dicha producción de biodiesel.

#### 4.4.3 Contenido de lípidos en la biomasa.

El contenido de lípidos en las microalgas, como lo manejan algunos autores, es un factor que se ha reportado ser muy importante para lograr un balance energético de producción de biodiesel positivo. A menudo, se han descrito sobre la existencia de especies de microalgas que pueden contener mayor cantidad de lípidos, pero presentan menor productividad de biomasa, haciendo complicada la utilización de cualquier especie.

Para esto, mediante el análisis de sensibilidad, se propusieron diferentes cantidades de por ciento en peso de contenido en lípidos en las microalgas, con el fin de poder visualizar cual situación es benéfica en ambos tipos de cosechado involucrados en el proceso de producción de biodiesel.

En la tabla 26 se presentan los resultados obtenidos del escenario de producción de biodiesel con coagulación-floculación de microalgas a diferentes contenidos de aceite (lípidos).

**Tabla 26.- Contenido de lípidos en las microalgas, técnica de cosechado de Coagulación-floculación.**

Por ciento en peso de contenido en lípidos en la microalgas	Sólo Biodiesel		
	NER	Área de cultivo, ha	MJ/kg biodiesel
2.5	0.35	439	108
5.0	0.66	219	58
10.0	1.15	110	33
20.0	1.86	55	20
30.0	2.34	37	16
40.0	2.69	27	14
50.0	2.95	22	13

El escenario del balance energético de producción de biodiesel utilizando coagulación-floculación como técnica de cosechado, se vio favorecido cuando la microalga presente mayor a 10% de contenido de lípidos, ya que el NER aumentará hasta un 1.15, demandando un área de cultivo de 110 ha, y haciendo favorable su explotación para este biocombustible.

De la misma manera, en la tabla 27 se muestra el mismo análisis anterior pero con ozoflotación, observándose que la implementación de esta técnica de cosechado es mejorado con un valor de NER de 1.18, cuando las microalgas tengan como mínimo un contenido de lípidos del 25%, con la ventaja de disminuir el área requerida a 44 ha de cultivo para la producción de las 1000 toneladas de biodiesel al año.

**Tabla 27.- Contenido de lípidos en las microalgas, con técnica de cosechado de Ozoflotación.**

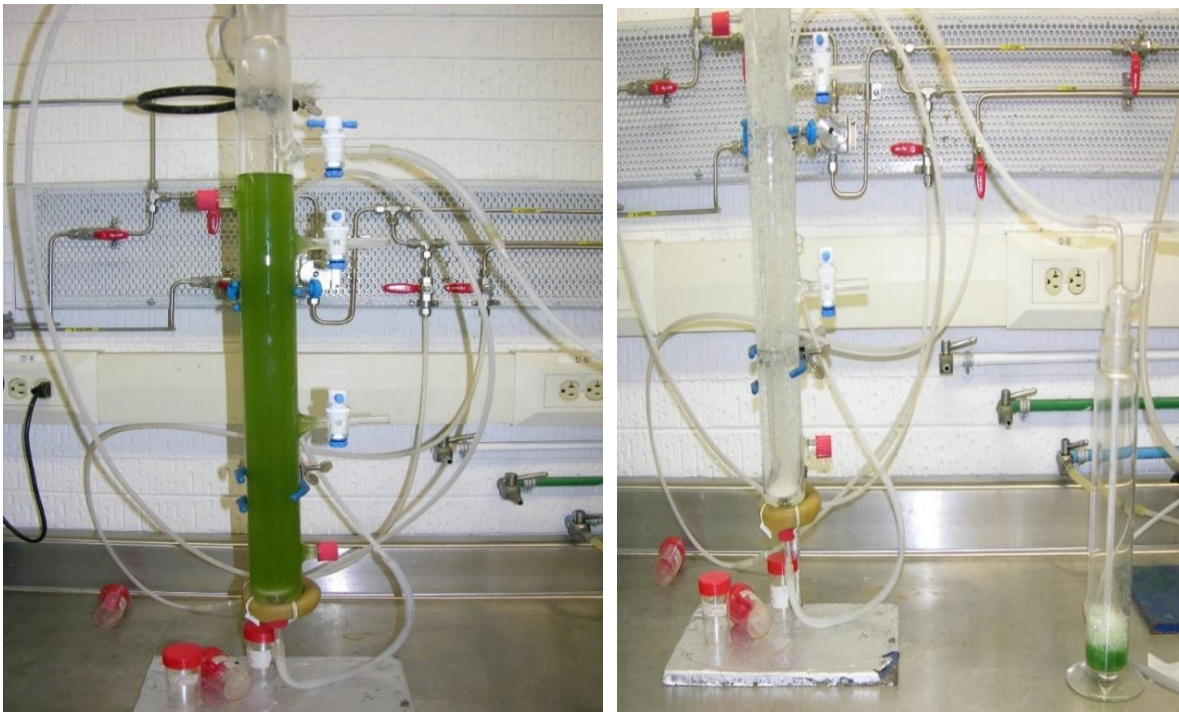
Porcentaje en peso de contenido de lípido en microalgas	Sólo Biodiesel		
	NER	Área de cultivo, ha	MJ/kg biodiesel
2.5	0.15	439	252
5.0	0.29	219	130
10.0	0.55	110	69
20.0	0.99	55	38
30.0	1.34	37	28
40.0	1.63	27	23
50.0	1.88	22	20

#### 4.5. Calidad del agua después de la ozoflotación.

A las condiciones de dosis de ozono aplicado (DOA) de 54.4 mg/L con un tiempo de retención hidráulico de 35 minutos, se midieron ciertos parámetros de calidad de agua de la columna de separación (ver figura 16) al final del proceso de la ozoflotación.

Tomando como referencia a la norma oficial mexicana la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, para la protección de su calidad y posibilitar sus usos se analizó que las características finales del agua estuvieran dentro del rango de los límites permisibles que se establecen en ella.

Esta información, nos permitió tener una visión general del escenario de la recuperación de las microalgas del medio acuoso con respecto al efluente y su calidad antes de una descarga a un bien nacional.



**Figura 16.- Proceso de Ozoflotación: lado izquierdo es la columna de separación con microalgas al minuto cero; de lado derecho el proceso a los treinta y cinco minutos.**

Dicha muestra de agua que fue utilizada para estas pruebas de separación de microalgas del medio acuoso con ozoflotación, es la misma que conforma el lago de Nabor Carillo (ver figura 17) proveniente de las lagunas facultativas operada por CONAGUA y que se encuentran localizadas en la zona federal del lago de Texcoco. En ella se llevan a cabo el tratamiento del agua de una parte de la ciudad de México, con una capacidad de operación de 10 a 28 m<sup>3</sup>/s (Muciño, 2001).



**Figura 17.- Lago Nabor Carrillo, México.**

Los parámetros físicos químicos que fueron medidos de la muestra de agua después de la recuperación de las microalgas fueron: DBO<sub>5</sub>, nitrógeno total, fósforo total, ortofósforos y SST, los cuales dichos valores los podemos observar en la tabla 28.

**Tabla 28.- Parámetros físico químicos del agua antes y después de la recuperación de las microalgas.**

Parámetro	Inicial, mg/L	Desv. Estandar	Final, mg/L	Desv. Estandar
SST	337	32	143	15
DBO <sub>5</sub>	31	5	27	3
Nitrógeno total	17	3	8	0.2
Fósforo Total	11	1	3.6	0.3
Ortofósforos	9.8	1	2.3	0.2

De la tabla anterior, se puede observar que al implementar la ozoflotación como técnica de cosechado de las microalgas del medio acuoso, se tendrá el beneficio de mejorar la calidad de agua para su disposición final a un cuerpo receptor de agua natural, por ejemplo para ríos, y para un uso en riego agrícola como en público urbano. Esto es debido a que para el uso a riego agrícola, se reporta en dicha norma que los SST deberán ser de 150.0 mg/L, DBO<sub>5</sub> de 150.0 mg/L, nitrógeno total de 40 mg/L y fósforo total de 20.0 mg/L. Mientras que para uso público urbano los SST deben ser de 200 mg/, DBO<sub>5</sub> de 200 mg/L, nitrógeno total de 60 mg/L y fósforo total de 30 mg/L.



#### 4.6. Costo del proceso para ozoflotación.

Para la producción de las 1000 toneladas de biodiesel al año a partir de la explotación del consorcio de microalgas, que puede producir 5% de lípidos o más, se consideró un flujo a tratar con ozoflotación de 1.78 m<sup>3</sup>/s. Siguiendo la metodología del libro de Ozone in water treatment: application and engineering de Langlais et al. (1991), y llevando los costos a valor presente, se realizó el siguiente cálculo:

El flujo de agua a tratar fue de 1.78 m<sup>3</sup>/s (6,408.0 m<sup>3</sup>/h), y para la estimación del costo, la dosis de ozono aplicado para el cosechado de las microalgas fue de 28 mg/L, ya que experimentalmente se observó que el 51% del ozono fue lo transferido en la separación de las microalgas. Entonces, para una producción de ozono se estimó un valor 9,474 lb/d (179.4 kg/h). Tomando el valor del 75% de la capacidad de los generadores (Langlais et al., 1991), el valor real de la producción de ozono fue de:

$$Capacidad\ real = \frac{179.4 \frac{kg}{h}}{0.75} = 239.2 \frac{kg}{h} \left( 12,631.0 \frac{lb}{d} \right)$$

Para el costo de la unidad del equipo de ozono, se tomó en cuenta el valor de la capacidad real de producción de ozono (12,631 lb/d) y la gráfica de la figura 18 para extrapolar el valor de la unidad del equipo de ozono.

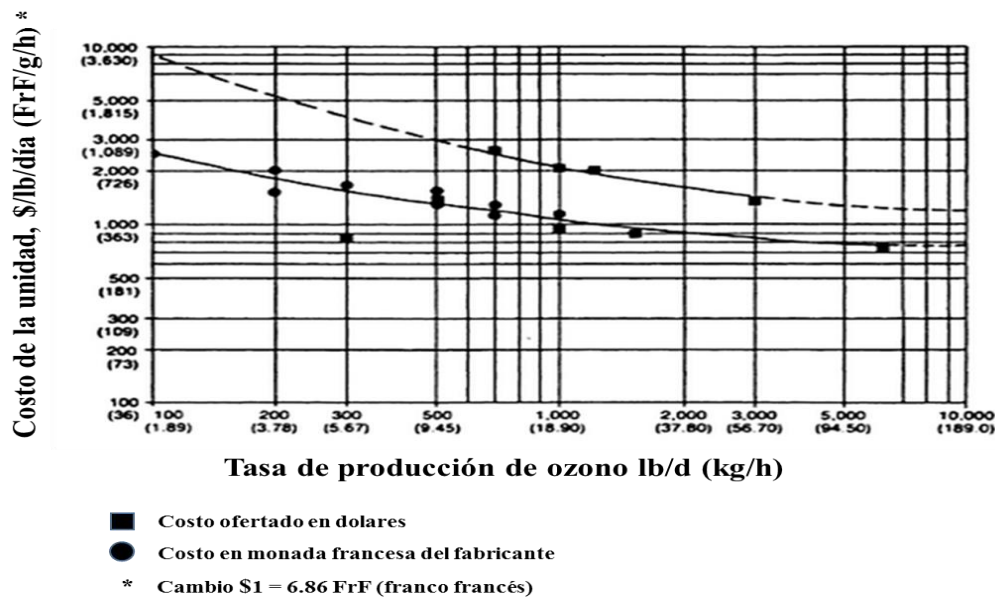


Figura 18.- Costo de unidad de producción de ozono, Fuente: Langlair B., et. Al., 1991.



Como se observa en la figura 18, nuestro valor de la capacidad de producción de ozono de 12,631 lb/d no está dentro de los valores del eje X de dicha gráfica. Aquí se hizo la suposición de que el costo de la unidad de producción fue de 1000 USD/lb/d (valor para 1989). Este valor de costo incluye el precio del equipo de tratamiento de aire, generación de ozono, equipo de destrucción, instrumentación, válvulas, control de sistema, instalación, etc., (Langlais et al., 1991). Por lo tanto, para el precio en dólares cuyos valores son del año 1989 de la gráfica de la figura 18 de Langlais et al. (1991), fue de:

$$\text{Costo de la Unidad de Ozono, 1989} = \left(12,631.0 \frac{\text{lb}}{\text{d}}\right) * \left(1000.0 \frac{\text{USD}}{\frac{\text{lb}}{\text{d}}}\right) = 12,631,000.0 \text{ USD}$$

Se tomó los valores de CEPCI (Chemical Engineering's Plant Cost Index) correspondientes y se obtuvo el valor para el año 2013 del costo de la unidad, el cual fue de:

$$\text{Costo para 2013} = 12,631,000.0 \text{ USD} * \left(\frac{524.5}{328.02}\right) = 20,196,815.7 \text{ USD}$$

Al estimar el precio del contactor se tomó el valor del flujo a tratar y se extrapoló el costo a partir de la gráfica de la figura 19.

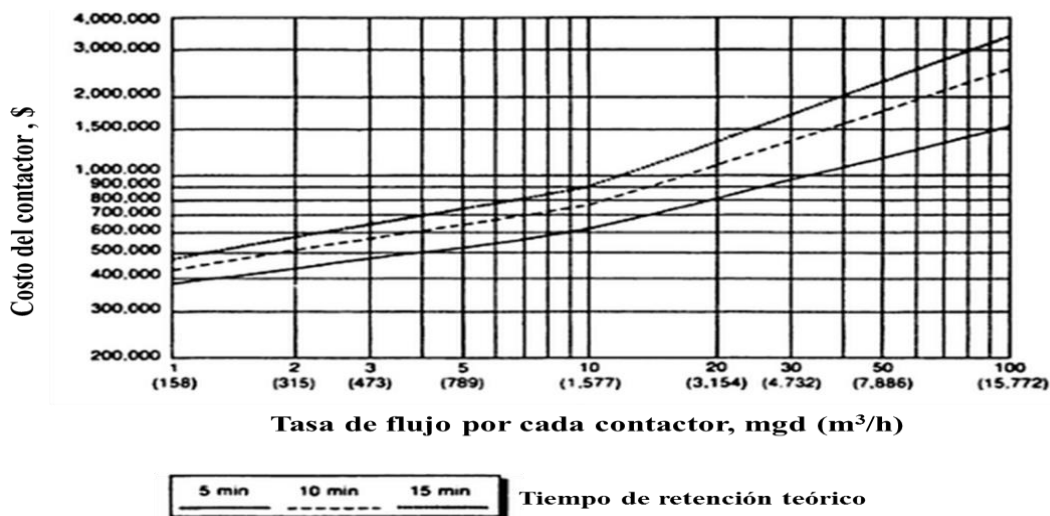
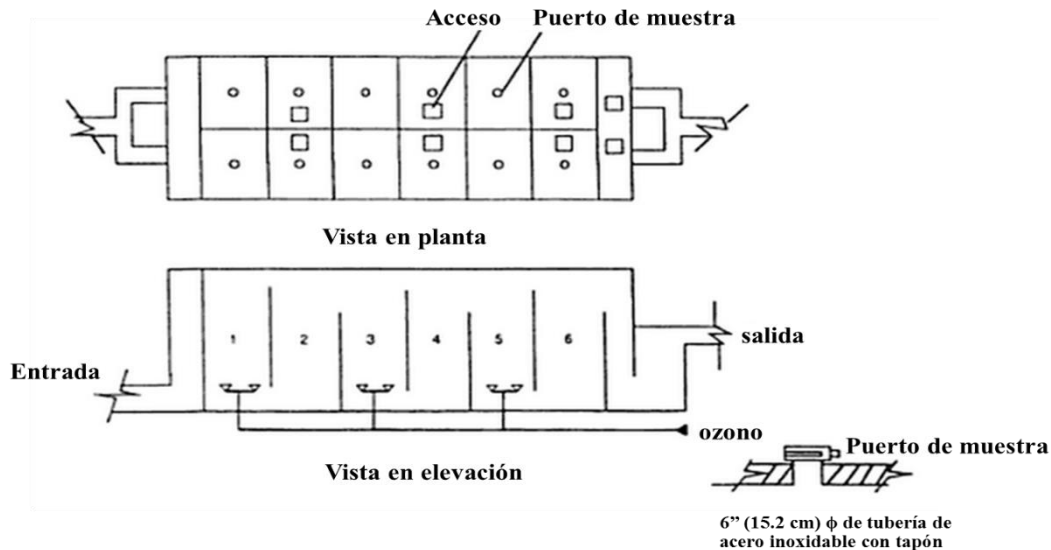


Figura 19.-Gráfica para el costo del contactor, Fuente: Langlais et.al., 1991.

De esta manera, se propuso un valor de 3, 000,000.0 USD para nuestro caso. Se estimó este valor para el año 2013 mediante los valores de los índices CEPCI, y se encontró que el costo del contactor sería de 4,796,963.6 USD para el año 2013.

Este costo es equivalente para dos contactores en paralelo (ver figura 20) que contiene 6 compartimentos y en el precio ya va incluido la estructura de concreto, acero al carbón, etc., según Langlais et al. (1991).



**Figura 20.-Contactores en paralelo. Fuente: Langlais et al., 1991**

Para determinar el costo del área de los contactores, se calculó que se requiere un área de 37,893 ft<sup>2</sup> que es equivalente a 3,520.4 m<sup>2</sup>. De la tesis Mejora de calidad y desinfección con ozono del efluente de un tratamiento primario avanzado para reúso agrícola de Alberto Eduardo Campo Reales Pineda, el precio para 2013 del área es de 159.9 USD/ft<sup>2</sup> (1,720.52 USD/m<sup>2</sup>).

$$3,520.4 \text{ m}^2 * 1,720.52 \frac{\text{USD}}{\text{m}^2} = 6,056,918.6 \text{ USD}.$$

El costo total estimado para este sistema fue de 20,196,815.7 USD +4,796,963.6 USD + 6,056,918.6 USD = 31,050,697.9 USD. Finalmente, se tomó como periodo de recuperación

a 25 años, con una tasa de interés anual del 15% (Langlais et al., 1991) siendo el valor real del costo capital total para el año 2013 de:

$$\text{Costo capital anualizado} = 31,050,697.9 \text{ USD} * \left[ \frac{0.15}{(1 + 0.15)^{25} - 1} + 0.15 \right]$$

Costo Capital Anualizado = 4,799,091.71 USD = 60,420,564.63 MXN para 2013.

Para el costo de operación y mantenimiento (COyM), se evaluó seleccionando un factor energético de 12.0 kWh/lb de producción de ozono (Langlais et al., 1991). En este valor energético ya va considerado el sistema de compresores de aire, refrigeradores y secadores frigoríficos para la generación de ozono a baja presión. La estimación que se hizo de la energía necesaria se muestra a continuación:

$$12.0 \frac{kWh}{lb} * 9,474 \frac{lb}{d} = 113,688.0 \frac{kWh}{d}$$

Como se está tomando en cuenta la producción del gas metano de la digestión de las microalgas después de la extracción de lípidos, se encontró que la energía en kWh/d total que se puede obtener es de 73,352.18 kWh/d. SENER (2011) reportó que la eficiencia para producción de electricidad al servicio público es del 40%. Entonces el verdadero valor de la energía como eléctrica por parte del gas metano fue de 29,341.0 kWh/d. Dicho valor, se le restó a la energía necesaria para la producción de ozono obteniéndose el costo del consumo de electricidad de:

$$113,688.0 \frac{kWh}{d} - 29,341.0 \frac{kWh}{d} = 84,347.0 \text{ kWh/d}$$

Para el cálculo del costo, se tomó el valor que 2.632 MXN/kWh como tarifa 5 de media tensión (Campos Reales Pineda, 2014). El costo de la energía eléctrica consumida fue de:

$$84,342.0 \frac{kWh}{d} * 2.632 \frac{MXN}{Kwh} = 221,988.14 \text{ MXN}/d$$

$$221,988.14 \frac{\$}{d} * 365 d = 81,025,672.56 \frac{MXN}{año}$$

Típicamente el costo de la energía está entre un 60 a 80 % del costo total de operación y mantenimiento y para estos cálculos, se eligió el valor del 75% (Langlais et al., 1991). La etapa de la estimación de “otros”, dentro del costo total de operación y mantenimiento, refiere al del tiempo del operador del sistema, costos de emergencia, etc...y esta se estimó como a continuación se muestra:

$$\left( \frac{81,025,672.56 \frac{MXN}{año}}{0.75} \right) - 81,025,672.56 \frac{MXN}{año} = 27,008,557.5 \frac{MXN}{año}$$

Entonces, el costo total de operación y mantenimiento fue de 108,578,929.8 MXN/año que es igual en dólares a 8,624,220 USD/año. Finalmente, para obtener el valor del tratamiento de la separación de microalgas con ozono, se sumaron los valores del costo de operación y mantenimiento con el costo capital y se dividió entre el caudal a tratar para obtener el precio de ozoflotación por m<sup>3</sup> de agua tratada.

$$60,420,564.6 \frac{MXN}{año} + 108,578,929.8 \frac{MXN}{año} = 168,999,494.4 \frac{MXN}{AÑO}$$

$$\frac{168,999,494.4 \frac{MXN}{año}}{56,134,080.0 \frac{m^3}{año}} = 3.01 \frac{MXN}{m^3}$$

Tomando un valor de 12.95 pesos por dólar, el valor del costo de tratamiento fue de 0.4 USD/m<sup>3</sup>. De manera resumida, se presentan las tablas 29 y 30 donde vienen desglosado dicho cálculo del costo de la ozoflotación para recuperación de microalgas.

**Tabla 29.- Costo Capital para la ozoflotación.**

<b>Planta</b>		<b>Ozoflotación</b>	
<b>Nombre de la planta</b>			
<b>1.- Diseño</b>	<b>Flujo de agua</b>	1.78	m <sup>3</sup> /s
	<b>Dosis de ozono</b>	28	mg/L
	<b>Producción de ozono</b>	9,474	lb/d
	<b>Capacidad de generación instalada</b>	12,631	lb/d
<b>2.- Costo de la unidad de ozonación</b>		1000	USD \$/lb/d
<b>3.- Costo pronosticado del equipo</b>		20,196,815.7	USD \$
<b>4.- Tiempo de retención hidráulico del contactor</b>		35	Min
<b>5.- Costo pronosticado del contactor</b>		4,796,963.6	USD \$
<b>6.- Área de construcción pronosticada</b>		3	ft <sup>2</sup> /lb/d
<b>7.- Área de construcción calculada</b>		37,893	ft <sup>2</sup>
<b>8.-Costo de construcción estimada</b>		159.9	USD \$/ft <sup>2</sup>
<b>9.-Costo de construcción pronosticada</b>		6,056,918.6	USD \$
<b>10.-Costo total del sistema de ozonación</b>		31,050,697.9	USD
<b>11.-Amortización a 25 años de operación **</b>		4,799,091.7	USD
		60,420,564.6	MXN

**Tabla 30.- Costo de operación y mantenimiento (COyM) para ozoflotación.**

<b>1.-Producción de ozono</b>	<b>Flujo de agua</b>	1.78	m <sup>3</sup> /s
	<b>Dosis de ozono</b>	28	mg/L
	<b>Producción de ozono</b>	9474	lb/d
<b>2.-Energía específica requerida por el sistema.</b>		12	kWh/lb
<b>3.-Promedio de energía consumida por día</b>		84,342	kWh/d
<b>4.-Costo estimado de energía</b>		0.21	USD \$/kwh
<b>5.-Costo promedio de energía por día</b>		17,712	USD \$/d
<b>6.-Costo promedio de energía anual</b>		6,468,165	USD \$/año
<b>7.-Porcentaje estimado del costo de solo la energía</b>		75	%
<b>8.-Estimado de "otros" costos de operación y mantenimiento</b>		2,156,055	USD \$/año
<b>9.-Costo total estimado de Operación y Mantenimiento</b>		8,624,220	USD\$/año
		108,578,929.8	MXN

La tabla 31 presenta de manera resumida los costos de capital y de operación y mantenimiento asociados al proceso de ozoflotación como método de cosecha de biomasa de microalga a partir del cultivo en agua residual.

**Tabla 31.-Costo de ozoflotación de microalgas de agua residual.**

RUBRO	
Costo capital, MXN/año	60,420,564.6
Costo capital, MXN/m <sup>3</sup> de cultivo	1.1
Costo OyM, MXN/año	108,578,929.8
Costo OyM, MXN/m <sup>3</sup> de cultivo	1.9
Total, MXN/año	168,999,494.1
Total, MXN/m <sup>3</sup> de cultivo	3.01

El valor del costo total obtenido por metro cúbico de cultivo procesado da un panorama general sobre los requerimientos de inversión para la implementación del proceso de ozoflotación como método de cosechado de biomasa de microalgas. El costo estimado en este trabajo (3.01 MXN/m<sup>3</sup> de cultivo) supera el costo por otros autores. Para métodos de cosechado de cosechado como la coagulación-floculación seguido de centrifugación y centrifugación, respectivamente, cuyos valores se encuentran entre 0.5-1.5 MXN/m<sup>3</sup> de cultivo en agua sintética. (Singh et al., 2010; Ventura et al., 2011; Dassey & Theegala, 2013).

Desde la perspectiva del tratamiento de un agua residual, podemos observar que el precio de la separación de microalgas con ozoflotación está dentro del intervalo de los costos reportados para tratamiento de agua residual en México (tabla 32), con la ventaja que en el primer caso, se considera el aprovechamiento de las microalgas para producción de biocombustibles.

**Tabla 32.-.- Costo unitarios de tratamientos secundario de agua residual en México evaluados para 2013.**

Tipo de tratamiento	Costo MXN/m <sup>3</sup>	Referencia.
Método anaerobio	1.017	(Burns, 2009)
Lodos activados	1.442	(JMAS, 2001)
	2.143	(Burns, 2009)
	2.803	(Chávez Mejía, et al., 2002)
Rango de precios por el agua residual tratada	1.944 a 4.861	(Mendoza Espinosa, 2012)

El proceso de ozoflotación es una alternativa para la separación de las microalgas del medio acuoso, además de presentar el potencial para mejorar la calidad del agua para su disposición final en un cuerpo receptor cumpliendo con la NOM-001. Es importante resaltar que esta técnica de cosechado de microalgas sigue en etapa de investigación para su mejoramiento.

Además, a partir de este estudio se observó que para su implementación en un tren de producción de biodiesel, es necesario disminuir la dosis de ozono aplicado (DOA) para obtener un menor gasto energético en la etapa de cosechado de las microalgas y favorecer el balance energético, así como aumentar el rendimiento de producción de lípidos de las microalgas y su crecimiento para mayores concentraciones de biomasa por metro cúbico de agua. Esto debido a que el aprovechamiento del consorcio de microalgas que crecen en agua residual, presentan variación en cuanto al contenido de lípidos que están en función de las especies presente. Este contenido de lípidos puede variar del 5% -25% dependiendo de las especies de microalgas que crecen en agua residual.

Por otro lado, se observó con el análisis de sensibilidad, que las microalgas al presentar un contenido de lípidos de más del 25% por biomasa seca, el balance energético se ve favorecido, presentando un valor del parámetro NER de 1.18 para producción de biodiesel, y del 1.33 con producción de gas metano a partir de la biomasa residual de la extracción de lípidos, respectivamente.

Asimismo, utilizar agua residual como medio de cultivo para las microalgas presenta ser un camino viable en comparación de los cultivos artificiales que comúnmente son reportados en literatura. Esto se debe a que el primer caso permite el ahorro de insumos de fertilizantes como urea (22 MJ/kg producido) para el abastecimiento de nitrógeno, y fosfato diamónico (DAP, 13.2 MJ/kg producido) para el suministro de fósforo (Zhang, et al., 2013), ya que el agua residual presenta altas cocentraciones de nutrientes que son aprovechables para las microalgas.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.

Se realizó el balance energético de la producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso con un enfoque de ciclo de vida, concluyendo que la viabilidad del proceso depende del contenido de lípidos de las microalgas y de la valoración de la biomasa residual para la producción de gas metano.

Se desarrolló un programa de cálculo para el balance energético, con el cual se puede obtener los valores de proporción energética neta (NER) para diferentes escenarios y cambios de variables en el proceso de producción de biodiesel, permitiendo identificar las etapas de mayor consumo de energía y explorar condiciones de viabilidad del proceso productivo.

Se encontró que las microalgas pueden crecer de manera natural a 354 mg/L durante 14 días de cultivo. Dicho valor de concentración fue utilizado para los escenarios del balance energético propuestos, junto con el valor estimado de 26 g/m<sup>2</sup>\*d como productividad de las microalgas para el caso de la zona de Texcoco, México.

El consumo energético para la ozoflotación estimado a partir de pruebas experimentales y condiciones establecidas en estudios previos fue de 9.7 kWh/m<sup>3</sup> (1068.4 kWh/ton de biomasa de microalgas).

El balance energético del proceso de producción de biodiesel a partir de un consorcio de microalgas, sin tomar en cuenta la valoración de la biomasa residual, resultó negativo para las dos técnicas de cosechado evaluadas de acuerdo a los valores de índice energético obtenidos (Coagulación-floculación, NER: 0.38 y ozoflotación, NER: 0.31); siendo la etapa de cosechado la que más consumo energético presentó en el proceso de producción de biodiesel, representando un 52% y 77% respectivamente de la energía total (104.4 MJ/kg biodiesel y 126 MJ/kg biodiesel). Por lo cual se concluye que bajo tales condiciones de proceso productivo no es viable energéticamente.

Se concluye que la generación de gas metano a partir de la biomasa residual y el uso de biomasa microalgal con mayor contenido lipídico (entre 10-20% w/w), son dos alternativas que inciden positivamente en el balance energético (NER: 0.76-1.17) y por lo tanto en la viabilidad del proceso productivo de biodiesel.



## RECOMENDACIONES.

Se recomienda que para futuros estudios, se realice un balance ecológico que refiere a las emisiones y fijación de dióxido de carbono durante la producción de biodiesel a partir de microalgas de cultivo en agua residual.

Se recomienda la generación de más datos de energías específicas de cada etapa involucrada en la producción de biodiesel, principalmente de la ozoflotación a partir de microalgas cultivadas en agua residual, así como unificar criterios para homologar consideraciones y pasos en la realización de un balance energético de producción de biocombustibles a partir de microalgas.

Se recomienda que las nuevas investigaciones del balance energético de producción de biodiesel sean enfocadas para cultivos de especies de microalgas en agua residual, que contengan por biomasa seca mayor contenido de lípidos, así como alta concentración por metro cúbico de cultivo. Esto debido a que favorecerá el balance energético con respecto a la proporción energética neta (NER).

## BIBLIOGRAFÍA

- Acién F. G., Fernández-Sevilla J. M., Magán J. J., González-Céspedes A., y Molina E., 2012. Evaluación Global de la Producción de Biocombustibles con Microalgas: Establecimiento de Capacidades, Limitaciones y Factores Determinantes de la Viabilidad del Proceso. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal RELBAA*, 3(1): 40-58.
- Amaro H. M., Guedes A. C., and Malcata F. X., 2011. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, 88 (10): 3402-3410.
- Ball Grinding Machine. Alibaba.com. 2011. [http://www.alibaba.com/product-gs/387012885/Hot\\_Sale\\_Ball\\_Grinding\\_Machine\\_of.html](http://www.alibaba.com/product-gs/387012885/Hot_Sale_Ball_Grinding_Machine_of.html) (último acceso: 1 de Octubre de 2013).
- Batan L., Quinn J., Wilson B., and Bradley T., 2010. Net Energy and Greenhouse gas emissions evaluation of biodiesel derived from microalgae. *Environmental Science and Technology*, 44(20): 7975-7980.
- Brennan L., and Owende P., 2010. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2): 557-577.
- Burns, E., 2009. La gestión de ciclos del agua en el valle de México: 2-tratar y reusar las aguas residuales. Universidad Autónoma Metropolitana. México., s.n.
- Calzadiaz Ramírez L., 2012. Análisis de la calidad en un prototipo para la producción de biodiésel a partir de aceites comestibles de desecho. Tesis para obtener título de Química Farmacéutica Bióloga. México D.F. pag: 158.
- Campos Reales Pineda A. E., 2014. Mejora de la calidad y desinfección con ozono del efluente de un tratamiento primario avanzado para reúso agrícola. Tesis que para optar por el grado de Doctor en Ingeniería. México D.F. pag: 148.
- Chávez Mejía, A., Jiménez Cisneras, B. E., Rabell Contreras, M. F. & Silva Castro, V., 2002. Remoción de microorganismos en dos trenes de tratamiento de agua residual doméstica con fines agrícolas. Congreso Internacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México D.F., s.n.
- Chen J.-J., Yeh H.-H., and Tseng I.-C., 2009. Effect of ozone and permanganate on algae coagulation removal-pilot and bench scale tests. *Chemosphere*, 74(6): 840-846.
- Chisti Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances*, 25: 294-306.
- Collet P., Hélias A., Lardon L., Ras M., Goy R.A., and Steyer J.P., 2011. Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*, 102(1): 207-214.

Dismukes G.C., Carrieri D., Bennette N., Ananyev G.M., and Posewitz M.C., 2008. Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based-crops for biofuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(3): 235-240.

Duarte Murillo G., 2010. Balance energético y ecológico de la producción de biodiesel a partir de *Jatropha Curca*. Tesis para obtener título de ingeniero químico. México D.F. pag: 106

Equipment High efficient drying. *Alibaba.com*. 2011. [http://www.alibaba.com/product-gs/407620763/High\\_Efficient\\_Drying\\_Equipment.html](http://www.alibaba.com/product-gs/407620763/High_Efficient_Drying_Equipment.html) (accessed Octubre 2013, 1).

Fangrui Ma., Clements L.D., and Hanna M., 1998. The effects of catalyst, FFAs and water on transesterificación of beef tallow. *Industrial Agricultural Products Center*, 41(5): 1261-1264.

Garibay Hernández A., Vázquez-Duhalt R., del Pilar Sánchez Saavedra M., Serrano Carreón y Martínez Jiménez A., 2009. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13(3): 38-61

Gerpen J.V. 2005. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing*, 86(10): 1097-1107.

Hernández Cruz N., 2012. Cooperación técnica México-Japón. Febrero 15, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/presentacion1.pdf> (accessed Octubre 2, 2013).

Hernández R.E., 2001. El efecto invernadero. Publicación de AIE, Agrupación de Ingenieros Ecologistas, pag: 2-3.

IEA., 2013. Key World Energy STATISCS. [www.iea.org](http://www.iea.org) (accessed Abril 23, 2014).

JMAS, 2001. Actualización del Plan Maestro para el Mejoramiento de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Juárez, Chihuahua: -27Análisis del Saneamiento de Aguas Residuales en las Condiciones Actuales y Futuras., México: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua.

Jorquera O., Kiperstok A., Sales E.A, Embiruçu M., and Ghirardi M. L., 2010. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactor. *Bioresour Technol*, 101(4): 1406-1413.

Knothe G., 2008. Designer biodiesel: Optimizing fatty ester composition to improve fuel properties. *Energy and Fuels*, 22(2): 1358-1364.

Langlais B., Reckhow D. A., and Brink D. R., 1991. Ozone in water treatment; application and engineering. Lewis Publishers inc., American Water Works Association Research Foundation: Compagnie Générale des Eaux, Michigan EEUU.

- Muciño D.,2001. Proyecto Regional Sistemas Integrados de Tratamiento y Usos de Aguas Residuales en América Latina: Realidad y Potencial. Estudio General del Caso Lago de Texcoco. México, pag: 60.
- Mendoza Espinosa, L., 2012. Reutilización de aguas tratadas. Foro Nacional para la Elaboración del Programa Especial de Ciencia y Tecnología en Materia y Agua, Distrito Federa, México.: s.n.
- Peralta- Ruiz Y. Y., Pardo Cárdenas Y., Canchila Romero H. D., y Kafarov V., 2012. Implementación de la metodología de síntesis y análisis de proceso a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel. *Prospectiva*, 10(1): 132-144.
- Rawat I., Kumar R.R., Mutanda T., and Bux F.,2013. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy* 103: 444-467.
- Razon L.F. and Tan R.R., 2011. Net energy analysis of the production of biogas from the microalgae: *Haematococcus Pluvialis* and *Nannochloropsis*. *Applied Energy*, 88(10):3507-3514.
- Sander K. and Murthy G.S., 2010. Life cycle analysis of algae biodiesel. *Int J Life Cycle Assess* 15(7): 704-714.
- Sandoval G.,2010. Biocombustibles avanzados en México, estado actual y perspectivas. Cuadernos temáticos sobre la bioenergía, REMBIO, 2: 1-34.
- Schlagermann P., Göttlicher G., Dillschneider R., Rosellos-Sastre R., and Posten C., 2012. Composition of algal oil and its potential as biofuel. *The Scientific World Journal*, 2012:1-14.
- Seambiotic Ltd., 2006. Algae Pilot Plants Ashekelon. Ultimo acceso: 18 de marzo de 2013: <http://www.seambiotic.com/uploads/Seambiotic%20Ltd.%20%20Algae%20Pilot%20Plant%20white%20paper.pdf>
- Sialve B., Bernet N., and Bernard O.,2009. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, 27(4): 409-416.
- Sigler E., 2013. México frito en biocombustibles. CNN en español: Empresas. Último acceso: 9 de junio del 2014: <http://www.cnnexpansion.com/negocios/2013/09/20/mexico-frito-en-biocombustibles>
- Singh J., and Gu S.,2010. Commercialization potential of microalgae for biofuels production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9): 2569-2610.
- Song D., Fu J., and Shi D.,2008. Exploitation of oil-bearing miroalgae for biodiesel. *Chin. J. Biotech.* 24(3): 341-348.

Sudhakar K., Premalatha M. and Sudharshan K. 2012, Energy balance and exergy analysis of large scale algal biomass production. Academia.edu., último acceso 15 de marzo del 2012: [http://www.academia.edu/2370032/Energy\\_Balance\\_and\\_Exergy\\_analysis\\_of\\_large\\_scale\\_algal\\_biomass\\_production](http://www.academia.edu/2370032/Energy_Balance_and_Exergy_analysis_of_large_scale_algal_biomass_production)

Sudhakar K., Rajesh M., and Premalatha M.,2012. A mathematical model to assess the potential of algal bio-fuels in India. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 34(12): 1114-1120.

Slade R., Bauen A., 2013. Micro-algae for biofuel: Cost, energy, balance, environmental impacts and future prospects. *Biomass and bioenergy*, 53: 29-38.

Valeriano González M.T.,2013. Efecto del ozono en la liberación de proteínas surfactantes y en ácidos grasos, Tesis que para optar por el grado de maestro en ingeniería, México D.F. pag. 67.

Ventura J.-R S., Yang B., Lee Y.-W., Lee K., and Jahng D., 2013. Life cycle analyses of CO<sub>2</sub>, energy and cost for four different routes of microalgal bioenergy conversion. *Bioresource Technology* 137: 302-310.

Wagener K.,1983. Mass cultures of marine algae for energy farming in coastal desert. *Int. J. Biometeor* 27(3): 227-233.

WWF., 2008. Protocolo de kioto: situación actual y perspectivas, último acceso 24 abril del 2014: <http://www.ceida.org/prestige/Documentacion/Protocolo%20Kioto.pdf>

Xu L., Brilman D.W.F., Withag J.A.M., Brem G., and Kersten S.,2011. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuel from microalgae energy balance analysis. *Bioresours Technol* 102(8): 5113-5122.

Yanfen L., Zehao H., and Xiaoqian M.,2012. Energy Analysis and Environmental Impacts of Microalgal biodiesel China. *Energy Policy*, 45: 142-151.

Yang J., Xu M., Zhang X., Hu Q., Sommerfeld M., and Chen Y.,2011. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance. *Bioresource Technology*, 102(1):159-165.

Yáñez Angarita E. E., Silva Lora E.E., da Costa R. E., and Andrade Torres E.,2009. The energy balance in the palm oil derived methyl ester (PME) life cycle for the case in Brazil and Colombia. *Renewable Energy*, 34(12): 2905-2913.

Zhang X., Yan S., Tyagi R. D., and Surampalli R.Y.,2013. Energy balance and greenhouse gas emissions of biodiesel production from oil derived from wastewater and wastewater sludge. *Renewable Energy* 55: 392-403.

## ANEXO

La hoja de cálculo de excel fue utilizado para poder realizar el balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso, con un enfoque de ciclo de vida. Dicha hoja está programada para observar las diferentes cantidades de energía que se tiene que invertir por cada etapa involucrada en el tren propuesto para producción de biodiesel a partir de microalgas.

El programa está conformado por diferentes secciones que corresponden a: Cultivo, Cosecha, Extracción (que refiere a la extracción de lípidos), Transesterificación, Biodigestión, Procesos resumidos, NER y Distribución porcentual como se puede observar en la Figura 21.

	C	D	E	F	G	H	I	
29							Total	
30				MJ/kg bio		7.25		
31								
32								
33	[2]							
34				<b>SISTEMA CON COSECHADO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN</b>				
35			<b>PROCESO CON COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN, BOMBEO DE BIOMASA CONCENTRADA</b>					<b>PROCESO C</b>
36			Energía consumida por sistema paletas, Eléctrica, Kwh/año	3504000.0	Valor en GJ/año	12614.4	Energía con	
37			Energía consumida por sistema de bombeo después de coagulación-floculación, KWh/h	18150.2	Valor en GJ/año	65.3	Energía con	
38			Total, KWh	3522150.2	Valor en GJ/año	12679.7	Total, KWh	
39								
40				MJ/kg bio		6.95		
41								
42								
43			26.37681159					
44			13					
45								
46								
47				<b>SISTEMA CON COSECHADO DE OZOFLOTACIÓN</b>				
48			<b>Cálculos para un área de cultivo establecida</b>					
49			Irradiación solar en México, kwh/ha*año	19345000				
50			Irradiación solar en México, MJ/ha*año	69642000			<b>Cálculos en</b>	
51			Energía captada por las microalgas, MJ/ha*año	1880334			<b>Producción</b>	
52			Cantidad de microalgas, Ton/ha*año	94.02	g/m2*d		<b>Cantidad de</b>	

**Figura 21.-Programa del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas.**

Las celdas que están de color amarillo representan los valores de energía en GJ/año y MJ/kg de biodiesel producido. Cualquier cambio de variable se podrá observar en las celdas de este color.

Es importante mencionar que solo en la pestaña de “Cultivo” se pueden hacer los cambios de variables como: rendimiento de reacción de transesterificación, contenido de lípidos por biomasa seca y concentración de microalgas  $\text{kg/m}^3$ , el cual están señaladas como se pueden observar en la figura 22

1	Área de cultivo, ha	400
2	Irradiación solar en México, $\text{KWh/m}^2\cdot\text{d}$	5.3
3	Eficiencia fotosintética, %	2.7
4	Transesterificación, eficiencia %	97
5	Contenido de lípidos, g lípidos/g biomasa seca	5
6	Contenido energético de las microalgas secas, $\text{MJ/kg}$	20
7	Concentración a 2 semanas de crecimiento de las microalgas, $\text{kg/m}^3$	0.354
8	Tasa de evaporación anual, $\text{mm/año}$	900
9	Tasa de evaporación anual, $\text{cm/año}$	90
10	Densidad del agua, $\text{kg/m}^3$	1000

**Figura 22.-Variables que pueden ser modificadas dentro del balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas.**

La figura anterior, las celdas de color azul, y los dos colores verdes a diferente tono, corresponden a las variables que al modificarlas todas las pestañas arrojaran un valor correspondiente según el consumo de energía por cada actividad involucrada en la etapa del tren de producción de biodiesel.

Existen tres columnas de datos energéticos correspondientes a cada etapa del tren de producción de biodiesel por pestaña. Una columna corresponde cuando se quiere observar el balance energético en función del área de cultivo, de las 1000 toneladas de biodiesel al año y una tonelada de producción. Se hizo de esta manera para demostrar que el balance energético no cambia con respecto a este tipo de variables de producción, arrojando el mismo valor de “productividad energética ( $\text{MJ/kg}$  biodiesel) y valor NER.

Dentro del balance energético no se tomaron en cuenta los insumos de fertilizantes y sus respectivas energías indirectas, ya que este estudio se hizo para producción de microalgas cultivadas en agua residual. Pero lo que se puede apreciar, es que dentro del cálculo del cultivo se arroja un estimado de toneladas de fertilizante UREA y DAP (como suministro de nitrógeno y fósforo respectivamente) necesarios si se quisiera adicionar estas materias primas.

Finalmente, en la pestaña correspondiente al NER se apreciará la situación más favorable para la explotación de microalgas cultivadas en agua residual.