

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ETAPA DE
EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA MICROALGA *Chlorella sp.***

MARTHA ROCIO ROJAS INFANTE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2011

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ETAPA DE
EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA MICROALGA *Chlorella sp.***

MARTHA ROCIO ROJAS INFANTE

Trabajo presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Químico

Director:

Viatcheslav Kafarov

Ingeniero Químico Dr. Sc.

Co-directores:

YENIFFER PARDO CÁRDENAS

Ingeniera Química

YEIMMY YOLIMA PERALTA RUÍZ

Ingeniera Química

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

2011

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Investigación COLCIENCIAS, por el proyecto Desarrollo y validación del modelo de evaluación de producción con metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) de la “cuna a la cuna” con código 1102-452-21247, contrato No 272 de 2008.

Al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía CIDES y al Laboratorio de Biomasa, por permitir los medios necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov, por la oportunidad de trabajar en su grupo de investigación y por su respaldo como líder del proyecto.

A las Ingenieras Yeniffer Pardo y Yeimmy Peralta, por sus valiosas enseñanzas, orientación y apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Ingeniería Química por las enseñanzas impartidas que nos formaron como profesionales.

A Díos.

Por ser mi guía, fortaleza y haberme permitido alcanzar este logro.

A mi madre.

Por estar siempre conmigo, por brindarme todo su amor, su confianza y apoyo incondicional en mi formación personal y profesional.

A Diego Pedroza.

Por su amor, comprensión, paciencia y apoyo durante esta etapa de mi vida.

A mi familia.

Especialmente a mis hermanas por creer en mí y vivir este logro como suyo.

Los Amo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEORICO	16
1.1. Generalidades de las Microalgas.....	16
1.2. Aceite de Microalgas.....	17
1.3. Extracción de Aceite de Microalgas	17
1.3.1. Disrupción Celular	17
1.3.2. Métodos de Extracción de Aceite de Microalgas.....	18
1.4. Evaluación de Impacto Ambiental.....	19
2. DESARROLLO METODOLÓGICO	21
2.1. Metodología Propuesta.....	21
2.1.1. Recopilación de Información Bibliográfica.....	21
2.1.2. Selección de la Especie de Microalga.....	21
2.1.2.1. Descripción de la Especie <i>Chlorella</i> sp.	22
2.1.3. Preselección de Alternativas de Extracción	22
2.1.4. Simulación de Tecnologías de Extracción de Aceite.....	23
2.1.4.1 Definición de los Compuestos Químicos y Paquete Termodinámico .	23
2.1.5. Evaluación de Impactos Ambientales.....	23
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
3.1. Descripción de la Microalga <i>Chlorella</i> sp.	25
3.2. Simulación de las Metodologías de Extracción de Aceite de Microalgas..	26
3.2.1. Método de Extracción con Etanol – Hexano.....	26

3.2.2.	Método de Extracción con Metanol-Cloroformo.....	28
3.2.3.	Método de Extracción In Situ Hexano	29
3.3.	Evaluación de Impactos Ambientales	31
3.3.1.1.	Definición del Objetivo	31
3.3.2.	Alcance del Estudio.....	32
3.3.2.1.	Función del Sistema del Producto.	32
3.3.2.2.	Unidad Funcional.	32
3.3.2.3.	Límites del Sistema.....	32
3.3.2.4.	Límites Geográficos.	33
3.3.2.5.	Límites Temporales.	33
3.3.2.6.	Reglas de Asignación.	33
3.3.2.7.	Tipos de Impacto y Metodología de Evaluación.....	33
3.3.2.8.	Limitaciones.	33
3.3.2.9.	Requisito de los Datos.	34
3.3.3.	Análisis de Inventario	34
3.3.3.1.	Inventario Para la Etapa de Extracción de Aceite	34
3.3.4.	Evaluación de Impactos Ambientales.....	35
3.3.4.1.	Análisis Comparativo de Impactos Ambientales de las Tecnologías de Extracción	35
4.	CONCLUSIONES	40
5.	RECOMENDACIONES	41
6.	BIBLIOGRAFÍA	42
7.	ANEXOS	47

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Metodología.	21
Figura 2. Diagrama Extracción de Aceite de Microalgas Etanol/Hexano.	27
Figura 3. Diagrama Extracción de Aceite de Microalgas Metanol/CHCL ₃	28
Figura 4. Diagrama Extracción de Aceite de Microalgas In Situ Hexano.	30
Figura 5. Límites de la Etapa de Extracción de Aceite de Microalgas.	32
Figura 6. Diagrama de Flujo del Inventario.	34
Figura 7. Comparación de Impactos Ambientales Para los Métodos de Extracción Seleccionados.	36
Figura 8. Comparación de las Cargas Ambientales de las Tres Rutas de Extracción de Aceite.	37
Figura 9. Diagrama Simulación de la Ruta de Extracción In Situ Hexano.	49
Figura 10. Diagrama Simulación de la Ruta de Extracción Etanol/Hexano.	50
Figura 11. Diagrama Simulación de la Ruta de Extracción Metanol/Cloroformo.	51
Figura 12. Red de Inventario de la Ruta de Extracción Metanol/Cloroformo.	52
Figura 13. Red de Inventario de la Ruta de Extracción Etanol/Hexano.	53
Figura 14. Red de Inventario de la Ruta de Extracción In Situ Hexano.	54
Figura 15. Evaluación Impactos Ambientales del Método Etanol/Hexano.	55
Figura 16. Evaluación Impactos Ambientales del Método In Situ Hexano.	56
Figura 17. Evaluación Impactos Ambientales del Método Metanol/Cloroformo. .	57

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Contenido de Aceite de algunas microalgas.	16
Tabla 2. Métodos de Extracción de Aceite de microalgas.	18
Tabla 3. Categorías de Impacto para el método EPD 2007.	20
Tabla 4. Composición de Microalga <i>Chlorella sp.</i>	25
Tabla 5. Flujos de Masa y Consumo Energético del Método Etanol/Hexano.	28
Tabla 6. Flujos de Masa y Consumo Energético del Método Metanol/CHCl ₃	29
Tabla 7. Flujos de Masa y Consumo Energético del Método In Situ Hexano.	30
Tabla 8. Eficiencias de las Tecnologías de Extracción.	31
Tabla 9. Asignación Másica para cada Tecnología Analizada.	35
Tabla 10. Contenido Lipídico y Productividad de Especies de Microalgas.	48
Tabla 11. Comparación de Impactos Ambientales de las Rutas de Extracción. ..	58
Tabla 12. Comparación de Impactos Ambientales de las Rutas de Extracción Restando la Carga Ambiental de la Microalga.	58
Tabla 13. Datos de Impactos Ambientales del Método Metanol/Cloroformo.	59
Tabla 14. Datos de Impactos Ambientales del Método Metanol/Cloroformo Excluyendo Alga seca.	59
Tabla 15. Datos de Impactos Ambientales del Método In Situ Hexano.	60

Tabla 16. Datos de Impactos Ambientales del Método In Situ Hexano Excluyendo Alga seca. 60

Tabla 17. Datos de Impactos Ambientales del Método Etanol/Hexano. 61

Tabla 18. Datos de Impactos Ambientales del Método Etanol/Hexano Excluyendo Alga seca. 61

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A: Evaluación de Impactos.	47
ANEXO B: Contenido de lípidos y productividades de microalgas.	48
ANEXO C: Esquemas de simulación en Aspen Plus® 7. 1 de las rutas de extracción seleccionadas.	49
ANEXO D: Redes de inventario para las rutas de extracción de aceite realizadas en SimaPro 7.1.	52
ANEXO E: Caracterización de impactos ambientales para cada tecnología de extracción por la metodología EPD 2007.	55
ANEXO F: Tablas de resultados de la evaluación de impactos ambientales.	58

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS COMPARATIVO DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LA ETAPA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA MICROALGA *Chlorella sp.*

AUTOR: Martha Rocio Rojas Infante. **

PALABRAS CLAVES: Microalgas, *Chlorella sp.*, lípidos, extracción de aceite, impacto ambiental.

Los altos precios de los combustibles y el aumento de la contaminación ambiental han generado un interés por los biocombustibles. Las microalgas son una alternativa promisoría para la producción de biodiesel, dentro de la cadena de producción de este la etapa de extracción es de suma importancia para la obtención del aceite que es la materia prima fundamental para su producción.

En este estudio se evaluó y se comparó los impactos ambientales potenciales de tres rutas de extracción de aceite de la especie de microalga *Chlorella sp.*, tomando como solvente hexano y las mezclas etanol-hexano y metanol-cloroformo. Se simuló mediante el software Aspen plus® 7.1 cada una de la rutas de extracción de aceite, con el fin de obtener los flujos de masa y energía.

El análisis de impactos ambientales se realizó siguiendo los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044 de 2006. Para este análisis se utilizó el software SimaPro 7.1®. y la metodología EPD 2007. Se evaluaron las siguientes categorías de impacto: calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación, eutrofización y uso de combustibles fósiles. De los resultados obtenidos, la ruta de extracción hexano presenta menor impacto ambiental comparado con las rutas de extracción etanol-hexano y metanol-cloroformo.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Sc, Ph.D. Viatcheslav Kafarov, Codirectores: Ingeniera Química Yeniffer Pardo Cardenas, Ingeniera Química Yeimmy Yolima Peralta Ruiz.

ABSTRACT

TITLE: COMPARATIVE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF OIL EXTRACTION STAGE OF THE MICROALGAE *Chlorella* sp.*

AUTHOR: Martha Rocio Rojas Infante. **

KEY WORDS: Microalgae, *Chlorella* sp, lipids, oil extraction, environmental impact.

High fuel prices and increasing environmental pollution have generated interest in biofuels. Microalgae are a promising alternative for biodiesel production, within the production chain, the extraction stage is very important to obtain the oil that is the main raw material for production.

This study evaluated and compared the potential environmental impacts of three routes of oil extraction on the species of microalgae *Chlorella* sp, using as solvent hexane and ethanol-hexane and methanol-chloroform mixtures. Was simulated each of the routes of oil extraction by Aspen Plus® 7.1 software, in order to obtain the mass and energy flows.

The environmental impact analysis was performed following the guidelines of ISO 14040 and 14044 of 2006. For this analysis, the software SimaPro® 7.1 and methodology EPD 2007. Were assessed the following impact categories: global warming, depletion of the ozone layer, photochemical oxidation, acidification, eutrophication and fossil fuels. From the results obtained, the hexane extraction route has less environmental impact compared to extraction routes ethanol-hexane and methanol-chloroform.

*Undergrade Project

** Physicochemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Dr. Sc, Ph.D. Viatcheslav Kafarov, Co-directors: Chemical Engineer Yeniffer Pardo Cárdenas, Chemical Engineer Yeimmy Yolima Peralta Ruiz.

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental y la disminución de reservas de combustibles fósiles ha generado la necesidad de nuevas fuentes de energía renovables, que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos naturales, con menores efectos negativos sobre el medio ambiente, es así como en la última década se han generado los llamados biocombustibles, entre los cuales se encuentran el biodiesel y bioetanol principalmente.

El Biodiesel es producido especialmente por el aceite proveniente de plantas oleaginosas tales como la soja, girasol, higuera, entre otras; sin embargo el uso de este tipo de biomasa podría generar un desequilibrio en el abastecimiento de alimentos, por lo que en los últimos años ha crecido el interés por el aceite proveniente de las microalgas. Estas pueden contener hasta un 80% de aceite en peso seco [8], lo que las convierte en una materia prima muy atractiva para la producción de este biocarburante.

El proceso de producción de Biodiesel a partir de microalgas comprende básicamente cinco etapas; cultivo, cosecha, secado, extracción de aceite y transesterificación. La etapa de extracción de aceite es una de las fases más importantes de la cadena productiva [23], considerando lo anterior en este trabajo se realizó una evaluación de impacto ambiental para la etapa de extracción de aceite de microalgas utilizando tres métodos basados en tres diferentes solventes: Hexano y las mezclas Metanol – Cloroformo y Etanol – Hexano.

Los procesos de extracción de aceite para cada método fueron simulados en Aspen Plus[®] 7.1, a partir de información reportada en la literatura y condiciones de operación obtenidas en ensayos experimentales en el laboratorio de biomasa de la Universidad Industrial de Santander. Posterior a esto se realizó la evaluación de impactos ambientales utilizando el software Sima Pro[®] 7.1, mediante la metodología EPD 2007, apoyado en las bases de datos Ecoinvent y BUWAL 250.

1. MARCO TEORICO

1.1. Generalidades de las Microalgas

Las microalgas son consideradas como los primeros microorganismos fotosintéticos. Capaces de transformar la luz solar en energía química mediante la fotosíntesis oxigénica y de adsorber dióxido de carbono del aire y nutrientes del agua, acumulando en su interior importante cantidad de aceite y liberando oxígeno a la atmósfera. De la biomasa generada por las microalgas se puede extraer el aceite para fabricar biodiesel [18].

Las microalgas son los organismos más eficientes en la conversión de la energía solar debido a su estructura celular simple. La biomasa está constituida generalmente por 20-30% de lípidos, 40-50% proteínas y una gran variedad de carbohidratos, que en algunas especies pueden llegar hasta el 55% de la biomasa, y otros compuestos de menor importancia [6, 39]. El porcentaje de ácidos grasos varía según la especie. Estos son los ácidos que pueden ser convertidos a biodiesel. En la tabla 1 se muestra el contenido lipídico de algunas especies de microalgas.

Tabla 1. Contenido de Aceite de algunas microalgas.

Microalga	Contenido Aceite (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25 – 75
<i>Chlorella sp.</i>	28 – 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16 – 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25 – 33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris sp.</i>	20 – 35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31 – 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 – 54
<i>Nitzschia sp.</i>	45 - 47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 – 30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50 – 77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15 – 23

Fuente: Chisti et al. 2007.

1.2. Aceite de Microalgas

Las microalgas producen lípidos, hidrocarburos y otros aceites complejos, de los cuales solo algunos son adecuados para la producción de biodiesel [18]. La cantidad total de lípidos, así como la tipología de los ácidos grasos, además de ser específica para cada especie, está ligada a factores ambientales como la intensidad luminosa, salinidad, temperatura, concentración de nitrógeno y nutrientes en el medio de cultivo. Los lípidos de las microalgas son principalmente ésteres de glicerol formados por ácidos grasos saturados e insaturados con cadenas constituidas de 14-20 átomos de carbono [2].

1.3. Extracción de Aceite de Microalgas

La producción de biodiesel a partir de microalgas involucra básicamente las etapas de cultivo, cosecha, secado, extracción de lípidos y transesterificación. La etapa de extracción de aceite implica la disrupción celular, la extracción del aceite de la biomasa y la purificación del mismo.

1.3.1. Disrupción Celular

Los microorganismos están compuestos de una pared celular que rodea el protoplasma y el citoplasma. El citoplasma está compuesto de una gran proporción de productos tales como lípidos, proteínas, carbohidratos, entre otros. Con el fin de aislar y extraer estas sustancias del interior de la célula es necesario romper la pared celular y la membrana protoplasmática, este rompimiento se conoce como disrupción celular [14,9].

En la extracción de aceite para facilitar el contacto entre el solvente y los compuestos dentro de la microalga se han propuesto diversos métodos entre los que se encuentran lisis enzimática, shock osmótico, hidrólisis, organosolv, entre otros [38]. En recientes estudios se ha determinado que el uso de hidrólisis ácida utilizando una solución de HCL 0.5 M como pretratamiento en la extracción de aceite de microalgas genera un aumento en la eficiencia del proceso [21].

1.3.2. Métodos de Extracción de Aceite de Microalgas

En la tabla 2 se presenta una breve descripción de los métodos utilizados para la extracción de aceite de microalgas a nivel laboratorio.

Tabla 2. Métodos de Extracción de Aceite de microalgas

MÉTODO DE EXTRACCIÓN	DESCRIPCIÓN
Extracción Con Solventes Químicos	Este método ha sido utilizado tradicionalmente para obtener lípidos en algas, el solvente es adicionado a la biomasa seca, posteriormente se realiza la separación de la biomasa y la purificación del aceite. Una gran variedad de solventes orgánicos suelen ser utilizados, siendo los más populares el hexano y el etanol, mediante una mezcla hexano-etanol, con la cual es posible extraer hasta el 98% de los lípidos presentes en la biomasa [38].
Bligh & Dyer	Este método consiste en la homogenización a alta velocidad de la biomasa con una mezcla de los solventes metanol/cloroformo, luego se agrega agua para formar una fase hidroalcohólica. Después se realiza una filtración y centrifugación de la cual quedan separadas las fases metanol-agua y cloroformo-lípidos, se realiza una evaporación de cloroformo y se obtiene el aceite extraído [5].
Extracción Asistida por Microondas	La extracción asistida por microondas aprovecha la polaridad de las moléculas que componen la estructura de la microalga como los lípidos y las proteínas para crear fricción y por consiguiente calor, lo cual hace que el agua contenida en la célula escape debilitando la pared celular [16].
Extracción In Situ	Este método consiste principalmente en dos etapas, en la primera etapa se realiza una mezcla solvente-biomasa, en la cual se distinguen dos fases la fase de extracto lipídico crudo y la fase de biomasa residual. La segunda etapa consiste en la recuperación del extracto lipídico y su posterior purificación. Se han evaluado los solventes hexano y ciclohexano para la extracción de aceite de microalgas [22].
Extracción con Fluidos Supercríticos	Esta técnica hace uso de un solvente, generalmente CO ₂ , a condiciones de presión y temperatura superiores a las condiciones críticas, lo cual confiere al compuesto propiedades de gas y líquido, que aumenta la selectividad y permite una penetración más fácil y rápida en los sólidos, facilitando la extracción [26, 11].
Extracción Enzimática	En la extracción enzimática se degrada la pared celular de las microalgas mediante el empleo de enzimas, esto facilita la salida de los aceites presentes en la célula. Pero, la actividad enzimática es susceptible a muchas variables [43].
Destrucción Mecánica	Esta técnica consiste en un dispositivo de prensado, generalmente una prensa hidráulica con la cual se destruye la pared celular y libera los lípidos. Generalmente esta técnica se complementa con la aplicación de solvente para aumentar la eficiencia [27].

Fuente: González. D. A, et al. 2009.

1.4. Evaluación de Impacto Ambiental

Los impactos ambientales son alteraciones al entorno en donde se desarrolla determinada actividad humana y su naturaleza es muy variada e incluye la contaminación del aire, agua, suelo, pérdida de biodiversidad, degradación del medio físico, entre otros [10]. Estos impactos se producen por los insumos que se utilizan, por el espacio que se ocupa y por los efluentes que se emiten [19].

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) es una herramienta de análisis para el control ambiental preventivo de los procesos, en el que se identifican los impactos, la posibilidad de corregirlos y se describen las posibles consecuencias ambientales de un proceso, que pueden afectar seriamente al medio natural o humano [19]. La EIA se puede realizar siguiendo los lineamientos de la Norma ISO 14040 e ISO 14044 de 2006, en las cuales se pautan las características del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV trata los impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización y disposición final del producto [24.25].

Los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044 el ACV está compuesto de cuatro fases, la definición del objetivo y el alcance, el análisis de inventario, evaluación del impacto ambiental y la fase de interpretación de resultados [24]. En la actualidad se cuenta con diferentes herramientas para desarrollar estudios de ACV de una amplia gama de procesos, actividades o servicios. Una de estas es Sima Pro, este software ofrece una interfaz basada en la norma ISO 14040. Esta aplicación presenta los cálculos de evaluación de impactos ambientales potenciales para cada etapa del sistema estudiado, además permite realizar análisis comparativos de distintos escenarios. Sima Pro® 7.1 incorpora un amplio conjunto de métodos de evaluación de impactos como lo son: Diseño Ambiental de Productos Industriales 97 y 2003 (por sus siglas en ingles EDIP), Declaraciones Ambientales de Producto 2007 (por sus siglas en ingles EPD), Eco indicador 95 y

99, entre otros. También contiene bibliotecas de datos con un total de 6.000 procesos distintos. Las principales son: Ecoinvent, BUWAL 250, ETH-ESU, Industry data, Idemat y Franklin [4].

El método EPD 2007 es un enfoque documentado de punto medio, que cuantifica datos ambientales para un producto basado en los parámetros de la norma ISO 14040 [42] y enfocado a proporcionar información relevante para la comparación equitativa de productos y servicios basados en sus rendimientos ambientales. Esta metodología representa 6 categorías diferentes de impacto (ver Tabla 3) [35].

Tabla 3. Categorías de Impacto para el método EPD 2007.

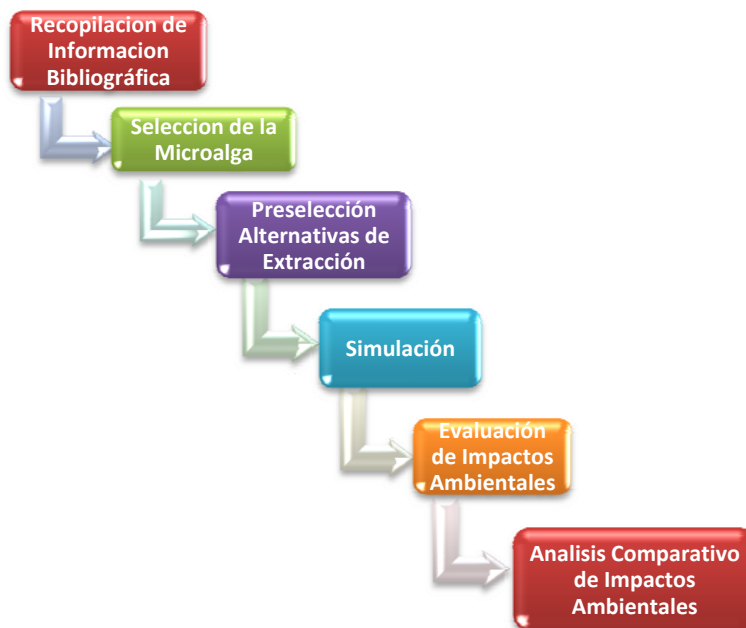
CATEGORIAS DE IMPACTO	
Nombre	Descripción
Calentamiento Global (GWP 100)	Representa la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos con su respectivo potencial de calentamiento global (CO ₂ equivalente). Dado que estos gases tienen diferente duración en la atmósfera se calcula para un horizonte de 100 años.
Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP)	Se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono, causada por compuestos como los halones y los clorofluorocarbonados (CFC).
Acidificación	Hace referencia a la lluvia ácida, los principales contaminantes son SO ₂ , NO _x , HCL y NH ₃ . La característica común es la formación de iones H ⁺ , por lo que el impacto se mide en H ⁺ equivalentes.
Oxidación Fotoquímica	Son contaminantes formados por NO _x e hidrocarburos en presencia de luz solar. Causan problemas de salud como irritación en el sistema respiratorio y daños a la vegetación.
Eutrofización	El término incluye los impactos debido a los excesivos niveles de macronutrientes en el medio ambiente causado por las emisiones de nutrientes al aire, agua y suelo. El potencial de eutrofización se expresa a menudo como PO ₄ ³⁻ equivalentes.
No Renovables, Fósiles (Uso)	Esta categoría hace referencia al consumo de combustibles fósiles.

Fuente: Librería de Métodos SimaPro 7.1.

2. DESARROLLO METODOLÓGICO

2.1. Metodología Propuesta

Figura 1. Metodología.



Fuente: Autor.

2.1.1. Recopilación de Información Bibliográfica

Se realizó una búsqueda exhaustiva de información en libros, tesis y artículos sobre las especies de microalgas y sus características principales. Así mismo se investigaron los métodos de extracción de aceite de diferentes materias primas y la posibilidad de aplicarlos en la extracción de aceite de microalgas.

2.1.2. Selección de la Especie de Microalga

Existe una gran cantidad de especies de microalgas y poca información detallada sobre la gran mayoría de ellas, por tal motivo se realizó una depuración de la información disponible en la literatura para las especies teniendo en cuenta factores importantes como: porcentaje de contenido de aceite, productividad de la especie, costo del cultivo, impacto ambiental y disponibilidad de información sobre la caracterización fisicoquímica de la especie y el perfil de ácidos grasos.

La cantidad media de lípidos en las microalgas varía entre 1% y 70% [8,28]. El contenido de aceite de microalgas puede alcanzar un 75% en *Botryococcus braunii*, sin embargo se asocia a una baja productividad [31]. Las microalgas más comunes tales como la *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nitzschia*, *Nannochloropsis* y *Phaeodactylum* poseen niveles de aceite entre 20% y 50% con productividades relativamente altas; la especie *Chlorella* se manifiesta en particular como una buena opción para la producción de biodiesel [3]. Teniendo en cuenta lo anterior, el contenido de aceite y la disponibilidad de información en cuanto a la caracterización fisicoquímica de la microalga se tomó para el estudio la especie ***Chlorella sp.***, ya que presenta un contenido de aceite que varía entre un 28% y 37% [30] además de reportar una productividad de 42% (Ver Anexo B).

2.1.2.1. Descripción de la Especie *Chlorella sp.*

La *Chlorella sp.* es un alga verde unicelular, esférica, con diámetro de 2-10 μm que se puede producir en agua dulce o marina. Las células están rodeadas de una pared delgada de celulosa, que contienen un núcleo que cuando se seca es aproximadamente 30% lípidos, 45% proteínas y 20% carbohidratos [36, 7, 34].

2.1.3. Preselección de Alternativas de Extracción

La preselección de las alternativas de extracción de aceite de microalgas se realizó considerando los siguientes factores: económico, impacto ambiental, flexibilidad, controlabilidad, viabilidad, consumo energético, reproducibilidad, eficiencia y disponibilidad de condiciones de operación.

Existe gran variedad de métodos para la extracción de aceite de diferentes materias primas, sin embargo para las microalgas aún no se han desarrollado tecnologías de extracción a nivel industrial y no se reportan datos de condiciones de operación o equipos utilizados para el proceso. Se tomaron las condiciones óptimas de operación y relaciones biomasa-solvente arrojadas por el trabajo realizado en el Laboratorio de Biomasa de la Universidad Industrial de Santander para las rutas de extracción con solvente [20, 21, 22]. De acuerdo con lo anterior

los métodos seleccionados para el análisis fueron: Etanol-Hexano, Metanol-Cloroformo e In Situ Hexano.

2.1.4. Simulación de Tecnologías de Extracción de Aceite

Cada una de las tecnologías seleccionadas para la etapa de extracción de aceite se simularon en el Software Aspen Plus® 7.1. El balance de masa y energía para cada ruta de extracción se determinó por medio de las simulaciones realizadas.

2.1.4.1 Definición de los Compuestos Químicos y Paquete Termodinámico

La microalga se compone por ácidos grasos, triglicéridos, carbohidratos y proteínas. La mayoría de estos compuestos se encontraron en la librería de Aspen Plus® 7.1. Aquellos que no, se caracterizaron y representaron como compuestos hipotéticos, para esto se dibujó la estructura de cada compuesto en el software Symyx Draw 3.2 y con ella se determinó las propiedades termodinámicas en Aspen plus ® 7.1. El modelo termodinámico se seleccionó teniendo en cuenta que representara las mezclas de componentes polares y no polares.

2.1.5. Evaluación de Impactos Ambientales

La evaluación de impactos ambientales potenciales de cada una de las tecnologías de extracción de aceite de microalgas se realizó siguiendo los lineamientos de las normas ISO 14040 y 14044 de 2006, para tal fin se definió los objetivos, el alcance del estudio y el análisis de inventario para cada ruta de extracción, luego se realizó la evaluación de impactos ambientales potenciales y el análisis correspondiente.

El alcance del estudio incluye ítems como la unidad funcional, los límites del sistema, límites geográficos y límites temporales, también se incluyó la definición de la asignación másica, las limitaciones y la selección de la metodología de evaluación de impactos ambientales potenciales (Ver Anexo A).

La evaluación de impactos ambientales se realizó utilizando el software SimaPro 7.1, el cual contiene una amplia base de datos de procesos industriales para diferentes materias primas, tales como Ecoinvent, BUWAL 250, ETH-ESU, Idemat, Industry data, entre otros. Para el desarrollo del estudio se utilizó las bibliotecas Ecoinvent y BUWAL 250, estas bases de datos se seleccionaron debido a su amplia gama de procesos unitarios con gran documentación justificada [4]. Esta herramienta también cuenta con diversos métodos de evaluación de impactos entre los que se destacan; EPD 2007, EDIP '97 y 2003, Eco-indicador '95 y '99, TRACI, IMPACT 2002. Para la evaluación de impactos ambientales potenciales se seleccionó la metodología EPD debido a que es un método de punto medio que permite la comparación equitativa de procesos basados en sus rendimientos ambientales.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Descripción de la Microalga *Chlorella sp.*

Para el desarrollo de las simulaciones se realizó una normalización de la composición de la especie *Chlorella sp.*, de acuerdo con los datos reportados en la literatura.

Para dicha normalización se tomó un porcentaje de aceite de 30% [8]; del cual un 5.11% corresponde a ácidos grasos y un 94.89% corresponde a triglicéridos [13]. Cuando se realizó la normalización los ácidos grasos correspondieron a un 1.53% de los lípidos contenidos en la microalga y los triglicéridos a un 28.43%. Debido a que no se tiene un perfil de triglicéridos establecidos para la especie, pero se conocen los ácidos grasos presentes y su porcentaje [33], se decidió tomar los triglicéridos como homogéneos suponiendo una misma distribución porcentual de triglicéridos y ácidos grasos. Se tomó un porcentaje de proteínas de 40% [36,34]; debido a que la especie presenta diversos aminoácidos en su estructura se tomó solo los que presentan mayor proporción [17]. Para los carbohidratos la literatura reporta un porcentaje aproximado de 25%, se incluyeron glúcidos tales como lignina, celulosa y hemicelulosa [41]. Por último el porcentaje de humedad fue considerado como el 5% [34]. La tabla 4 muestra la composición porcentual en peso para la microalga.

Tabla 4. Composición de Microalga *Chlorella sp.*

Ácidos Grasos	(%)	Triglicéridos	(%)	Aminoácidos	(%)	Carbohidratos	(%)
C14:00	0.14	TAG-C14:00	2.56	Acido Aspártico	4.49	Celulosa	7.1
C16:00	0.38	TAG-C16:00	7.15	Acido Glutámico	5.47	Lignina	1.52
C16:01	0.03	TAG-C16:01	0.57	Glicina	4.35	Hemicelulosa	16.3
C16:02	0.15	TAG-C16:02	2.85	Alanina	5.40		
C16:03	0.14	TAG-C16:03	2.56	Valina	3.86		
C18:00	0.01	TAG-C18:00	0.26	Leucina	4.28		
C18:01	0.08	TAG-C18:01	1.42	Prolina	5.05		
C18:02	0.31	TAG-C18:02	5.69	Lisina	7.15		
C18:03	0.29	TAG-C18:03	5.41				

Fuente: Petkov (2007), Fowden (1951) y Ververis (2007).

3.2. Simulación de las Metodologías de Extracción de Aceite de Microalgas

Los métodos de extracción de aceite seleccionados fueron los métodos de extracción con solvente utilizando hexano y las mezclas Etanol/Hexano, Metanol/Cloroformo. Las simulaciones se llevaron a cabo en el software Aspen Plus® 7.1. El modelo termodinámico utilizado para simular las tres rutas tecnológicas de extracción de aceite fue NRTL (*Non-Random two liquids*) debido a que este modelo representa muy bien las mezclas de componentes polares y no polares, así como también una fuerte no idealidad en la simulación. Los coeficientes de interacción binaria no disponibles en la librería del software fueron estimados con el método UNIFAC (*Universal Functional Group Activity Coefficient*).

Las tecnologías de extracción fueron simuladas teniendo en cuenta la metodología y las condiciones de operación reportadas por el Laboratorio de Biomasa de la Universidad Industrial de Santander. Sin embargo para aumentar la eficiencia y disminuir la carga ambiental en las simulaciones se decidió hacer reciclo de los solventes utilizados. Las especificaciones utilizadas se describen a continuación.

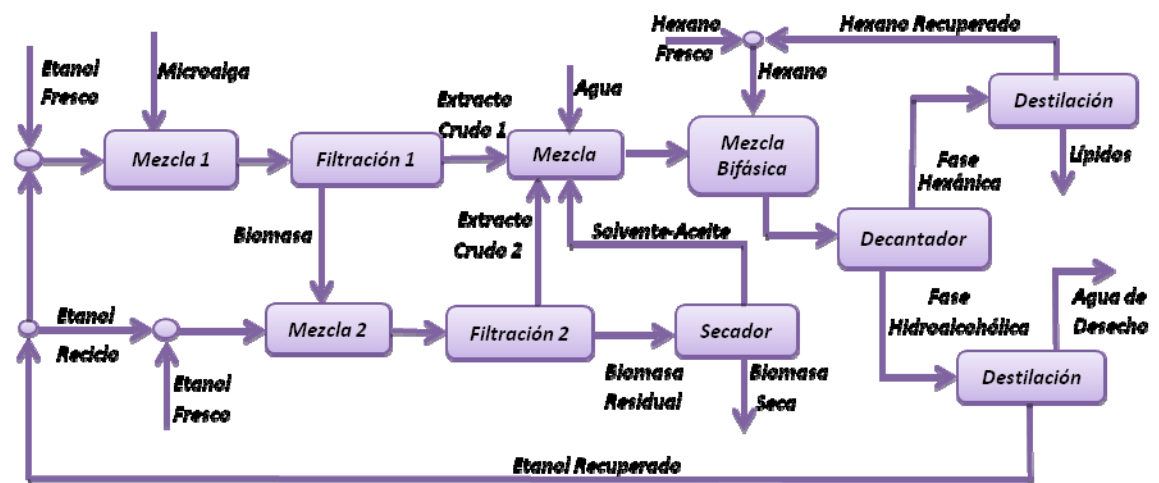
3.2.1. Método de Extracción con Etanol – Hexano

En el proceso para la ruta de extracción con solvente Etanol – hexano (Figura 2), primero el aceite crudo fue extraído de la biomasa y se mezcló con el etanol en una relación másica 4:1 a condiciones ambientales (1 atm de presión y 25°C). La mezcla obtenida pasó a un proceso de filtración (hidrociclón) en el cual se separaron los sólidos de los líquidos y la biomasa residual se sometió de nuevo al proceso para aumentar la eficiencia. La purificación de los lípidos se realizó por la formación de un sistema bifásico generado por la creación de una solución hidroalcohólica 40% de agua (v/v) y la adición de hexano con una relación de 1:1 con respecto a la solución hidroalcohólica [21, 20, 37].

Seguidamente el sistema bifásico pasó a un decantador donde la fase hexánica rica en lípidos es sometida a un proceso de destilación para obtener una corriente

de lípidos (producto) al 99.9% y una de hexano que es recirculada. Por otra parte la fase hidroalcohólica pasó a un proceso de separación donde se recuperó parte del etanol (92%) y se generó una corriente de agua como desecho (Ver Anexo C). Según lo reportado por Ramírez Fajardo y Colaboradores con este método es posible obtener hasta 98% de la extracción cuantitativa de los lípidos purificados [38,14].

Figura 2. Diagrama Extracción de Aceite de Microalgas Etanol/Hexano.



Fuente: Autor.

Por otra parte para la biomasa residual se sometió a una etapa de secado donde se recuperó el solvente y aceite contenido en ella, con el fin de aumentar la eficiencia del proceso y disminuir los impactos ambientales potenciales, además de hacer posible la utilización de esta biomasa en un proceso posterior.

Después de realizar la simulación y obtener el flujo de biomasa necesaria para la extracción de 12200 kg/h de aceite de microalgas para producir 100000 ton/año de biodiesel se determinó los servicios industriales necesarios para este proceso. En la tabla 5 se presentan los flujos de masa y requerimientos energéticos utilizados en la evaluación de impactos ambientales.

Tabla 5. Flujos de Masa y Consumo Energético del Método Etanol/Hexano.

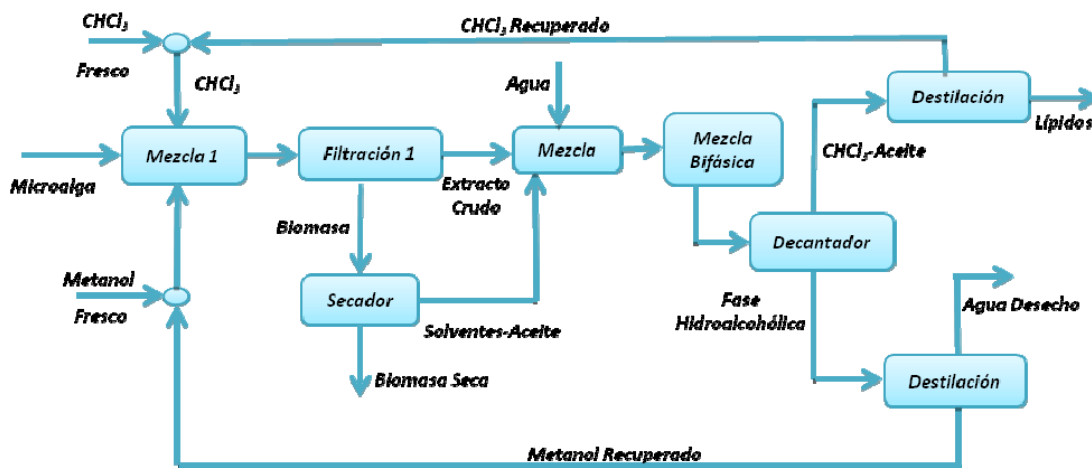
Flujos Másicos de Entrada		Flujos Másicos de salida		Consumo Energético	
Sustancia	Kg/h	Sustancia	Kg/h	Equipo	KW
Biomasa	36768	Lípidos	12212.48	Hidrociclón - 1	14.3
Hexano	16	Biomasa Seca	23884.49	Hidrociclón - 2	6.3
Etanol	74000	Agua Desecho	387935	Bomba - 1	8,2
Agua Proceso	313250			Filtro	0.5
Agua Enfriamiento	6980000			Total	29.3
Vapor de Agua	500000				

Fuente: Autor.

3.2.2. Método de Extracción con Metanol-Cloroformo

En esta ruta de extracción se creó una mezcla Metanol – Cloroformo – Biomasa a condiciones ambientales (1 atm y 25°C) con una relación másica 6:12:1 [21, 20,22], luego se sometió esta mezcla a un proceso de filtración en un hidrociclón, de allí se obtuvo una corriente líquida rica en solventes y lípidos, y, una corriente de biomasa residual. El flujo líquido se mezcló con agua en una proporción 4:1 agua/biomasa, para crear una mezcla bifásica y así mejorar la eficiencia de la extracción.

Figura 3. Diagrama Extracción de Aceite de Microalgas Metanol/CHCl₃.



Fuente: Autor.

Para la purificación del aceite cada fase se sometió a un proceso de separación por medio de destilación para recuperar los solventes en el tope de las torres (Cloroformo (99.9%) y Metanol (97.4%)), y en los fondos de las torres se obtienen lípidos (99.9%) (DESTL-1) y agua de desecho (DESTL-2) (Ver Anexo C). La corriente de sólidos se evaporó para recuperar el solvente y aceite contenido en la biomasa residual, y con ello aumentar la eficiencia de extracción y hacer posible la utilización de la biomasa.

En la Tabla 6 se presentan los principales flujos de materia y energía obtenidos de la simulación realizada en el software Aspen Plus® 7.1.

Tabla 6. Flujos de Masa y Consumo Energético del Método Metanol/CHCl₃.

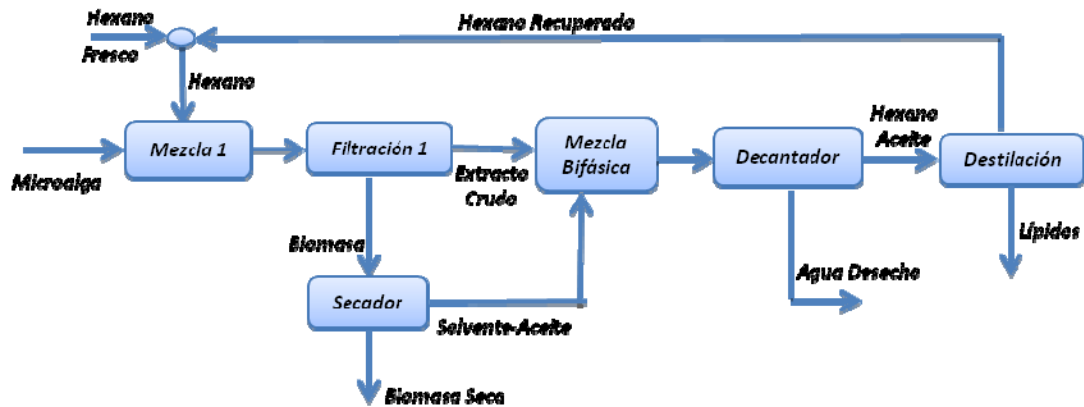
Flujos Másicos de Entrada		Flujos Másicos de salida		Consumo Energético	
Sustancia	Kg/h	Sustancia	Kg/h	Equipo	KW/h
Biomasa	37052	Lípidos	12212.82	Hidrociclón	53.4
Cloroformo	13	Biomasa Seca	24068.98	Bomba – 1	13.1
Metanol	50791	Agua Desecho	196089	Filtro	0.5
Agua Proceso	144516			Total	67
Agua Enfriamiento	6050000				
Vapor de Agua	880000				

Fuente: Autor.

3.2.3. Método de Extracción In Situ Hexano

En este método se mezcló la microalga con hexano en una relación másica 33:1, a condiciones ambientales (25°C y 1 atm), luego esta mezcla se sometió a una separación por medio de un hidrociclón donde por la parte superior del equipo sale una corriente rica en aceite y solvente, y por la inferior la biomasa residual.

Figura 4. Diagrama Extracción de Aceite de Microalgas In Situ Hexano.



Fuente: Autor.

La corriente rica en aceite fue sometida a un etapa de separación donde se pasó primero por un decantador para retirar el agua contenida en la microalga, posteriormente la mezcla hexano-aceite, ingresó a una torre de destilación (DESTL-1) en donde por el tope, se recuperó el hexano (99.9%) que es recirculado al proceso, y por los fondos se obtuvo el aceite (99.9%) como producto [22]. Por otro lado la biomasa residual pasó por un secador donde se retiró el solvente y el aceite remanente y luego se ingresó nuevamente al sistema para aumentar la eficiencia del proceso (Ver Anexo C).

Los principales flujos de masa y requerimientos energéticos calculados por la simulación del proceso In Situ Hexano, se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Flujos de Masa y Consumo Energético del Método In Situ Hexano.

Flujos Másicos de Entrada		Flujos Másicos de salida		Consumo Energético	
Sustancia	Kg/h	Sustancia	Kg/h	Equipo	KW/h
Biomasa	36669	Lípidos	12237.35	Hidrociclón	148.5
Hexano	36	Biomasa Seca	23820	Bomba – 2	21.366
Agua Enfriamiento	6760000	Agua Desecho	648.25	Filtro	0.5
Vapor Calentamiento	1050000			Total	170.366

Fuente: Autor.

La eficiencia lipídica de los métodos de extracción se calculó con la cantidad total de aceite contenido en la microalga y la cantidad de aceite extraído. En la tabla 8 se muestra una comparación de las eficiencias de cada las tres tecnologías de extracción de aceite de microalgas.

Tabla 8. Eficiencias de las Tecnologías de Extracción.

Eficiencia	In Situ Hexano	Etanol-Hexano	Metanol-Cloroformo
	99.9%	99.7%	98.9%

Fuente: Autor.

3.3. Evaluación de Impactos Ambientales

3.3.1.1. Definición del Objetivo

El fin de este estudio fue evaluar, cuantificar y comparar los impactos ambientales potenciales de la etapa de extracción de aceite para la cadena de un proceso hipotético de producción de biodiesel a partir de microalgas. Se analizó tres rutas de extracción de aceite simuladas en el software Aspen Plus® 7.1 usando las mezclas de solventes Etanol-Hexano, Metanol-Cloroformo e In Situ Hexano, con el objetivo de seleccionar la metodología más prometedora con respecto a la amigabilidad con el medio ambiente, teniendo en cuenta el proceso unitario de extracción y purificación del aceite para la producción de biodiesel. También se buscó contribuir con los estudios que se realizan actualmente en la universidad industrial de Santander como parte del desarrollo de una tesis de maestría, y permitir la publicación de la información por medio del presente escrito.

3.3.2. Alcance del Estudio

3.3.2.1. Función del Sistema del Producto.

El sistema estudiado comprende la etapa de extracción de aceite de la microalga *Chlorella sp.*. Las tecnologías de extracción analizadas y comparadas fueron las siguientes: Etanol-Hexano, Metanol-Cloroformo e In Situ Hexano. El extracto lipídico obtenido en el proceso es requerido como materia prima para la producción de biodiesel.

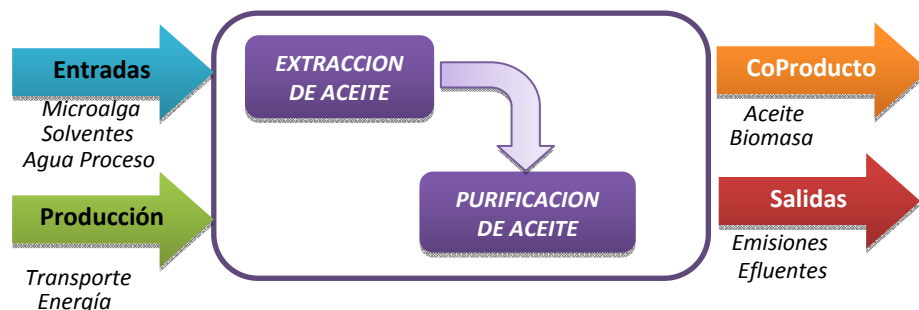
3.3.2.2. Unidad Funcional.

La unidad funcional es una medida de referencia para las entradas y salidas de un proceso. Se utilizó como unidad funcional 12200 kg/h de aceite de microalgas.

3.3.2.3. Límites del Sistema.

Se analizó los diferentes métodos de extracción de aceite considerando los impactos ambientales producidos desde que entra la microalga con los solventes al proceso de extracción, hasta la purificación del aceite. En la etapa se consideró el consumo de energía, las emisiones generadas por el transporte de los solventes hasta la planta de extracción y el tratamiento del agua de desecho. Por otra parte ni la construcción ni el mantenimiento de la planta fue tomada en consideración. Del mismo modo, los factores económicos y sociales no fueron incluidos.

Figura 5. Límites de la Etapa de Extracción de Aceite de Microalgas.



Fuente: Autor.

3.3.2.4. Límites Geográficos.

El estudio se limitó al análisis de la etapa de extracción de aceite de microalgas para la producción de biodiesel en Colombia. Debido a que la cadena de proceso se refiere a un sistema hipotético, la planta de extracción de aceite se ubicó en Barranquilla, por la factibilidad de cultivar las microalgas en el mar y con ello evitar comprometer el agua dulce. Se consideró el transporte de los solventes desde el puerto de Cartagena hasta la planta extractora.

3.3.2.5. Límites Temporales.

El límite temporal del estudio fue de 100 años, ya que este es el tiempo considerado en la metodología de evaluación de impactos EPD 2007

3.3.2.6. Reglas de Asignación.

Las reglas de asignación se utilizan cuando en un proceso resultan varios productos (co-productos). Se aplicó la asignación másica, esta se basa en la fracciones presentes de cada co-producto en el flujo total de salida del sistema.

3.3.2.7. Tipos de Impacto y Metodología de Evaluación.

La evaluación de impactos ambientales se realizó haciendo uso del software Sima Pro 7.1, el cual cuenta con diversas metodologías para dicha evaluación, se tomó la metodología de punto medio EPD 2007, este método brinda la información relevante para comparar los métodos de extracción en estudio. Cuenta con seis categorías de impacto: Calentamiento Global (GWP 100), Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP), Acidificación, Oxidación Fotoquímica, Eutrofización, No Renovables, Fósiles (Uso).

3.3.2.8. Limitaciones.

En Colombia la falta de información con respecto a los procesos de fabricación de las materias primas y las emisiones que estos generan al medio ambiente es el principal inconveniente. Se tomó los datos reportados en Sima Pro® 7.1, con el

objeto de hacer una primera aproximación a partir de información correspondiente a otros países con normativas y controles estrictos (como la Unión Europea).

3.3.2.9. Requisito de los Datos.

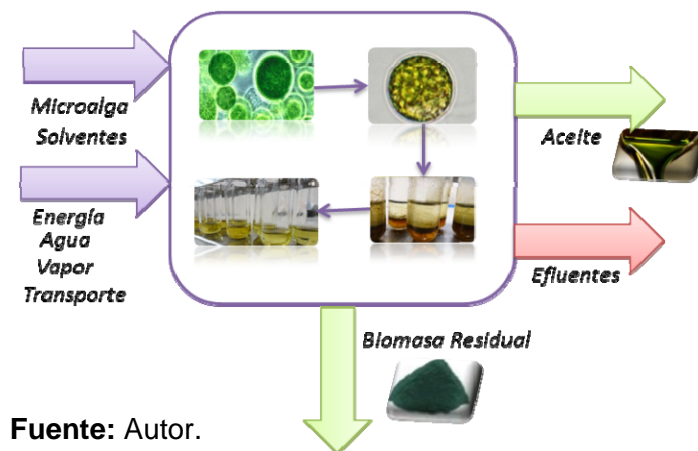
Aproximadamente el 80% de la información que se utilizó en este estudio es la reportada en las bases de datos BUWAL 250 y Ecoinvent, incluidas en el software de Sima Pro® 7.1. La información adicional se extrajo de artículos y trabajos de investigación relacionados con biocombustibles a partir de microalgas.

3.3.3. Análisis de Inventario

3.3.3.1. Inventario Para la Etapa de Extracción de Aceite

Para el análisis de impactos se utilizó los mismos límites de sistema en las tres rutas de extracción de aceite (Ver figura 6).

Figura 6. Diagrama de Flujo del Inventario.



Para las tres tecnologías de extracción se consideró el transporte desde el puerto de Cartagena, hasta la planta de extracción ubicada en Barranquilla lo cual constituye una distancia de 101 km aproximadamente [12]. En cada una de las tecnologías se obtuvo como producto secundario biomasa seca. De acuerdo con la norma ISO 14040 fue necesario hacer asignación másica de los co-productos

para cuantificar las cargas ambientales de cada uno. A continuación se presenta la asignación másica para cada uno de los sistemas en estudio.

Tabla 9. Asignación Másica para cada Tecnología Analizada.

<i>Etanol-Hexano</i>		<i>Metanol-Cloroformo</i>		<i>In Situ Hexano</i>	
<i>Producto</i>	<i>%p/p</i>	<i>Producto</i>	<i>%p/p</i>	<i>Producto</i>	<i>%p/p</i>
<i>Aceite</i>	33.83	<i>Aceite</i>	33.66	<i>Aceite</i>	33.94
<i>Biomasa seca</i>	66.17	<i>Biomasa seca</i>	66.34	<i>Biomasa seca</i>	66.06

Fuente: Autor.

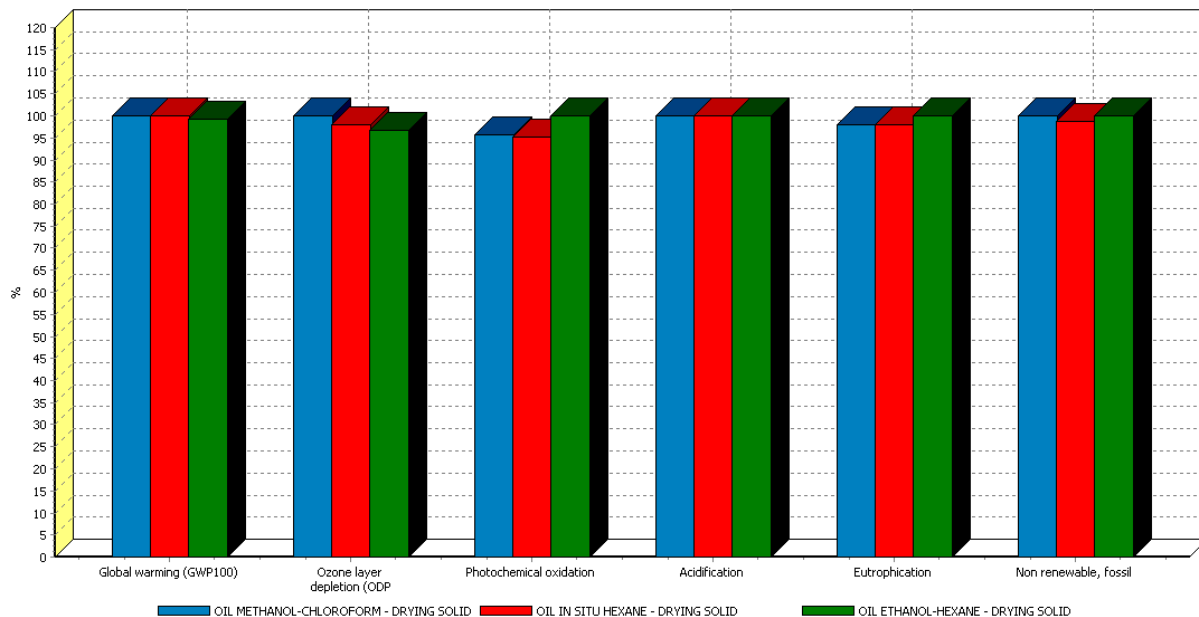
3.3.4. Evaluación de Impactos Ambientales

3.3.4.1. Análisis Comparativo de Impactos Ambientales de las Tecnologías de Extracción

En las tablas 5, 6 y 7 se muestran los principales flujos de masa y servicios industriales necesarios para la extracción de 12200 kg/h de aceite de microalgas requeridos para procesar 100000 ton/año de biodiesel. Con este estudio se buscó determinar la viabilidad de tres rutas de extracción con solventes a nivel industrial y para ello la eficiencia y rentabilidad de los procesos es vital. En cada una de las tecnologías de extracción se realizó el reciclo de los solventes utilizados y el secado de la biomasa residual, para aumentar la eficiencia de las rutas de extracción y posibilitar el uso de los sólidos secos como materia prima para procesos en los cuales se utilicen los carbohidratos y proteínas contenidas en la biomasa, debido a que con ello se aumenta la rentabilidad del proceso.

Los resultados reportados en la figura 7, muestran una gran similitud entre los tres métodos esto debido a que estos tienen un proceso de extracción similar y la mayor carga ambiental se generó por la microalga (Ver Anexo D). Por otra parte cada ruta de extracción utilizó diferentes mezclas de solventes y tiene diferentes requerimientos energéticos lo que marca la diferencia entre cada ruta.

Figura 7. Comparación de Impactos Ambientales Para los Métodos de Extracción Seleccionados.



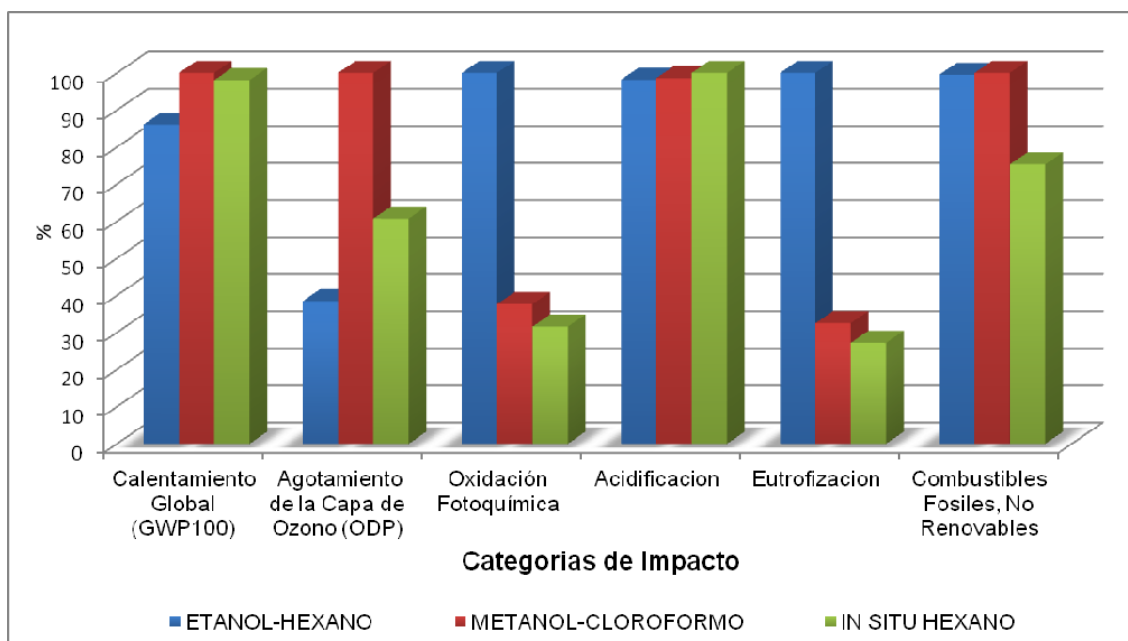
Comparando 1 kg (OIL METHANOL-CHLOROFORM - DRYING SOLID), 1 kg (OIL IN SITU HEXANE - DRYING SOLID) y 1 kg (OIL ETHANOL-HEXANE - DRYING SOLID); Método: EPD 2007 (draft version) V1.02 / Caracterización

Fuente: Autor.

Los impactos ambientales generados por cada ruta restando la carga ambiental de la producción de la microalga seca se muestran en la figura 8, con el objetivo de diferenciar mejor las cargas ambientales de cada una de las tecnologías de extracción de aceite (Ver Anexo F).

En la categoría de calentamiento global (GWP100), hace referencia a los kg de CO₂ equivalente, que es el responsable en la producción de gases de efecto invernadero, se observó una pequeña diferencia de carga en la ruta de extracción Metanol-Cloroformo con respecto a las demás debido a que el cloroformo presenta un factor de calentamiento global de 144 [40], lo que lo convierte en una sustancia altamente contaminante para el medio ambiente.

Figura 8. Comparación de las Cargas Ambientales de las Tres Rutas de Extracción de Aceite



Fuente: Autor.

En la categoría de agotamiento de la capa de ozono los compuestos clorados son considerados como unos de los más perjudiciales, estas sustancias son muy estables y fácilmente dispersadas por el viento alcanzando la estratosfera; una vez allí pueden reaccionar con los rayos ultravioletas provenientes de la radiación solar fraccionándose, liberando cloro, e iniciando el ciclo de destrucción del ozono [32]. El cloroformo, por contener cloro en su estructura, es un enemigo de la capa de ozono, otro de los inconvenientes que presenta este compuesto es su larga vida en la atmósfera, el cloroformo puede estar en promedio 200 años [40], por tal motivo es un contaminante potencial.

La oxidación fotoquímica es la formación de sustancias reactivas (principalmente ozono) que son perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas, resultado de sustancias orgánicas en el aire. En los sistemas de extracción analizados el método Etanol-Hexano presenta la mayor carga ambiental entre las rutas en estudio. El n-Hexano al ser descargado al ambiente se evapora fácilmente en el

aire. Una vez en el aire, puede reaccionar con el oxígeno y descomponerse, en cuestión de días [1]. El etanol es un compuesto muy volátil, por lo cual pasa al aire se foto-oxida a acetaldehído cuya oxidación conduce a la formación de nitrato de peroxiacetilo (PAN), el cual tiene la toxicidad más alta para las plantas y puede ocasionar daño en la vegetación [29]. Debido a lo anterior se puede atribuir la alta carga ambiental a la ruta Etanol-Hexano.

Por otra parte la acidificación se origina cuando el azufre, que se encuentran en estado elemental en los combustibles fósiles, y el nitrógeno, presente en el aire y en combustibles, son liberados a la atmósfera tras procesos de combustión, en forma de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO_2) [29]. En la comparación de las tres rutas la categoría de acidificación no muestra una diferencia significativa, sin embargo la que presenta una pequeña variación es la ruta In situ hexano, esta presentó unos requerimientos energéticos bastante elevados por lo que se puede atribuir dicha variación a los altos requerimientos de vapor en esta etapa.

La eutrofización o exceso de nutrientes en los sistemas acuáticos y terrestres puede ser causada por excesos de nitrógeno, fósforo y sustancias orgánicas degradables. Estos compuestos pueden provocar un crecimiento anormal de algas, plantas acuáticas y microorganismos de diferentes clases. Esto ejerce una fuerte demanda de oxígeno, la cual afecta negativamente la vida de los peces y tiene un impacto negativo. En la gráfica 8 se observa una diferencia marcada entre la ruta Etanol-Hexano con respecto a las demás. Esto debido posiblemente a la cantidad de etanol, que debe ser retirado del agua de desecho, que se produce en esta ruta tecnológica.

Por último la categoría de uso de combustibles fósiles, hace referencia a la utilización de combustibles fósiles y al impacto ambiental que esto genera, en la figura 8 se observa una carga similar para las rutas etanol-hexano y metanol-cloroformo debido a la cantidad de solvente utilizado en estos métodos de

extracción, por otra parte debido al reciclaje de solvente realizado para las tres tecnologías se disminuye notablemente el requerimiento del mismo. es por esto que el método In situ hexano presenta menor carga ambiental en esta categoría de impacto. El uso de combustibles fósiles, también generó impactos en otras categorías tales como acidificación y eutrofización, debido a que el contenido de azufre, nitrógeno y carbono desprendido en la quema de los combustibles se combinan para formar óxidos y afectar el medio ambiente. Por otra parte el principal subproducto de dicha combustión el dióxido de carbono, uno de los gases de efecto invernadero y el principal responsable del calentamiento global.

4. CONCLUSIONES

Las tecnologías de extracción analizadas presentaron eficiencias similares (98% - 99%). Las altas eficiencias de los métodos de extracción se deben a la implementación del reciclo de los solventes y el aceite remanente en la biomasa residual. Reduciendo la cantidad de solvente fresco y aumentando la cantidad de aceite extraído.

De acuerdo con el análisis ambiental realizado con la metodología EPD 2007 para las tres tecnologías de extracción de aceite de microalgas se concluyó:

En las diferentes categorías las rutas con menor impacto son: $9.49E-04$ kg PO_4^{3-} eq. en Eutrofización, 116 MJ eq. en Uso de Combustibles fósiles y $1,68E-03$ kg C_2H_4 en la categoría Oxidación Fotoquímica para la ruta In Situ Hexano, para la ruta Etanol/hexano la categoría de Calentamiento Global presentó 5.97 kg CO_2 eq. y $5.29E-07$ kg CFC-11 eq. en la categoría de Agotamiento de la Capa de Ozono. La ruta Metanol/Cloroformo fue la que presentó los mayores impactos ambientales en tres de las categorías evaluadas (Calentamiento Global, Agotamiento de la Capa de Ozono y Uso de Combustibles Fósiles).

Las tres rutas de extracción de aceite analizadas presentan cargas ambientales similares ($1.60E-02$ - $1.63E-02$) en la categoría de impacto Acidificación.

La extracción de aceite de microalga utilizando el método In Situ Hexano genera menores impactos ambientales en comparación de las mezclas con solventes Etanol-Hexano y Metanol-Cloroformo, debido a la alta toxicidad que presentan estas mezclas.

5. RECOMENDACIONES

Con el objetivo de disminuir la idealidad de las rutas de extracción de aceite de microalgas se recomienda realizar una caracterización más detallada de la microalga, para obtener un perfil fisicoquímico completo.

Se recomienda realizar un análisis exergético y económico, para evaluar la factibilidad de realizar este proceso a nivel industrial.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES & DISEASE REGISTRY (ATSDR). Resumen Salud Publica n-Hexano. En: http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs113.html
- [2] ALBARRACIN, Isabel. Microalgas: potenciales productoras de biodiesel. XV simposio electrónico internacional de producción de biocombustibles con eficiencia, estabilidad y equidad. Argentina. 2007. 16p.
- [3] AMARO, Helena, GUEDES, Catarina, MALCATA, Xavier. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. En: Applied Energy. 2011. Vol. 88. p. 3402–3410.
- [4] ARANDA, Alfonso, ZABALZA, Ignacio. Ecodiseño y Análisis de Ciclo de Vida. Prensas Universitarias de Zaragoza. 2010. 125p.
- [5] BLIGH, E. G. y DYER, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. En: *Can. J. Biochem. Physiol.* Vol. 37. p. 911-917.
- [6] BOROWITZKA, Michael. Fats, oils and hydrocarbons. En: Micro-Algal Biotechnology. Cambridge University Press: Cambridge. 1988. p. 257-287.
- [7] CHAPMAN V. J. The algae. 2 ed. London. 1973. 480p.
- [8] CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. En: Biotechnology Advances. 2007. Vol. 25. p. 294–306.
- [9] CHISTI, Yusuf, Moo-Young, Murray. Disruption of microbial cells for intracellular products. En: Enzyme and Microbial Technology. 1986. Vol. 8. p. 194-204.
- [10] CONESA, Vicente, ROS, Vicente, CONESA, Luis A. Guía Metodológica Para La Evaluación Del Impacto Ambiental. Ediciones Mundi-Prensa, 1995.

[11] DEL VALLE, J. M., y AGUILERA, J. M. Review: high pressure CO₂ extraction. Fundamentals and applications in the food industry. En: Food Science and Technology International. 1999. Vol. 5. p. 1–24.

[12] DISTANCIA ENTRE CIUDADES

www.alipso.com/cultura-del-mundo/distancias-entre-ciudades.html

[13] EHIMEN, E., SUN, Z.F., CARRINGTON C.G.. Variables affecting the in situ transesterification of microalgae lipids. En: Fuel. 2010. Vol. 89. p. 677–684.

[14] ENGLER, C.R., Disruption of Microbial Cells, in Comprehensive Biotechnology. Vol. 2. Oxford, England. M. Moo-Young, Editor, 1985, p. 305.

[15] ESPINOZA, Guillermo. Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental. Santiago-Chile. 2001.

[16] FAERMAN, V.; MUKMENEV, I.; SHREIBER, I. Sonication of Microalgae and its Precipitation En: Acta Acustica united with Acustica. 2002. Vol. 88, Nº 4. p. 592-593.

[17] FOWDEN L. The Composition of the Bulk Proteins of *Chlorella*. Department of Botany. University College. London. 1951. p. 355-358.

[18] GARIBAY, Adriana, *et al.* Biodiesel a partir de microalgas. En: Biotecnología. 2009. Vol. 13 Nº3. P. 38-60.

[19] GOMEZ, Domingo. Evaluación Del Impacto Ambiental: Un Instrumento Preventivo Para La Gestión Ambiental. Editorial Agrícola Española, 1999.

[20] GONZALEZ, Ángel D, VIATCHESLAV, Kafarov. Desarrollo de métodos de extracción de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas. En: Prospect. 2009. Vol. 07, Nº. 2. p. 53-60.

[21] GONZÁLEZ, Ángel D. *et al.* 2010. Desarrollo de una metodología para la extracción de aceite de microalgas empleando disrupción celular térmica y

química. Book of abstracts. XXIX Latin American Chemistry Congress – CLAQ 2010. ISBN 978-958-99607-0-7, S. N. FQT 64.

[22] GONZÁLEZ, Ángel, KAFAROV, Viatcheslav. Comparison of microalgae oil extraction methods for third generation biofuel production. En: Conference Proceedings. 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2010. ISBN 978-80-02-02210-7, S. N. 1449.

[23] HALIM, Ronald, *et al.* Oil extraction from microalgae for biodiesel production. En: Bioresource Technology. 2010. Vol. 102. p. 178 – 185.

[24] ISO 14040:2006, Environmental management, life cycle assessment, principles and framework. International Standard Organization.

[25] ISO 14044:2006, Environmental management, life cycle assessment, requirements and guidelines. International Standard Organization.

[26] KING, J. W.. Advances in critical fluid technology for food processing. En: Food Science and Technology Today. 2000. Vol. 14. p. 186–191.

[27] LEE, J.-Y, *et al.* (2009), Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. En: Bioresource technology. 2010. Vol. 101. p. 75–77.

[28] Li Yanqum, *et al.* Biofuels from microalgae. En: Biotechnology Prog. 2008. Vol. 24. p.815–20.

[29] MANAHAN, Stanley E. Introducción a la Química Ambiental . 1 ed. Editorial Reverte. 2007. 610p.

[30] MATA T.M., MARTINS A.A., CAETANO N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010, Vol.14, p.217–32.

[31] Metzger P, Largeau C. *Botryococcus braunii*: A rich source for hydrocarbons and related ether lipids. En: Applied Microbiology and Biotechnology. 2005. Vol. 66. N°5. p. 486-496.

- [32] Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible de Colombia. Tetracloruro de carbono usos y alternativas. En: http://www.minambiente.gov.co/documentos/normativa/ambiente/cartillas/030811_cartilla_tetracloruro.pdf. Bogotá, D.C., Colombia. 20100
- [33] PETKOV, Georgi y GARCÍA, Guillermo. Which are fatty acids of the green alga *Chlorella*?. En: *Biochemical Systematic and Ecology*. 2007. Vol. 35. p. 281-285.
- [34] PHUKAN, Mayur y CHUTIA, Rahul. Microalgae *Chlorella* as a potential bio-energy feedstock. En: *Apply Energy*. 2011. Vol 88. p. 3307 – 3312.
- [35] PRé Consultants. SimaPro Database Manual Methods library. www.pre.nl.
- [36] RA, Kay. Microalgae as food and supplement. En: *Critical Review Food Science and Nutrition*. 1991. Vol. 30 N° 6. p. 555-573.
- [37] RAMÍREZ FAJARDO, Antonio, *et al.*. Lipid extraction from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. En: *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 2007. Vol. 109. p. 120–126.
- [38] RICHMOND, Amos. *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Wiley-Blackwell Publishing. 2004. 577p.
- [39] SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E. ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. En: *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2006. Vol 101. p.87-96.
- [40] UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. PROTOCOLO DE MONTREAL: Protección a la capa de ozono. 2007. En: http://www.undp.org/gef/documents/publications/MontrealProtocol_SPA_WEB.pdf.

[41] VERVERIS, C., *et al.* Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. En: Bioresource Technology. 2007. Vol. 98. p. 296–301.

[42] VESSIA, Oyvind. Planning of sustainable energy distribution systems Part III: A Life Cycle Assessment Perspective. En: SINTEF Energy Research. 2007. 104p. ISBN N° 978-82-594-3294-0.

[43] Ward O. P., Singh A (2005). Omega–3/6 fatty acids: Alternative sources of production. En: Process Biochemistry. 2005. Vol. 40, Issue 12. p. 3627-3652.

7. ANEXOS

ANEXO A. EVALUACION DE IMPACTOS

En esta fase se evalúa la importancia de los potenciales impactos ambientales a partir de los resultados del análisis de inventario. En este proceso cada dato del inventario (emisiones gaseosas, vertidos, etc.), se evalúa el impacto ambiental potencial que se produce y se cuantifica.

Los potenciales impactos medioambientales más habituales son:

- **El efecto invernadero.** Efecto que puede provocar cambios climáticos.
- **Destrucción de la capa de ozono.** Causado por la emisión de gases que favorecen la desaparición del ozono que se encuentra en la estratosfera.
- **El smog foto-químico.** Que en ocasiones produce ozono, al nivel de la troposfera, causando problemas respiratorios.
- **La acidificación.** Que puede afectar a la fauna en ríos y lagos.
- **La eutrofización.** Que perjudica a los cultivos, y en ríos y lagos produce el crecimiento descontrolado de las algas.

Dentro de la fase de evaluación se pueden identificar tres etapas:

- **La Clasificación.** Consiste en asignar los datos del inventario a cada una de las categorías de impacto que se vayan a considerar.
- **La Caracterización.** Que debe cuantificar los impactos ambientales. Para ello se suelen referir a un modelo, de esta forma estos valores pueden compararse entre sí más adelante.
- **La valoración.** Intenta agregar los resultados medioambientales para cada producto objeto de estudio, de esta forma se obtiene un juicio o valoración sobre la calidad medioambiental global del producto. Para ello se suma de forma ponderada los valores obtenidos en la etapa anterior para cada categoría de impactos. Este valor ayudará para comparar la calidad medioambiental de diferentes alternativas de sistema.

ANEXO B.

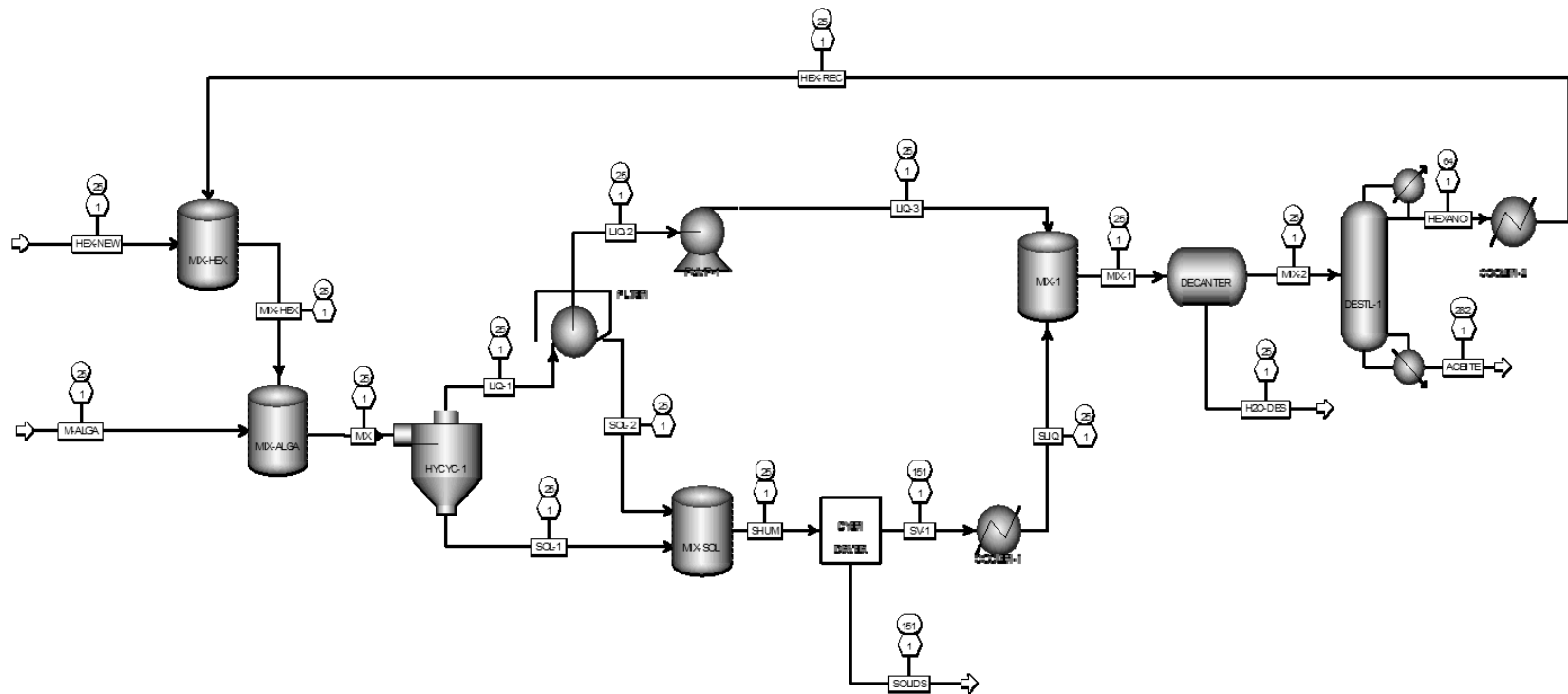
Tabla 10. Contenido Lipídico y Productividad de Especies de Microalgas.

Marine and freshwater microalgae species	Lipid content (% dry weight biomass)	Lipid productivity (mg/L/day)	Volumetric productivity of biomass (g/L/day)	Areal productivity of biomass (g/m ² /day)
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	24.0–31.0	–	–	11.5–17.4
<i>Botryococcus braunii</i>	25.0–75.0	–	0.02	3.0
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33.6	21.8	0.07	–
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14.6–16.4/39.8	17.6	0.04	–
<i>Chlorella emersonii</i>	25.0–63.0	10.3–50.0	0.036–0.041	0.91–0.97
<i>Chlorella protothecoides</i>	14.6–57.8	121.4	2.00–7.70	–
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19.0–22.0	44.7	0.23–1.47	–
<i>Chlorella vulgaris</i>	5.0–58.0	11.2–40.0	0.02–0.20	0.57–0.95
<i>Chlorella</i> sp.	10.0–48.0	42.1	0.02–2.5	1.61–16.47/25
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2.0	–	2.90–3.64	72.5/130
<i>Chlorella</i>	18.0–57.0	18.7	–	3.50–13.90
<i>Chlorococcum</i> sp.	19.3	53.7	0.28	–
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20.0–51.1	–	10	–
<i>Dunaliella salina</i>	6.0–25.0	116.0	0.22–0.34	1.6–3.5/20–38
<i>Dunaliella primolecta</i>	23.1	–	0.09	14
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16.7–71.0	–	0.12	–
<i>Dunaliella</i> sp.	17.5–67.0	33.5	–	–
<i>Ellipsoidion</i> sp.	27.4	47.3	0.17	–
<i>Euglena gracilis</i>	14.0–20.0	–	7.70	–
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25.0	–	0.05–0.06	10.2–36.4
<i>Isochrysis galbana</i>	7.0–40.0	–	0.32–1.60	–
<i>Isochrysis</i> sp.	7.1–33	37.8	0.08–0.17	–
<i>Monodus subterraneus</i>	16.0	30.4	0.19	–
<i>Monallanthus salina</i>	20.0–22.0	–	0.08	12
<i>Nannochloris</i> sp.	20.0–56.0	60.9–76.5	0.17–0.51	–
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22.7–29.7	84.0–142.0	0.37–0.48	–
<i>Nannochloropsis</i> sp.	12.0–53.0	37.6–90.0	0.17–1.43	1.9–5.3
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29.0–65.0	90.0–134.0	–	–
<i>Nitzschia</i> sp.	16.0–47.0	–	–	8.8–21.6
<i>Oocystis pusilla</i>	10.5	–	–	40.6–45.8
<i>Pavlova salina</i>	30.9	49.4	0.16	–
<i>Pavlova lutheri</i>	35.5	40.2	0.14	–
<i>Phaeodactylum tricomutum</i>	18.0–57.0	44.8	0.003–1.9	2.4–21
<i>Porphyridium cruentum</i>	9.0–18.8/60.7	34.8	0.36–1.50	25
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11.0–55.0	–	0.004–0.74	–
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1.9–18.4	35.1	0.19	–
<i>Scenedesmus</i> sp.	19.6–21.1	40.8–53.9	0.03–0.26	2.43–13.52
<i>Skeletonema</i> sp.	13.3–31.8	27.3	0.09	–
<i>Skeletonema costatum</i>	13.5–51.3	17.4	0.08	–
<i>Spirulina platensis</i>	4.0–16.6	–	0.06–4.3	1.5–14.5/24–51
<i>Spirulina maxima</i>	4.0–9.0	–	0.21–0.25	25
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20.6	17.4	0.08	–
<i>Tetraselmis suecica</i>	8.5–23.0	27.0–36.4	0.12–0.32	19
<i>Tetraselmis</i> sp.	12.6–14.7	43.4	0.30	–

Fuente: Mata T.M, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2010; 14:217–32.

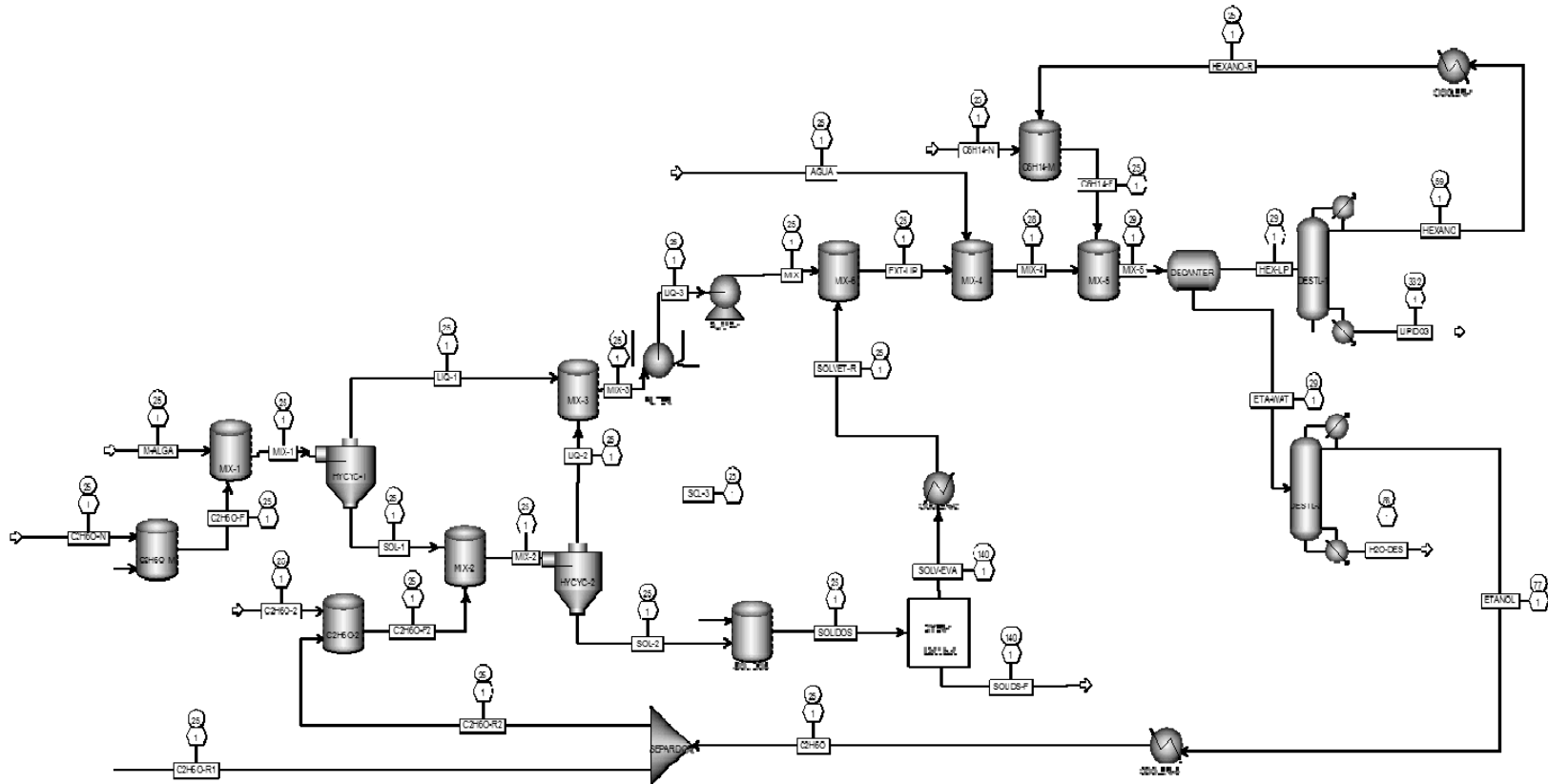
ANEXO C.
ESQUEMAS DE SIMULACION EN ASPEN PLU® 7.1 PARA LOS TRES METODOS DE EXTRACCION

Figura 9. Diagrama Simulación de la Ruta de Extracción In Situ Hexano.



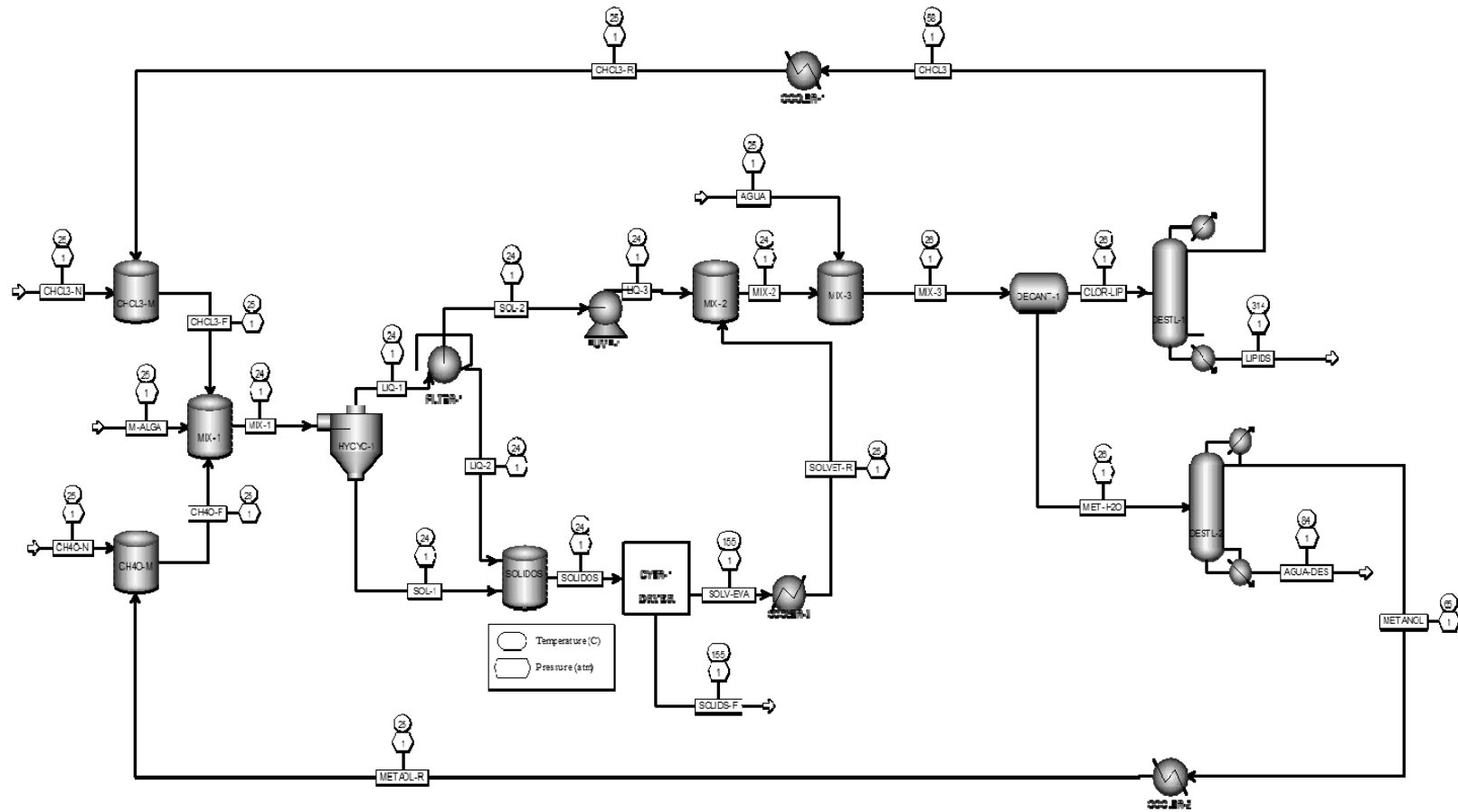
Fuente: Autor.

Figura 10. Diagrama Simulación de la Ruta de Extracción Etanol/Hexano.



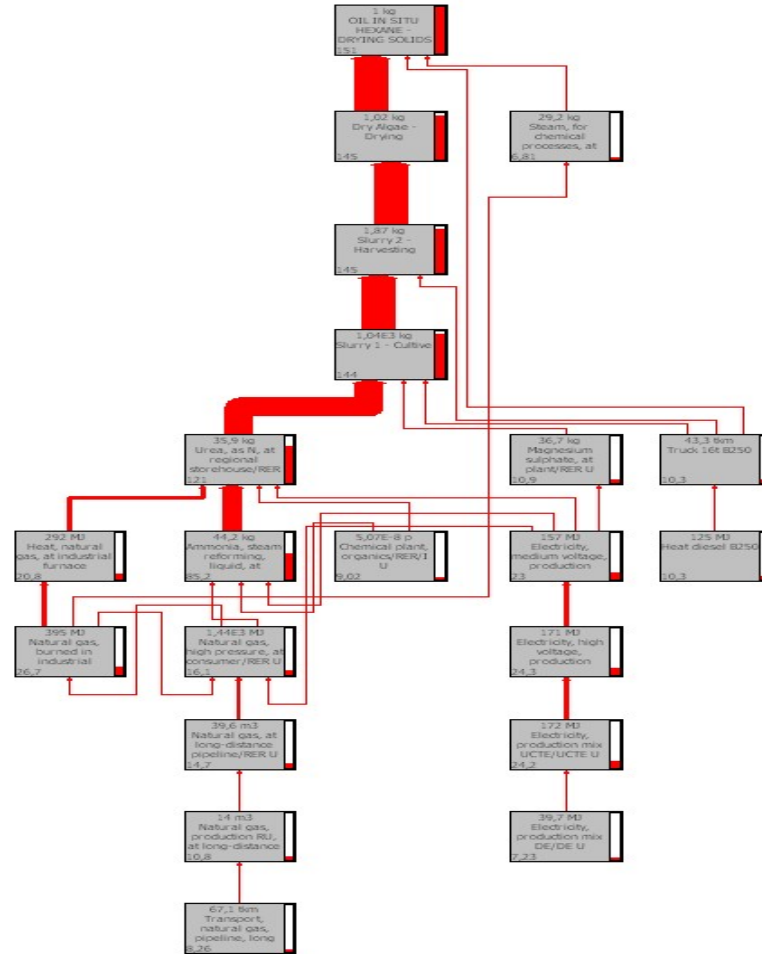
Fuente: Autor.

Figura 11. Diagrama Simulación de la Ruta de Extracción Metanol/Cloroformo.



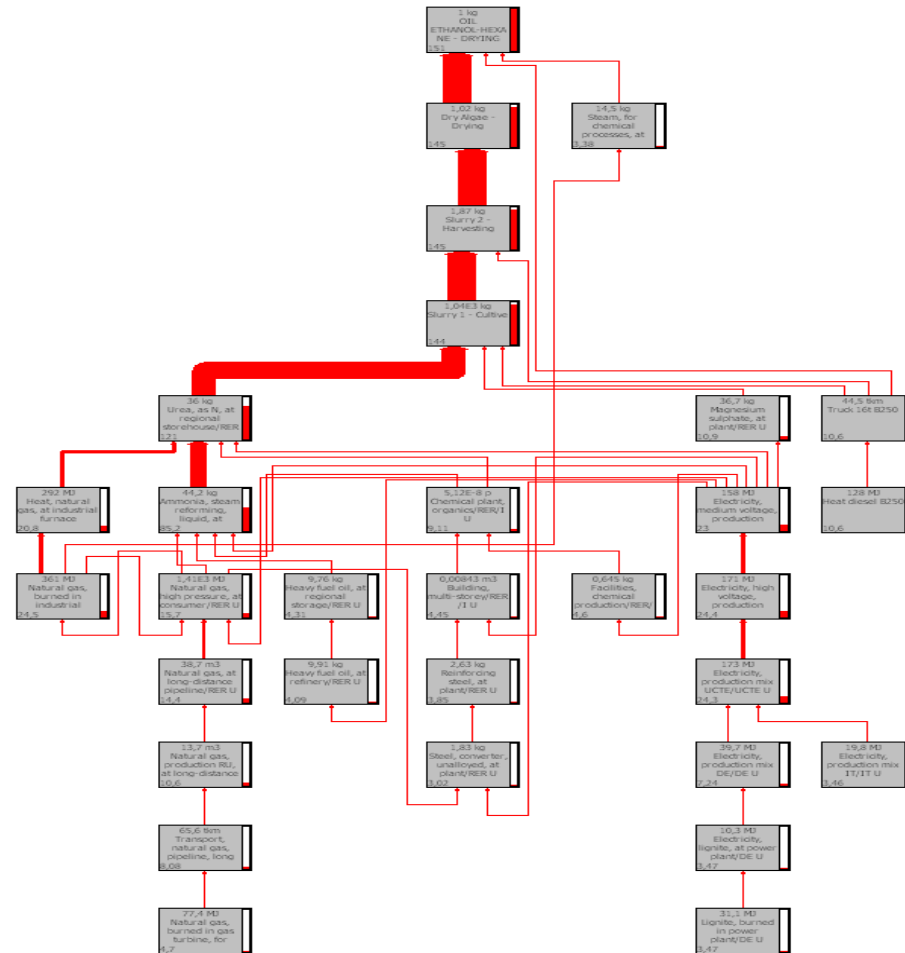
Fuente: Autor.

Figura 13. Red de Inventario de la Ruta de Extracción Etanol/Hexano.



Fuente: Autor.

Figura 14. Red de Inventario de la Ruta de Extracción In Situ Hexano.

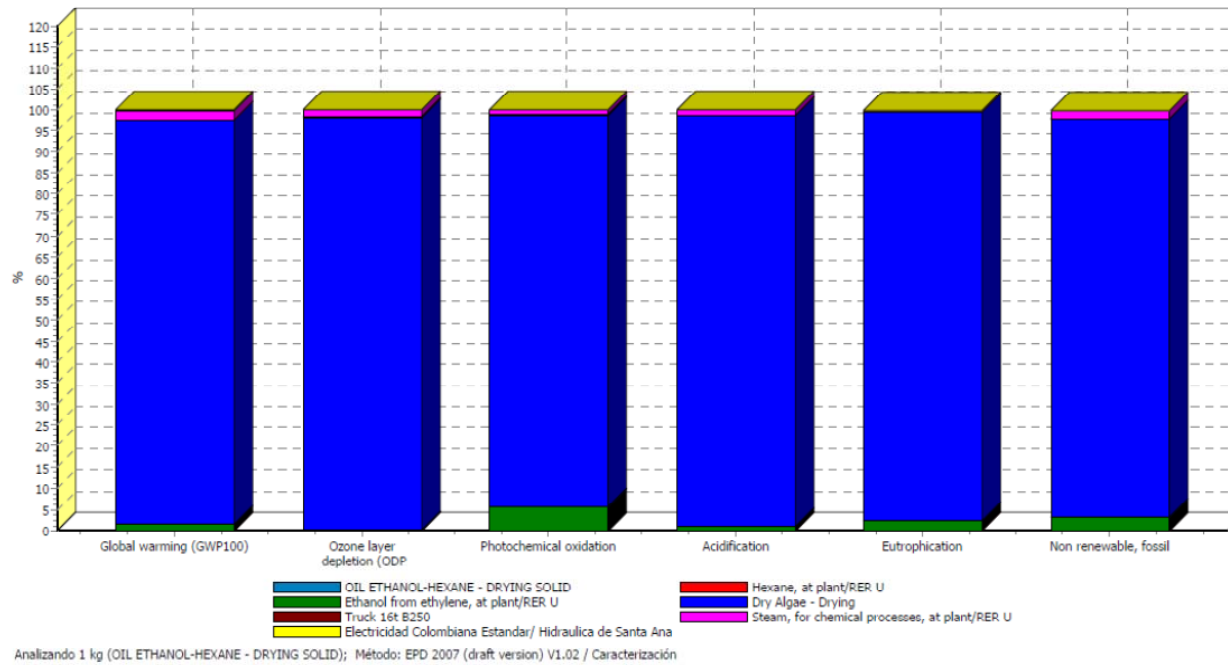


Fuente: Autor.

ANEXO E.

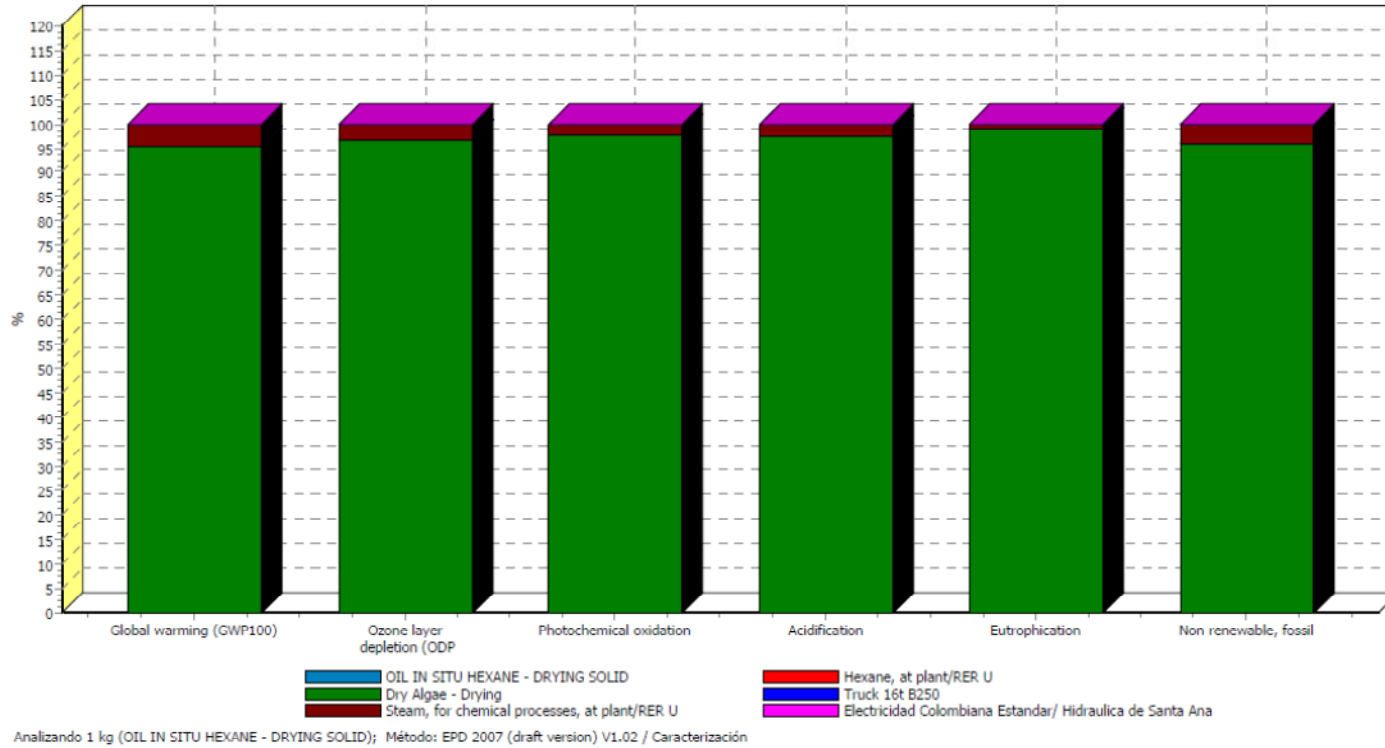
CARACTERIZACION DE IMPACTOS AMBIENTALES PARA CADA TECNOLOGIA DE EXTRACCION POR LA METODOLOGIA EPD 2007.

Figura 15. Evaluación Impactos Ambientales del Método Etanol/Hexano.



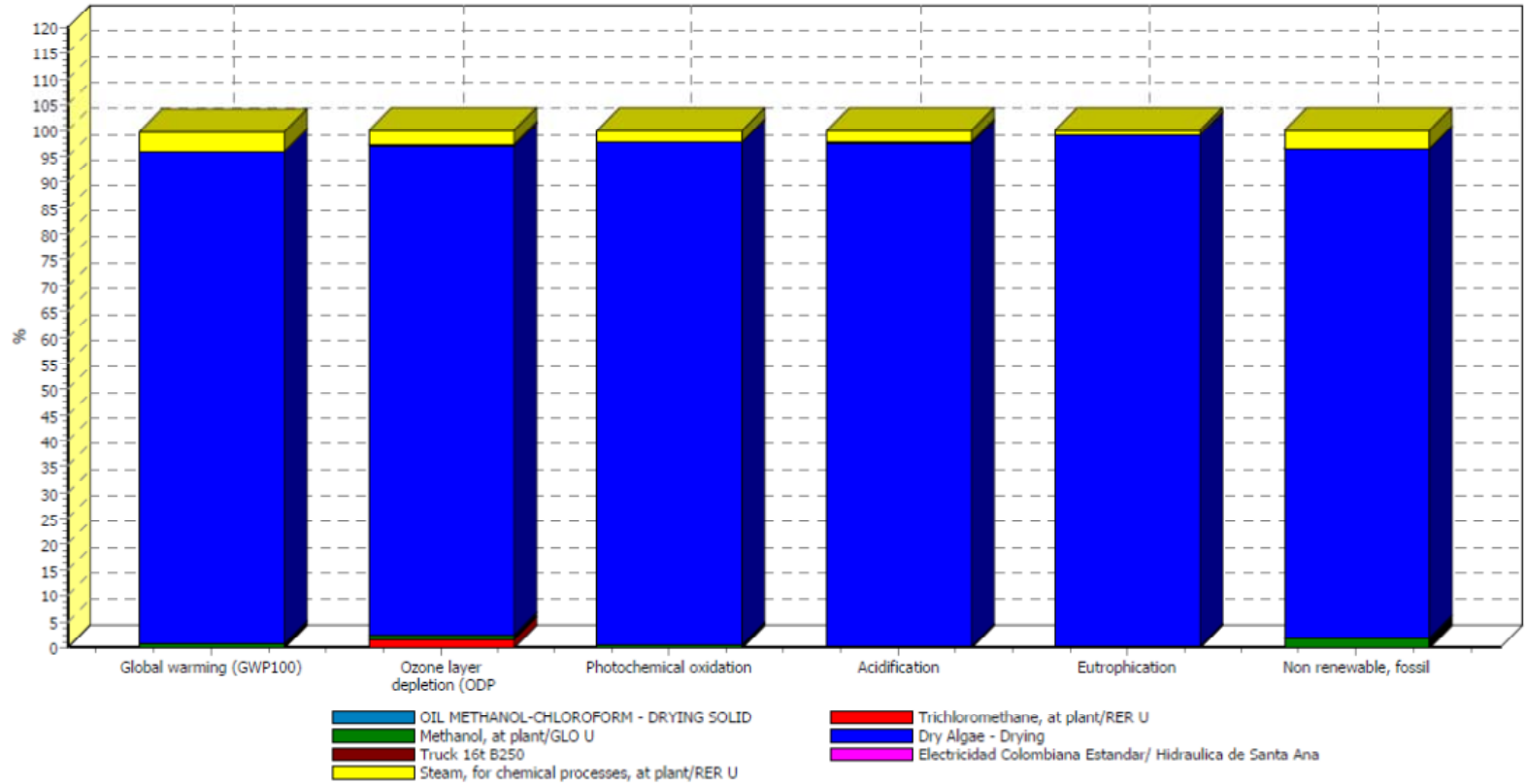
Fuente: Autor.

Figura 16. Evaluación Impactos Ambientales del Método In Situ Hexano.



Fuente: Autor.

Figura 17. Evaluación Impactos Ambientales del Método Metanol/Cloroformo.



Analizando 1 kg (OIL METHANOL-CHLOROFORM - DRYING SOLID); Método: EPD 2007 (draft version) V1.02 / Caracterización

Fuente: Autor.

ANEXO F.

TABLAS DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACION DE IMPACTOS AMBIENTALES.

Tabla 11. Comparación de Impactos Ambientales de las Rutas de Extracción.

Categoría de impacto	Unidad	METANOL- CLOROFORMO	IN SITU HEXANO	ETANOL- HEXANO
Calentamiento Global (GWP100)	kg CO ₂ eq	152	151	151
Destrucción Capa Ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	2,68E-05	2,63E-05	2,60E-05
Oxidación Fotoquímica	kg C ₂ H ₄	0,0741	0,0737	0,0774
Acidificación	kg SO ₂ eq	0,65	0,65	0,65
Eutrofización	kg PO ₄ ⁻³ eq	0,121	0,121	0,123
Uso de Combustibles Fósiles	MJ eq	2,98E+03	2,95E+03	2,98E+03

Fuente: Autor.

Tabla 12. Comparación de Impactos Ambientales de las Rutas de Extracción Restando la Carga Ambiental de la Microalga.

Categoría de impacto	ETANOL-HEXANO	METANOL-CLOROFORMO	IN SITU HEXANO
Calentamiento Global (GWP100)	5,979738	6,946105	6,813233
Destrucción Capa Ozono (ODP)	5,29809E-07	1,3782E-06	8,367E-07
Oxidación Fotoquímica	0,0053312	0,002007298	0,001683599
Acidificación	0,01601015	0,01608143	0,01631003
Eutrofización	0,003491337	0,001134687	0,000949349
Uso de Combustibles Fósiles	153,2837	154,0705	116,0626

Fuente: Autor.

Tabla 13. Datos de Impactos Ambientales del Método Metanol/Cloroformo.

Categoría de impacto	Total	Cloroformo	Metanol	Alga Seca	Transporte	Electricidad	Vapor
Calentamiento Global (GWP100)	151,946	0,00149	1,04	145	0,0338	0,000815	5,87
Destrucción Capa Ozono (ODP)	2,7E-05	4,34E-07	1,96E-07	2,55E-05	2,82E-08	0	7,20E-07
Oxidación Fotoquímica	0,07411	2,98E-07	0,000457	0,0721	0,0001	0	0,00145
Acidificación	0,65008	2,43E-06	0,00173	0,634	0,000349	0	0,014
Eutrofización	0,12113	1,87E-07	0,000241	0,12	7,65E-05	0	0,000817
Uso de Combustibles Fósiles	2984,07	0,0165	53,7	2,83E+03	0,454	0	99,9

Fuente: Autor.

Tabla 14. Datos de Impactos Ambientales del Método Metanol/Cloroformo Excluyendo Alga seca.

Categoría de impacto	Total	Cloroformo	Metanol	Transporte	Electricidad	Vapor
Calentamiento Global (GWP100)	6,94611	0,00149	1,04	0,0338	0,000815	5,87
Destrucción Capa Ozono (ODP)	1,4E-06	4,34E-07	1,96E-07	2,82E-08	0	7,20E-07
Oxidación Fotoquímica	0,00201	2,98E-07	0,000457	0,0001	0	0,00145
Acidificación	0,01608	2,43E-06	0,00173	0,000349	0	0,014
Eutrofización	0,00113	1,87E-07	0,000241	7,65E-05	0	0,000817
Uso de Combustibles Fósiles	154,071	0,0165	53,7	0,454	0	99,9

Fuente: Autor.

Tabla 15. Datos de Impactos Ambientales del Método In Situ Hexano.

Categoría de impacto	Total	Hexano	Alga Seca	Transporte	Vapor	Electricidad
Calentamiento Global (GWP100)	151	0,000915	145	0,000238	6,81	0,00208
Destrucción Capa Ozono (ODP)	2,63E-05	5,01E-10	2,55E-05	1,99E-10	8,36E-07	0
Oxidación Fotoquímica	0,0737	2,89E-06	0,0721	7,09E-07	0,00168	0
Acidificación	0,65	7,56E-06	0,633	2,47E-06	0,0163	0
Eutrofización	0,121	8,09E-07	0,12	5,40E-07	0,000948	0
Uso de Combustibles Fósiles	2,95E+03	0,0594	2,83E+03	0,0032	116	0

Fuente: Autor.

Tabla 16. Datos de Impactos Ambientales del Método In Situ Hexano Excluyendo Alga seca.

Categoría de impacto	Total	Hexano	Transporte	Vapor	Electricidad
Calentamiento Global (GWP100)	6,813233	0,000915	0,000238	6,81	0,00208
Destrucción Capa Ozono (ODP)	8,37E-07	5,01E-10	1,99E-10	8,36E-07	0
Oxidación Fotoquímica	0,001684	2,89E-06	7,09E-07	0,00168	0
Acidificación	0,01631	7,56E-06	2,47E-06	0,0163	0
Eutrofización	0,000949	8,09E-07	5,40E-07	0,000948	0
Uso de Combustibles Fósiles	116,0626	0,0594	0,0032	116	0

Fuente: Autor.

Tabla 17. Datos de Impactos Ambientales del Método Etanol/Hexano.

Categoría de impacto	Total	Hexano	Etanol	Alga Seca	Transporte	Vapor	Electricidad
Calentamiento Global (GWP100)	151	0,000381	2,56	145	0,049	3,37	0,000357
Destrucción Capa Ozono (ODP)	2,60E-05	2,09E-10	7,46E-08	2,55E-05	4,10E-08	4,14E-07	0
Oxidación Fotoquímica	0,0774	1,20E-06	0,00435	0,0721	0,000146	0,000834	0
Acidificación	0,65	3,15E-06	0,00743	0,634	0,000507	0,00807	0
Eutrofización	0,123	3,37E-07	0,00291	0,12	0,000111	0,00047	0
Uso de Combustibles Fósiles	2,98E+03	0,0247	95,2	2,83E+03	0,659	57,4	0

Fuente: Autor.

Tabla 18. Datos de Impactos Ambientales del Método Etanol/Hexano Excluyendo Alga seca.

Categoría de impacto	Total	Hexano	Etanol	Transporte	Vapor	Electricidad
Calentamiento Global (GWP100)	5,979738	0,000381	2,56	0,049	3,37	0,000357
Destrucción Capa Ozono (ODP)	5,29809E-07	2,09E-10	7,46E-08	4,10E-08	4,14E-07	0
Oxidación Fotoquímica	0,0053312	1,20E-06	0,00435	0,000146	0,000834	0
Acidificación	0,01601015	3,15E-06	0,00743	0,000507	0,00807	0
Eutrofización	0,003491337	3,37E-07	0,00291	0,000111	0,00047	0
Uso de Combustibles Fósiles	153,2837	0,0247	95,2	0,659	57,4	0

Fuente: Autor.