

PREDICCIÓN DE LAS EMISIONES GENERADAS EN LA COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DE LA MICROALGA *Chlorella nativa*



GARY ACEVEDO OCHOA

AIRINNE GUARDO MACOTT

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

**PREDICCIÓN DE LAS EMISIONES GENERADAS EN LA COMBUSTIÓN DEL
BIODIESEL PRODUCIDO A PARTIR DE LA MICROALGA *Chlorella nativa***

GARY ACEVEDO OCHOA

AIRINNE GUARDO MACOTT

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

ING. PEDRO JAVIER MEZA CASTELLAR

DIRECTOR

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C. MAYO DE 2012.

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena 15 de Mayo de 2012

DEDICATORIA

*A nuestros padres Carlos Acevedo, Luz Marina Ochoa,
José Guardo y Miriam Payares...*

*Por darnos la mejor muestra de su amor,
Una buena educación.*

AGRADECIMIENTOS

La presente tesis es el producto del esfuerzo, dedicación y empeño que de una u otra manera fue influenciada y motivada por personas allegadas, las cuales siempre brindaron acompañamiento en momentos de crisis y felicidad, ánimo y apoyo constante.

Damos gracias a Dios por guiarnos, darnos la sabiduría y la fortaleza para salir adelante.

Gracias a nuestros familiares Carlos Acevedo, Luz marina Ochoa, Shirly Acevedo, José Guardo, Miriam Payares, Octavio Guardo y María Teresa Macott por entender nuestras ausencias, nuestros malos y buenos momentos, por estar siempre a nuestro lado en esta aventura que es la Ingeniería Química, gracias por su apoyo constante e incondicional.

A la Ing. Química María Angélica Brieva no solo por su apoyo técnico sino también por animarnos en momentos difíciles, a Ingrid Agresott por su aliento, apoyo, compañía e incesante amistad, de la misma forma a Oscar y Darwin por su apoyo constante y amistad incondicional. A todos los compañeros de clase y de la carrera, por los buenos y malos momentos que nos permitieron formarnos como personas y profesionales. A ti Gloria Esther “porque tu compañía es el soporte que me anima a lograr las metas”.

Agradecemos de forma especial a la profesora Msc. Lesly Tejeda Benítez por haber confiado en nosotros, por la paciencia, la asesoría y asistencia durante la realización de este trabajo, de igual forma, al profesor Pedro Meza, nuestro director de tesis. Por último pero no menos importante, a la Universidad de Cartagena y a todos los profesores que durante la carrera nos transmitieron sus conocimientos y enseñanzas, nos direccionaron e hicieron de nosotros los profesionales que una vez soñamos ser.

¡Gracias a todos, su apoyo fue imprescindible!

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
2. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	5
3. OBJETIVOS.....	7
3.1 OBJETIVO GENERAL	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
4. MARCO DE REFERENCIAS	8
4.1 ANTECEDENTES.....	8
4.2 MARCO TEÓRICO.....	12
4.2.1 Biodiesel.....	12
4.2.2 Materias Primas Para la Producción de Biodiesel.....	14
4.2.3 Principales Propiedades y Parámetros de Calidad	22
4.2.4 Emisiones del Biodiesel	29
4.3 ESTADO ACTUAL.....	31
5. METODOLOGÍA	34
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
5.2 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE MICROALGAS Y COMPOSICION DEL BIODIESEL.....	34
5.2.1 Perfil de Ácidos Grasos.....	34
5.2.2 Reacciones de Transesterificación	35
5.2.3 Composición del Biodiesel	37
5.3 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES BÁSICAS DEL BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS <i>Chlorella nativa</i>	37
5.3.1 Densidad.....	38
5.3.2 Gravedad API.....	39
5.3.3 Análisis Elemental	39
5.3.4 Viscosidad Dinámica	40

5.3.5 Poder Calorífico Superior	40
5.3.6 Número de Cetano.....	41
5.3.7 Capacidad Calorífica.....	42
5.3.8 Validación de Ecuaciones	42
5.4 CÁLCULO ESTEQUIOMÉTRICO DE EMISIONES.....	43
5.5 SIMULACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS <i>Chlorella nativa</i>	45
5.5.1 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas <i>Chlorella nativa</i> a 718 K.....	45
5.5.2 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción H ₂ O y CO ₂ respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas <i>Chlorella nativa</i> a diferentes temperaturas	49
5.6 ANALISIS TERMODINÁMICO	49
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
6.1 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE MICROALGAS Y COMPOSICION DEL BIODIESEL.....	51
6.2 PROPIEDADES BÁSICAS DEL BIODIESEL DE MICROALGAS <i>Chlorella nativa</i>	52
6.2.1 Densidad.....	52
6.2.2 Gravedad API.....	58
6.2.3 Análisis Elemental	59
6.2.4 Viscosidad	62
6.2.5 Poder Calorífico Superior	66
6.2.6 Número de Cetano.....	69
6.2.7 Capacidad Calorífica.....	71
6.3 EMISIONES ESTEQUIOMÉTRICAS.....	73
6.4 SIMULACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS <i>Chlorella nativa</i>	80
6.4.1 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas <i>Chlorella nativa</i> a 718 K.....	80

6.4.2 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción H ₂ O y CO ₂ respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas <i>Chlorella nativa</i> a diferentes temperaturas	84
6.5 ANÁLISIS TERMODINÁMICO	85
6.5.1 Energía Liberada	86
6.5.2 Temperatura de Llama Adiabática	89
7. CONCLUSIONES.....	91
8. RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	94
ANEXOS	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características y propiedades del diesel y el biodiesel según los estándares ASTM	12
Tabla 2. Contenido de Lípidos y Productividades de Diferentes Especies de Microalgas.....	21
Tabla 3. Comparación de las microalgas con otras materias primas para la producción de biodiesel	21
Tabla 4. Modelos Predictivos más utilizados para el cálculo de la Viscosidad	24
Tabla 5. Algunas Correlaciones para Estimar el Poder Calorífico Superior HHV	27
Tabla 6. Porcentaje de Reducción de las Emisiones de B100 y B20 Comparadas con el Diesel	30
Tabla 7. Perfil de Ácidos Grasos presentes en el aceite de microalgas <i>Chlorella nativa</i> ...	34
Tabla 8. Propiedades y Parámetros de Calidad Estimados	38
Tabla 9. Correlaciones utilizadas para el cálculo de la densidad	39
Tabla 10. Correlaciones utilizadas para el cálculo de la viscosidad dinámica a 40°C.....	40
Tabla 11. Correlaciones Utilizadas para el cálculo del Poder calorífico Superior.....	41
Tabla 12. Entalpias de Formación de Metil Esteres.....	49
Tabla 13. Fracciones Másicas de los metil esterres que conforman el biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	52
Tabla 14. Densidad de los metil ésteres del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	52
Tabla 15. Propiedades Críticas de los Metil Esteres del Biodiesel	53
Tabla 16. Propiedades Críticas del biodiesel obtenido a partir de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	53
Tabla 17. Composición molar del biodiesel a partir de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	54
Tabla 18. Numero de dobles enlaces y densidad estimada para algunos metil esterres.....	55
Tabla 19. Densidad Relativa y Gravedad API del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	58
Tabla 20. Análisis elemental del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	60
Tabla 21. Viscosidad de los componentes del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> ..	62
Tabla 22. Número de Cetano de algunos metil esterres	69
Tabla 23. Numero de Cetano estimado para el biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	70
Tabla 24. Capacidad calorífica estimada del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> a 25°C.....	71
Tabla 25. Composición del Aire para el Caso 1.....	74
Tabla 26. Gases de Combustión del Biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> . Caso 1	75

Tabla 27. Composición del Aire para el Caso 2.....	75
Tabla 28. Gases de Combustión del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> . Caso 2.....	76
Tabla 29. Gases de combustión del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> vs. Biodiesel de palma y diesel fósil	77
Tabla 30 Fracciones normalizadas de los productos de reacción del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> con respecto a la razón de riqueza a 715 K.....	81
Tabla 31. Datos para el Análisis Termodinámico para una reacción de combustión estequiométrica	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Transesterificación de Aceites Vegetales para la producción de biodiesel	13
Figura 2. Mecanismo de reacción de transesterificación en un medio básico	14
Figura 3. Fuentes de Aceites reportadas para la producción de Biodiesel.....	15
Figura 4. Productividad del Biodiesel de diferentes Materias Primas	22
Figura 5. Representación esquemática de la reacción de transesterificación del aceite de microalgas <i>Chlorella nativa</i> con metanol en presencia de hidróxido de potasio para producir metil palmitato.....	36
Figura 6. Densidad Estimada y Reportada para el biodiesel de dos especies de microalgas: <i>Chlorella nativa</i> y <i>Chlorella protothecoides</i>	56
Figura 7. Densidad del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto a la densidad del diesel fósil y del biodiesel de palma	57
Figura 8. Gravedad API del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y el diesel	58
Figura 9. Composición del Biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y al diesel.	61
Figura 10. Comparación de la viscosidad dinámica estimada y reportada para el biodiesel de dos especies de microalgas <i>Chlorella</i>	64
Figura 11. Viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y el diesel.....	65
Figura 12. Poder calorífico superior (HHV) estimado y reportado del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> y <i>Chlorella protothecoides</i>	67
Figura 13. Poder Calorífico Superior (HHV) del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y el diesel	68
Figura 14. Número de Cetano del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y el diesel	70
Figura 15. Capacidad calorífica estimada del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y el diesel fósil	72
Figura 16. Productos de combustión generados por el biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> . Caso 1 vs. Caso 2.....	77
Figura 17. Emisiones generadas por el biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> respecto al biodiesel de palma y el diesel	78
Figura 18. Simulación de la fracción molar de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del biodiesel de microalgas <i>C. nativa</i>	82
Figura 19. Simulación de la fracción molar de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del biodiesel de palma	82

Figura 20. Simulación de la Fracción molar del vapor de agua respecto a la razón de riqueza del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> evaluado a diferentes temperaturas	84
Figura 21. Simulación de la Fracción molar del Dióxido de Carbono respecto a la razón de riqueza del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> evaluado a diferentes temperaturas	85
Figura 22. Variación de la Energía Liberada en la combustión del Biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i> con respecto a la Temperatura a diferentes razones de Riqueza	88
Figura 23. Variación de la Temperatura de Llama Adiabática respecto a la Riqueza.....	89

ABREVIATURAS

μ :	Viscosidad
μ_m :	Viscosidad de la mezcla (kg/m.s)
μ_i :	Viscosidad de cada compuesto (kg/m.s)
x_i :	Fracción molar del componente i en la mezcla
M_i :	Peso molecular del compuesto i
N :	Numero de dobles enlaces en un acido graso dado
y_i :	Fracción molar
ρ^b :	Densidad molar de la mezcla en el punto de ebullición
P_c :	Presión critica de la mezcla
T_c :	Temperatura critica de la mezcla
T_r :	Temperatura reducida de la mezcla
Z_{RA} :	Constante de Rackett
R :	Constantes universal de los gases ideales
ρ_i :	Densidad del compuesto i
ω :	Factor acéntrico
δ_i :	Poder calorífico superior del compuesto i
C_p :	Capacidad calorífica
$C_nH_mO_l$:	Formula química del biodiesel
n :	Numero de átomo de carbono
m :	Numero de átomo de hidrogeno
l :	Numero de átomo de oxigeno
n_{ce} :	Número de moles estequiométrico de biodiesel
n_{ae} :	Número de moles de aire necesarios para la reacción estequiométrica
F_e :	Relación estequiometrica combustible-aire
F :	Relación combustible-aire
FR :	Riqueza o razón de equivalencia

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Hojas de Cálculo de Propiedades del biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>	104
Anexo B. Entorno de simulación en Scilab 5.2.1.....	109

RESUMEN

En la presente investigación se identificaron y compararon metodologías para caracterizar el biodiesel obtenido a partir de microalgas *Chlorella nativa* y para el cálculo de sus propiedades básicas como lo son: densidad, viscosidad, gravedad API, poder calorífico superior, número de cetano y capacidad calorífica según modelos reportados en la literatura científica, de esta forma se permitió valorar y comparar sus propiedades con el biodiesel de palma y el diesel. Además, se determinaron las emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* a partir de un balance de materia teórico y se expuso un método para simular el comportamiento de la combustión a altas temperaturas en función de la riqueza de biocombustible.

Partiendo del perfil de los ácidos grasos del aceite de microalgas *Chlorella nativa* obtenido por Alvear [1], se realizaron de forma teórica las reacciones de transesterificación, obteniendo los metil esteres que componen este tipo de biodiesel, para hacer los cálculos de las propiedades básicas usando las correlaciones reportadas. La determinación de las emisiones se realizó mediante un balance de masa teórico para cada elemento, obteniendo los porcentajes elementales del biodiesel y teniendo en cuenta la reacción estequiométrica de combustión.

Para la simulación del comportamiento de la combustión en relación a la riqueza de combustible, se utilizó la reacción de combustión estequiométrica, usando las proporciones molares de aire y la reacción de combustión no estequiométrica para 5 especies, relacionándolas entre sí, mediante la razón de equivalencia o riqueza (FR). Se usó el software Scilab 5.2.1 para valores de FR de 0.5 a 1.5 con una temperatura de, 518K, 718 K y 918K, por último se comparó con la simulación hecha por Molina para el biodiesel de palma a 718K[2].

Esta investigación arrojó resultados positivos para el biodiesel producido a partir de microalgas *Chlorella nativa*, desde el punto de vista ambiental dado que las emisiones de CO₂ y vapor de agua estimadas fueron menores que las del diesel y en cuanto a los

parámetros de calidad evaluados ya que estos se encontraron dentro del rango de aceptación de calidad de las normas ASTM D-6751 y de la EPA, para los parámetros evaluados.

Palabras Claves: Biodiesel, Microalgas *Chlorella nativa*, Emisiones del Biodiesel

ABSTRACT

In the present study, it was identified and compared correlations and methodologies to characterize the biodiesel from microalgae *Chlorella native* and for the calculation of their basic properties such as density, viscosity, API gravity, calorific value, cetane number and heat heating value, using validated and reported models, so were allowed to assess and compare their properties with the palm biodiesel and petroleum diesel. Also, were determined Emissions of biodiesel from microalgae *Chlorella native* from a theoretical material balance. A method to simulate the behavior of combustion at different temperatures depending on the wealth of fuel was showed.

Based on the fatty acid profile of *Chlorella native* oil obtained by Alvear [1], were performed theoretical transesterification reactions, the methyl esters obtained that compound this type of biodiesel, were used for calculation of the basic properties by the correlations and reported models. The determination of emissions was performed using a theoretical mass balance for each element, giving the element percentages of biodiesel and taking into account the stoichiometric combustion reaction.

For simulating the behavior of combustion in relation to the Fuel Richness was used the stoichiometric combustion reaction for 5 species relating to each other by reason of equivalence or Fuel Richness (FR). Thus the simulation was made using the Scilab 5.2.1 software for the compositions of microalgae *Chlorella native* biodiesel, FR values of 0.5 to 1.5 with a temperature of 518K, 718 K, and 918 K, finally compared with the simulation made by Molina with a temperature of 718 K [2].

This research showed positive results for biodiesel produced from microalgae *Chlorella native*, in terms of quality parameters and from the environmental point view, since the emissions of CO₂ and water vapor estimated were lower than diesel and quality parameters were within the acceptance range as ASTM D-6751 and EPA.

Key Words: Biodiesel Fuel, Microalgae, *Chlorella native*, Emissions of biodiesel

INTRODUCCIÓN

Los biocombustibles son una de las principales alternativas que la humanidad ha encontrado para mitigar problemas como: calentamiento global, smog fotoquímico y lluvias ácidas, causados por el uso excesivo de los combustibles fósiles; sin embargo, estos son criticados por el uso de productos alimenticios como materias primas y el uso de tierras cultivables para su producción, además, del aumento en la generación de contaminantes como los Óxidos Nitrosos (NO_x) [3]. Por tales razones, las investigaciones se han direccionado al estudio de las propiedades del biodiesel a partir de microalgas ya que, autores como Garibay y colaboradores [3]; Chisti [4], [5]; Loera-Quezada y colaboradores [6] afirman que este tipo de biodiesel soluciona estos problemas.

En la actualidad, existen estudios reportados en la literatura por autores como Molina [2], Quezada [7], Rodriguez y colaboradores [8], Ramirez-Verduzco y colaboradores [9], Channiwala y colaboradores [10], Ferdinand y colaboradores [11], Knothe y colaboradores [12], entre otros, que permiten estimar las propiedades fisicoquímicas y térmicas del biodiesel cuando es usado en motores de combustión interna y quemadores; sin embargo, se ha reportado poca información sobre el cálculo de estas propiedades utilizando biodiesel a partir de microalgas, teniendo conocimiento solo de investigaciones como la de Xu y colaboradores [13] y Miao y colaboradores [14], quienes reportan propiedades del biodiesel de una especie de microalgas *Chlorella*. El modelamiento de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles y sus productos de combustión, es una herramienta que permite realizar estimaciones bajo diferentes condiciones del proceso, ahorrando tiempo y recursos que se invierten en la experimentación directa.

En el presente trabajo, se partió de la información y los resultados generados por Alvear y colaboradores [1], que demostró los beneficios y la conveniencia de usar la microalga *Chlorella nativa* como materia prima para la generación de biodiesel en la región, mostrando los perfiles de los ácidos grasos del aceite de esta microalga; teniendo en cuenta estos resultados y mediante el uso de una variedad de ecuaciones empíricas y analíticas encontradas en la literatura se estimaron algunas propiedades fisicoquímicas y termofísicas,

que permitieron la predicción de la cantidad de gases generados por la combustión del biodiesel de microalgas *Chlorella Nativa*, elaborando una comparación analítica con el biodiesel de palma y el diesel de origen fósil, para mostrar un análisis del impacto ambiental del uso del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día, el mundo se enfrenta a numerosas crisis debido al consumo y producción de combustibles fósiles y biocombustibles de primera y segunda generación, por una parte los combustibles fósiles son los causantes principales de la contaminación atmosférica y del calentamiento global, sin dejar de lado el aumento progresivo de los precios de estos por los problemas políticos y la inestabilidad de los países en los que se concentran las principales reservas, así como la creciente dificultad de hallar nuevos yacimientos cuando el consumo actual rebasa la producción mundial. Por otra parte, se encuentra la problemática ocasionada por la utilización de productos alimenticios y el empleo de tierras para la producción de biodiesel; sumado a esto, se evidencian las altas emisiones de gases contaminantes, es por esto, que se hace necesaria la búsqueda de fuentes de energía limpia y sostenible que solucionen en gran medida los inconvenientes de contaminación asociados a los combustibles fósiles [3], [5], [6], [15], [16]; el problema de la seguridad alimentaria relacionada con los biocombustibles de primera generación [17] y el hecho que se prevé que los biocombustibles de segunda generación no podrían suplir la demanda energética mundial [4], [18].

En investigaciones como la realizada por Saidon [19], se ha reportado que el biodiesel de primera y segunda generación que se supone limpio, produce en algunos casos igual o mayor cantidad de emisiones que el diesel de origen fósil, disminuyendo la dependencia actual del petróleo pero generando inquietud global sobre el beneficio ambiental del uso de estos biocombustibles.

En la actualidad, una parte de la economía mundial se enfoca en la búsqueda de tecnologías relacionadas con la producción de energía independiente de los combustibles fósiles, que no utilicen alimentos para su producción, representen una disminución en las emisiones de gases tóxicos y que puedan satisfacer la demanda energética mundial [19]. De esta forma, se presenta el biodiesel de tercera generación, como es el producido a partir de las microalgas, el cual se estima soluciona los problemas del biodiesel de primera y segunda generación [4], [5].

Teniendo en cuenta la cantidad de tiempo y dinero que se invierte en el desarrollo experimental de las investigaciones con microalgas, se hace necesario realizar un primer estimativo mediante simulaciones de las emisiones producidas en la combustión del biodiesel a partir de microalgas; a fin de que, se pueda comparar con los resultados reportados en la literatura para el biodiesel de palma y el diesel de origen fósil; de forma que se pueda tantear si es factible o no la utilización de esta materia prima para la producción de biodiesel.

2. JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Estimar de manera teórica las emisiones generadas por la combustión del biodiesel a partir de microalgas representa un avance en materia investigativa no solo para la ciudad, sino también para la región y el país, teniendo en cuenta que esta es una tecnología reciente que ha arrojado numerosos resultados positivos a nivel mundial y que aún no se ha investigado a fondo su posible desarrollo en la región y específicamente en la ciudad de Cartagena.

Las investigaciones relacionadas con la implementación de fuentes de energía alternativa basadas en procesos sustentables, renovables y amigables con el ambiente que solucionen los problemas ocasionados por el aumento de la demanda energética, el agotamiento de los combustibles fósiles, el incremento del precio de estos y las dificultades ambientales causadas por los gases de efecto invernadero están dirigidas a la búsqueda de otras fuentes de energía, como por ejemplo: las microalgas, las cuales no necesitan grandes extensiones de tierras para cultivarlas y se pueden desarrollar en distintos ecosistemas como lo son desiertos, pantanos, lagos, lagunas, etc., capturando durante su crecimiento y desarrollo gran cantidad de CO₂ de la atmósfera [20].

Se ha determinado que la microalga *Chlorella nativa* es la cepa adecuada para la producción de aceite en la región con miras a la producción de biodiesel, demostrando mayor velocidad de crecimiento y reproducción, además de obtenerse mayor cantidad de aceite microalgal [1].

Las estimaciones teóricas simulan de una forma aproximada el comportamiento de un proceso real, permitiendo de esta forma hacer una predicción de este, con un presupuesto inferior al montaje experimental.

El cálculo de emisiones generadas a partir de la combustión del biodiesel de manera experimental requiere de inversión económica y de la disponibilidad de un laboratorio especialmente diseñado para esto, por tales razones, se propone hacer una estimación teórica de la cantidad de gases de combustión que emite el biodiesel producido a partir de microalgas *Chlorella nativa*, partiendo de los perfiles de ácidos grasos del aceite de esta

microalga, determinando las propiedades del aceite y el biodiesel, para comparar estas emisiones con las generadas por el biodiesel a partir de palma y el diesel de origen fósil, de manera, que se pueda conocer si resulta recomendable promover el desarrollo de esta tecnología en la región.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar la cantidad de gases de combustión generados por el biodiesel producido a partir de las microalgas *Chlorella nativa* mediante un balance de masa teórico.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar la composición del biodiesel obtenido a partir del aceite de las microalgas *Chlorella nativa* y sus propiedades básicas tales como densidad, viscosidad, capacidad calorífica y poder calorífico.
- Simular el proceso de combustión del biodiesel obtenido a partir de las microalgas *Chlorella nativa*.
- Comparar la generación de gases de combustión producidos por el diesel, el biodiesel de palma y el biodiesel de las microalgas *Chlorella nativa*.

4. MARCO DE REFERENCIAS

4.1 ANTECEDENTES

En las últimas décadas se ha evidenciado la necesidad de nuevas fuentes de energía donde los biocombustibles surgen como una solución al problema del calentamiento global y las altas emisiones de CO₂ (principal gas de efecto invernadero) así como, el agotamiento de los recursos no renovables, siendo estos una alternativa que además de económica va de la mano con la preocupación por el cuidado y conservación del ambiente.

La utilización de los biocombustibles líquidos es tan antigua como la de los mismos combustibles de origen fósil y los motores de combustión. Así, cuando ahora hace más de 100 años Rudolf Diesel diseñó el prototipo del motor diesel ya estaba previsto que funcionara con aceites obtenidos a partir de vegetales. De hecho, las primeras pruebas de este se hicieron a partir de estos aceites. El término biocombustible agrupa al conjunto de combustibles líquidos que provienen de las distintas transformaciones que ha sufrido la materia orgánica. Se pueden dividir en dos grupos básicos. Por una parte, encontramos los bioalcoholes, que provienen de la fermentación alcohólica de cultivos vegetales ricos en almidón y azúcares; por otra, los bioaceites derivados de diversos tipos de especies oleaginosas, así como también de la transformación de los aceites vegetales usados en frituras [21].

Hace algunos años se pensaba que no era rentable competir con el diesel del petróleo, pero el apoyo de los gobiernos y la investigación en el medio académico e industrial está haciendo que sea económicamente viable; por lo tanto, es importante continuar en la búsqueda de procesos y especies más eficientes no solo desde el punto de vista ambiental sino también en el aspecto económico [22].

El aceite de palma es una materia prima importante del biodiesel en las regiones tropicales de tierras bajas, sin embargo, la producción en grandes cantidades no es sostenible, ya que además de los debates de alimentos, hay problemas ambientales creados por el uso de este

como fuente de biodiesel, incluyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, la deforestación, la contaminación y la tasa de biodegradación [23].

Durante los últimos 50 años, se han realizado amplias investigaciones acerca de las microalgas y su utilización en una variedad de procesos industriales. El interés en el uso de microalgas para las energías renovables aumentó en 1970 durante la primera crisis del petróleo [24]. Las microalgas, consideradas como la tercera generación de materias primas para el biodiesel, se han convertido en una de las fuentes de lípidos más prometedoras debido a su alta eficiencia fotosintética para producir biomasa, sus tasas de crecimiento y la productividad en comparación con cultivos convencionales. Además de la reproducción rápida, son más fáciles de cultivar que muchos otros tipos de plantas y se obtiene un mayor rendimiento de aceite para la producción de biodiesel [23].

El Departamento de Energía de Estados Unidos financió de 1978 a 1996 un programa para desarrollar combustibles renovables a partir de algas. El objetivo principal del programa, denominado Programa de Especies Acuáticas, fue la producción de biodiesel a partir de algas con alto contenido de aceite, cultivadas en estanques al aire libre utilizando el CO₂ liberado de centrales termoeléctricas que usaban carbón como combustible. Aislaron más de 3,000 especies con especial interés en cepas productoras de lípidos; finalmente no se hizo ninguna recomendación en cuanto a la mejor especie, pero si se reportó que el rendimiento por área de aceite de microalga es aproximadamente 200 veces mayor que el máximo rendimiento de cualquier cultivo oleaginoso [25].

Se ha destacado que las microalgas representan una alternativa más conveniente que cualquier otro tipo de organismo para la producción de triacilglicéridos y su conversión a biodiesel [6], ya que algunas de estas especies oleaginosas, siendo organismos fotosintéticos, sólo requieren energía solar, agua, CO₂ y algunas sales para producir muy altos rendimientos de biomasa rica en lípidos [26]. De hecho, son los organismos fotosintéticos más eficientes. Algunas microalgas doblan su biomasa en 24 h y el tiempo de duplicación de biomasa durante la fase exponencial puede ser tan corto como 3.5 h [5].

Otras investigaciones también han reportado conclusiones similares, obteniéndose de esta forma, que las microalgas son una fuente para la producción de biodiesel eficiente gracias a que se utilizan normalmente para la captura de CO₂ mediante tres fuentes diferentes: una atmósfera de CO₂, las emisiones de CO₂ de las plantas de energía y procesos industriales, y CO₂ de carbonato soluble. Investigaciones como la de Brennan y colaboradores [17], han cuantificado el potencial de las microalgas para la captura de carbono biológico bajo las diferentes condiciones [17]. De esta forma, se han demostrado los posibles beneficios del reciclaje de CO₂ para la producción de la biomasa de microalgas, teniendo como resultado la reducción de las emisiones de CO₂ y de metano, gases de efecto invernadero [27]. También se han registrado menores partículas de SO_x y NO_x utilizando microalgas para la producción de biocombustibles y se ha demostrado que algunas especies de microalgas pueden ser capaces de crecer en medios que contienen grandes cantidades de CO₂, por ejemplo, se obtuvo que ciertas especies de *Chlorella* pueden crecer en una atmósfera de CO₂ de hasta un 40% (v / v) [28].

El alto costo de la tecnología de proceso y la falta de competitividad de los precios de la extracción de biodiesel a partir de microalgas en comparación con el diesel de petróleo son los principales obstáculos a la explotación comercial. La bio-mitigación de las emisiones de CO₂ ofrece una función complementaria que puede ser aprovechada para reducir los costos y permitir la utilización sostenible de las microalgas como fuente de biocombustibles [17].

El uso de la composición química y estructural para la determinación de propiedades físicas, termodinámicas y de transporte no es nuevo, su utilización data desde 1987 cuando se mostró como la estructura química puede ser utilizada para calcular propiedades para componentes puros [29], discutiéndose de esta forma las reglas de mezcla para estimar propiedades importantes.

Hace más de una década se desarrollaron y se probaron ecuaciones de mezcla usando datos de componentes puros para la predicción de la densidad, viscosidad, el número de cetano y el poder calorífico del biodiesel [30]. Así mismo, se propuso un modelo termodinámico para la determinación de viscosidades cinemáticas mediante la variación de la temperatura

[31]; por su parte otros investigadores correlacionaron el número de cetano en función de la instauración de los esteres de ácidos grasos [32].

De la misma forma se han utilizado modelos estadísticos y redes neuronales artificiales para predecir propiedades del biodiesel como viscosidad, poder calorífico superior e índice de cetano en función de la composición de esteres de ácidos grasos [33].

El impacto ambiental generado por los biocombustibles también ha sido modelado, investigadores como Torok [34], quien realizó una estimación teórica del impacto ambiental generado por las diferentes mezclas de etanol-gasolina y biodiesel-diesel basado en la producción de CO₂ y el oxígeno requerido para la combustión completa.

Autores como Xu y colaboradores [13] y Miao y colaboradores [14] produjeron un biodiesel a partir de microalgas *Chlorella protothecoides* y evaluaron sus propiedades más importantes; por su parte Hung Chen y colaboradores [35], reportaron las propiedades del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella protothecoides* y su mezclas con el diesel fósil.

Existen escasos reportes de estimaciones de propiedades del biodiesel a partir de microalgas en Colombia, la gran mayoría de las investigaciones que se han llevado a cabo se han realizado en Asia, encontrándose reportes de 3 investigaciones importantes, lo cual justifica el presente trabajo.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Biodiesel

El biodiesel se puede definir de acuerdo con la ASTM (American Society for Testing and Materials), como un mono-alkil éster de cadenas largas de ácidos grasos, provenientes de aceites vegetales o grasas animales, este es usado en motores diesel como combustible. “Bio” representa la fuente biológica y “diesel” implica que es usado como combustible [36]. En la Tabla 1. Se pueden observar las características y propiedades de éste con respecto con respecto al diesel según las normas de la ASTM.

Tabla 1. Características y propiedades del diesel y el biodiesel según los estándares ASTM

Propiedad	Diesel	Biodiesel
Estándar	ASTM D975	ASTM D6751
Composición	HC ^a (C10-C21)	FAME ^b (C12-C22)
Viscosidad Cinemática (mm ² /s) a 313 K	1.9 -4.1	1.9 -6.0
Gravedad Especifica (g/ml)	0.85	0.88
Punto de Inflamación (K)	333-353	373-443
Punto de Fluidez (K)	238-258	258-289
Agua (wt%)	0.05	0.05
Carbono (wt%)	87	77
Hidrogeno (wt%)	13	12
Oxigeno (wt%)	0	11
Azufre (wt%)	0.05	0.05
Número de Cetano	40-55	48-60

^a Hidrocarburos, ^b Fatty Acid metil éster

Fuente: Adaptado de la referencia [24]

Su producción típica es por medio de una reacción de transesterificación utilizando aceite vegetal o animal, alcohol, generalmente metanol o etanol, siendo el mas común el proceso con metanol ya que este es de menor costo, en presencia de un catalizador ácido o básico, como se muestra en la Figura 1 [37], los cuales aceleran en gran manera la reacción de forma que se pueda alcanzar el equilibrio; la elección del catalizador es de suma importancia en las reacciones de transesterificación ; el proceso catalizado por ácidos

preferiblemente sulfónico y sulfúrico generan mayor cantidad de alquil ésteres, pero las reacciones son lentas y requieren temperaturas superiores a los 100°C; por otra parte, el proceso catalizado por bases preferiblemente el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio, es mas utilizado en la industria debido a que los catalizadores alcalinos son menos corrosivos que los ácidos y las reacciones de transesterificación se llevan a cabo en un menor tiempo [38].

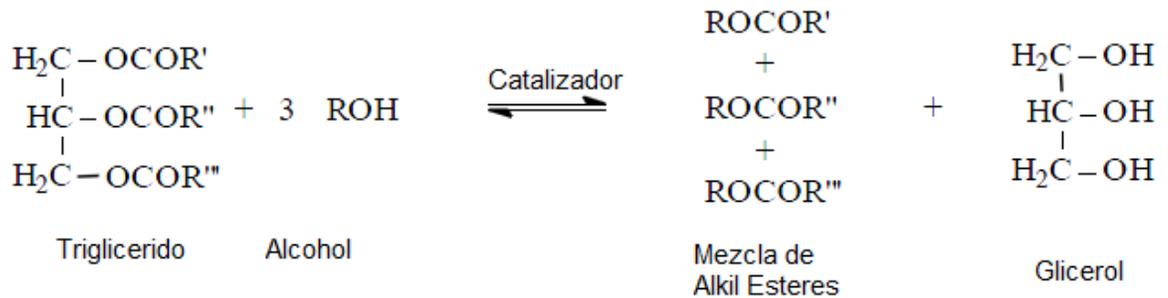


Figura 1. Transesterificación de Aceites Vegetales para la producción de biodiesel

Fuente: Adaptado de la referencia [38]

Mecanismo de Reacción de la Transesterificación de Aceites Vegetales para la producción de biodiesel en un medio básico

Para el mecanismo de reacción de transesterificación bajo un catalizador básico, el primer paso (1) es la reacción entre el catalizador y el alcohol para producir un alcóxido y el catalizador protonado. El ataque nucleófilo del alcóxido sobre el grupo carbonilo del triglicérido genera un tetraedro como intermedio (2), del que se genera una molécula de éster de ácido graso y el correspondiente anión del diglicérido (3). El último paso (4) es la desprotonación del catalizador regenerándose y reaccionando con otra molécula de alcohol y comenzando el ciclo nuevamente. Los di- y monoglicéridos se convierten en una mezcla de ésteres de ácidos grasos y glicerina por el mecanismo descrito [39]. El mecanismo de reacción de transesterificación bajo la acción de un catalizador básico se muestra en la Figura 2.

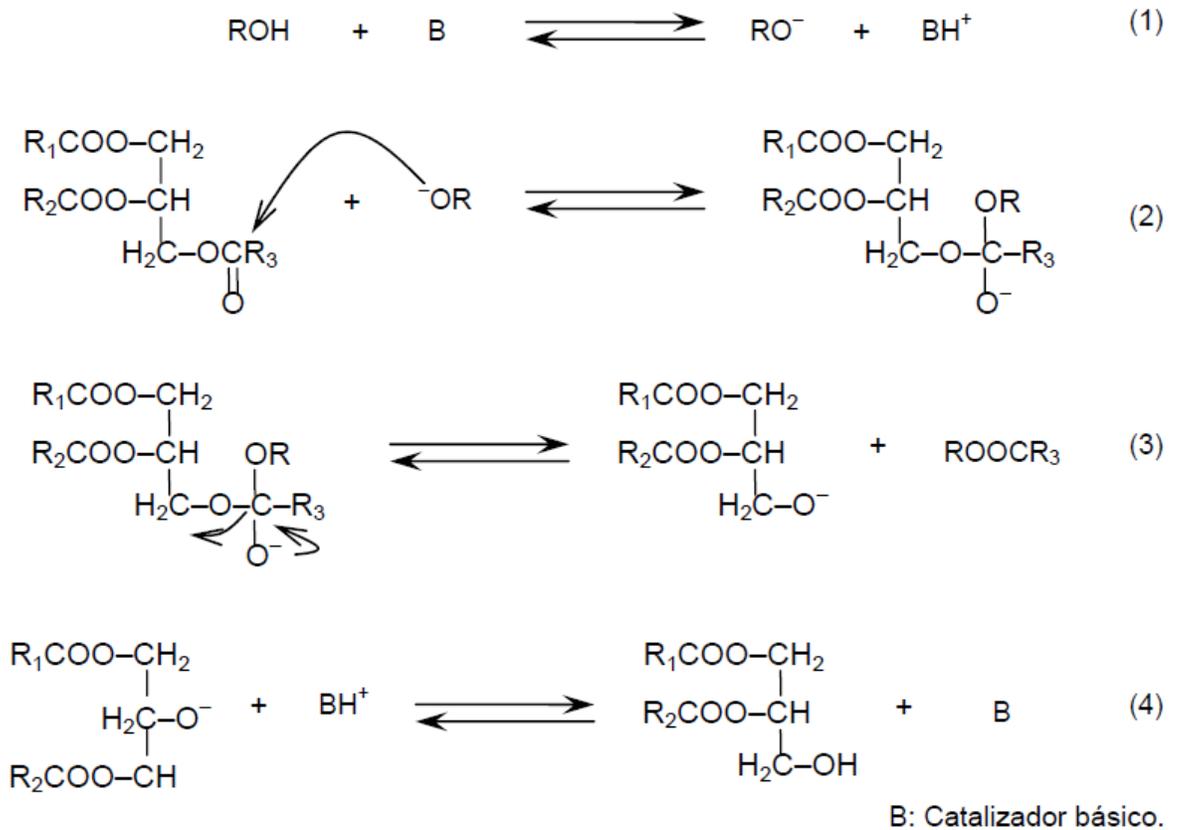


Figura 2 Mecanismo de reacción de transesterificación en un medio básico
Fuente: adaptado de [39].

El biodiesel es similar al diesel en sus principales características tales como número de cetano, contenido de energía, la viscosidad y los cambios de fase. El biodiesel no contiene productos derivados del petróleo, pero es compatible con el diesel, por lo que se pueden elaborar mezclas en cualquier proporción, creando de esta forma mezclas estables. Por lo tanto, el biodiesel se ha convertido en uno de los biocarburantes más comunes en el mundo [37].

4.2.2 Materias Primas Para la Producción de Biodiesel

Las materias primas para la producción de biodiesel se pueden clasificar de dos maneras: según sus fuentes, como se muestra en la Figura 3. De las cuales las más utilizadas son: el aceite de colza, aceite de canola, aceite de soja, aceite de girasol y aceite de palma, siendo

el aceite de soja y colza los más empleados en la producción de biodiesel en Estados Unidos y Europa [40]; y según su evolución, en tres generaciones:

Aceites Vegetales	Aceites No-Comestibles	Grasa Animal	Otras Fuentes
<ul style="list-style-type: none"> • Soya • Colza • Cebada • Coco • Semilla de Algodón • Cacahuete • Avena • Arroz • Trigo • Sorgo 	<ul style="list-style-type: none"> • Almendra • Babassu • Jatrofa • Aceite de Jojoba • Laurel • Semilla de Tabaco • Palma • Planta de Caucho • Linaza 	<ul style="list-style-type: none"> • Manteca de Cerdo • Sebo • Grasa de Ave • Aceite de Pescado 	<ul style="list-style-type: none"> • Bacterias • Algas • Hongos • Microalgas • Terpenos • Latex • Aceite de Cocina

Figura 3. Fuentes de Aceites reportadas para la producción de Biodiesel

Fuente: Adaptado de la referencia [18]

a. Materias primas de primera generación

La colza, la soja, el aceite de palma y el girasol se consideran como materias primas de primera generación del biodiesel, porque ellos fueron los primeros cultivos en ser utilizados para producir biodiesel. Debido a que más del 95% de este tipo de biodiesel está hecho de aceites comestibles, el uso de estas fuentes de biodiesel de primera generación ha originado numerosos problemas, principalmente debido a su impacto en los mercados mundiales de los alimentos y la seguridad alimentaria [17]. Grandes porciones de tierra fueron necesarias para producir la primera generación de cultivos para biocombustibles de forma que pudiera contribuir significativamente a la demanda de combustible del mundo, lo que creó graves desequilibrios ecológicos. En algunos países de todo el mundo se comenzaron a talar los bosques para fines de plantación, por lo tanto, el uso de estas materias primas podría causar deforestación en países tropicales como Malasia e Indonesia, que representan alrededor del 80% de la producción mundial de aceite de palma [23].

Entre las materias primas más utilizadas de primera generación se tiene:

- Aceite de Palma

Es un aceite muy productivo obtenido del mesocarpio de la fruta de la palma *Elaeis (E. guineensis)*, el aceite de palma es saturado solamente en un 50% y se encuentra conformado por ácidos grasos, contiene cerca del 97 % de triglicéridos siendo los ácidos grasos de mayor importancia el ácido palmítico y el oleico [41].

- Aceite de Soya

La semilla de soya contiene un 20% de aceite y un 35% de proteína es el aceite de mayor producción mundial, siendo sus mayores productores Brasil, Estados Unidos y Argentina. El aceite está formado en su mayor parte por ácidos grasos polinsaturados siendo el ácido graso predominante el ácido linoléico, con una composición de 49,8 -57,1% [42], [43].

- Aceite de Girasol

El aceite de girasol es un aceite comestible que se obtiene de la semilla. Algunas variedades contienen hasta en 45% de aceite. En el aceite de girasol convencional, el triglicérido mayoritario es el Linoléico, que representa alrededor de un tercio del total [44].

- Aceite de Semilla de Colza

El aceite de colza se obtiene de dos especies vegetales, *Brassica napus* y *Brassica rapa (Brassica campestris)*, el aceite de colza es un aceite muy insaturado, y con elevados contenidos de ácido linoléico, y por lo tanto muy sensible a la oxidación [45].

b. Materias primas de segunda generación

Se conocen como materias primas de segunda generación, todas las fuentes alternativas de biocombustibles que no ponen en riesgo la seguridad alimentaria [23], entre los que se destacan los cultivos energéticos como la jatropha, mahua, el aceite de jojoba, las semillas de tabaco, el aceite de salmón y el mango del mar. Los aceites de cocina usados, la grasa de los restaurantes y las grasas animales, tales como cebo de vaca y manteca de cerdo [46], también se consideran materias primas de segunda generación.

A pesar que las materias primas de segunda generación no suelen afectar a la cadena alimentaria humana y se pueden cultivar en terrenos baldíos, no son lo suficientemente abundante para remplazar la mayor parte de los combustibles usados para el transporte. Otra desventaja de biodiesel derivado de aceites vegetales y grasas animales es su rendimiento relativamente bajo a temperaturas frías. Además, la mayoría de las grasas de origen animal contienen una mayor cantidad de ácidos grasos saturados, lo que hace difícil la transesterificación, dando lugar a problemas en el proceso de producción [18]. Entre las materias primas más utilizadas de segunda generación, se tiene:

- Jatrofa

Esta planta es una oleaginosa de porte arbustivo, perteneciente a la familia de las Euforbiáceas, que tiene más de 3500 especies agrupadas en 210 géneros. Sobrevive y crece en las tierras marginales, erosionadas y agotadas. Necesita poca agua para crecer, ya que con 300 L al año es suficiente, aunque tampoco le molestan las lluvias copiosas de hasta 1800 L por año. Su semilla contiene un 40% de aceite; contiene mayor cantidad de ácidos grasos insaturados que los aceites de oliva, palma y ricino e igual cantidad que el aceite de cacahuete y menor que el aceite de maíz. Este aceite no tiene aplicaciones para la industria alimentaria por lo que su único uso es el industrial [47].

- Jojoba

El arbusto es originario del desierto de sonora en México, la jojoba lo que produce es una cera líquida y no un aceite como le llamamos comúnmente, la semilla tiene cerca de 45% de contenido de cera líquida, requiere de 3000 a 4500 m³/ha de agua al año [48]; Este es un cultivo adaptado a crecer, desarrollarse y producir en terrenos completamente desérticos y marginales. Es poco exigente en relación a las lluvias requiriéndose una pluviometría anual de 275 mm a 350 mm, para desarrollarse y producir perfectamente bien. Esta pluviometría es característica de las zonas desérticas de California y Arizona en E. U. y Baja California en México, donde se cultiva ésta planta desde hace muchos años [49].

- Aceite de Frituras

El aceite de fritura usado, es una de las alternativas con mejores perspectivas en la producción de biodiesel, ya que es la materia prima más barata, y con su utilización se evitan los costes de tratamiento como residuo. Por su parte, los aceites usados presentan un bajo nivel de reutilización, por lo que no sufren grandes alteraciones y muestran una buena aptitud para su aprovechamiento como biocombustible [50].

c. Materias primas de tercera generación

La tercera generación de materias primas de biodiesel, son las derivadas a partir de microorganismos; bacterias, hongos, levaduras y microalgas, las últimas se han convertido en una de las fuentes más prometedoras de los lípidos para su uso en la producción de biodiesel, debido a su alta eficiencia fotosintética para producir biomasa, sus tasas de crecimiento y la productividad en comparación con los cultivos convencionales [16].

- Microalgas

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos procariotas o eucariotas, que pueden crecer rápidamente debido a su estructura unicelular o multicelular simple. Las microalgas están presentes en todos los ecosistemas de la tierra existente, acuática y terrestre, lo que representa una gran variedad de especies que viven en una amplia gama de condiciones ambientales. Se estima que más de 50.000 especies existen, pero sólo un número limitado de alrededor de 30.000, han sido estudiadas y analizadas [16].

Muchos informes de investigación y artículos describen numerosas ventajas de la utilización de microalgas para la producción de biodiesel en comparación con otras materias primas disponibles [1], [23], [6], [5], [17], [3]. Desde el punto de vista práctico, son fáciles de cultivar, puede crecer con poca o ninguna atención, utilizando agua no apta para el consumo humano y fácil obtención de sus nutrientes.

Las microalgas se reproducen así mismas, utilizando la fotosíntesis para convertir la energía solar en energía química, completando un ciclo de crecimiento en pocos días. Además pueden crecer en casi cualquier lugar, requiriendo la luz solar y algunos nutrientes

simples, aunque las tasas de crecimiento se pueden acelerar mediante la adición de nutrientes específicos y aireación suficiente [16].

Las diferentes especies de microalgas pueden ser adaptadas para vivir en una variedad de condiciones ambientales. Por lo tanto, es posible encontrar especies que se adapten mejor a los entornos locales o con características específicas de crecimiento, lo cual no es posible hacerlo con otras materias primas de biodiesel actuales (por ejemplo, aceite de soja, colza, girasol y palma) [16].

Ellas tienen mayores tasas de crecimiento y productividad en comparación con el sector forestal convencional, los cultivos agrícolas, y otras plantas acuáticas, lo que requiere un área menor de tierra, que otras materias primas del biodiesel de origen agrícola, hasta 49 o 132 veces menos en comparación con los cultivos de la colza o la soja, para un 30% (w / w), del contenido de aceite en la biomasa de algas [4]. Por lo tanto, la competencia por el suelo cultivable con otros cultivos, en particular para el consumo humano, se reduce considerablemente.

Las microalgas pueden proporcionar materia prima para diversos combustibles renovables como el biodiesel, metanol, hidrógeno, etanol, entre otros. El biodiesel de microalgas no contiene azufre y su desempeño es similar al diesel, mientras reduce las emisiones de material particulado, CO, hidrocarburos, y SOx. Sin embargo, se ha comprobado que las emisiones de NOx pueden ser más altas en algunos tipos de motores [28].

La utilización de microalgas para la producción de biocombustibles también puede servir para otros fines. Algunas de las posibilidades que actualmente se están considerando se muestran a continuación:

- La eliminación del CO₂ de los gases de combustión industriales por la bio-fijación de algas [51], la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) una empresa o proceso, mientras se produce de biodiesel.
- Tratamiento de aguas residuales mediante la eliminación de NH₄, NO₃, PO₄, haciendo que las algas crezcan usando estos contaminantes en el agua como nutrientes [51].

- Después de la extracción de aceite, la biomasa de algas resultante puede ser procesada en etanol, metano, para la alimentación del ganado, como abono orgánico, debido a su alta relación N:P, o simplemente quemada para la cogeneración de energía (electricidad y calor) [51].
- En combinación con su capacidad para crecer bajo condiciones extremas y sus necesidades reducidas de nutrientes, se pueden cultivar en zonas no aptas para fines agrícolas, independientemente de los cambios climáticos estacionales, por lo tanto, no compiten por el uso de la tierra cultivable, pueden utilizar las aguas residuales como medio de cultivo y no requieren el uso de agua dulce.
- Dependiendo de las especies de microalgas, otros compuestos también pueden ser extraídos con aplicaciones valiosas en diferentes sectores industriales, incluyendo una amplia gama de productos químicos finos y a granel, tales como grasas, ácidos grasos poli insaturados, aceites, colorantes naturales, azúcares, pigmentos, antioxidantes, compuestos bioactivos de alto valor, otros productos químicos finos y la biomasa [52], [15].

Muchas especies de microalgas pueden ser inducidas a acumular cantidades sustanciales de lípidos [53], contribuyendo así a un alto rendimiento de aceite. El contenido en lípidos promedio varía entre el 1 y el 70%, pero bajo ciertas condiciones algunas especies pueden alcanzar el 90% en peso seco [4], [24], [15], [54].

Como se muestra en la Tabla 2, el contenido de aceite en las microalgas puede llegar a 75% en peso de la biomasa seca, pero asociado con productividades bajas (por ejemplo para *Botryococcus braunii*). Las algas más comunes (*Chlorella*, *Cryptocodinium*, *Dunaliella*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Nannochloropsis*, *Neochloris*, *Nitzschia*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Schizochytrium*, *Tetraselmis*) tienen niveles de aceite entre el 20 y el 50%, pero se pueden alcanzar mayores productividades.

Tabla 2 Contenido de Lípidos y Productividades de Diferentes Especies de Microalgas

Especies de Microalgas Marinas y de Agua Dulce	Contenido de Lípidos (% peso seco)	Productividad de Lípido (mg/L/día)	Productividad de Área de Biomasa (g/m ² /día)
<i>Botryococcus braunii</i>	25,0 - 75,0	0,02	3,0
<i>Chlorella</i>	18,0 – 57,0	18,7	3,5 – 13,9
<i>Cryptocodinium Cohnii</i>	20,0 - 51,1	10	-
<i>Dunaliella Salina</i>	6,0 -25,0	116,0	1,6-3,5 / 20-38
<i>Dunaliella Sp.</i>	17,5-67,0	33,5	-
<i>Isochrysis sp.</i>	7,1-33,0	37,8	-
<i>Nannochloris sp.</i>	20,0-56,0	60,9-76,5	
<i>Nannochloropsis sp.</i>	12,0-53,0	37,6-90,0	1,9-5,3
<i>Nitzschia sp.</i>	16,0-47,0		8,8-21,6
<i>Phaeodactylum Tricomutum</i>	18,0-57,0	44,8	2,4-21
<i>Porphyridium Cuentum</i>	9,0-18,8/60,7	34,8	25
<i>Chlorella Nativa [1]</i>	40,23	39,67	

Fuente: Adaptado de la referencia [16]

En la Tabla 3. Se puede observar una comparación de las microalgas con diferente contenido de aceite con otras fuentes para la obtención del biodiesel.

Tabla 3. Comparación de las microalgas con otras materias primas para la producción de biodiesel

Planta de Origen	Contenido de Aceite (% aceite x peso en biomasa)	Rendimiento de Aceite (L aceite/ha año)	Tierra Usada (m ² año/kg biodiesel)	Productividad de Biodiesel (kg biodiesel/ha año)
Maíz (<i>Zea mays L.</i>)	44	172	66	152
Cáñamo (<i>Cannabis sativa L.</i>)	33	363	31	312
Soya (<i>Glycine max L.</i>)	18	636	18	562
Jatrofa (<i>Jatropha curcas L.</i>)	28	741	15	656
Canola/Colza (<i>Brassica napus L.</i>)	41	974	12	862
Girasol (<i>Helianthus annuu L.</i>)	40	1070	11	946
Ricino (<i>Ricinus Communis</i>)	48	1307	9	1156
Aceite de Palma (<i>Elaeis guineensis</i>)	36	6366	2	4747
Microalgas (30% wt Aceite)	30	58700	0,2	51927
Microalgas (50% wt Aceite)	50	97800	0,1	86515
Microalgas (70% wt Aceite)	70	136900	0,1	121104

Fuente: Adaptado de la referencia [16]

En la Figura 4. Se puede observar una comparación de la productividad reportada para el biodiesel producido a partir de microalgas con diferentes porcentajes de aceite, con respecto a diferentes materias primas.

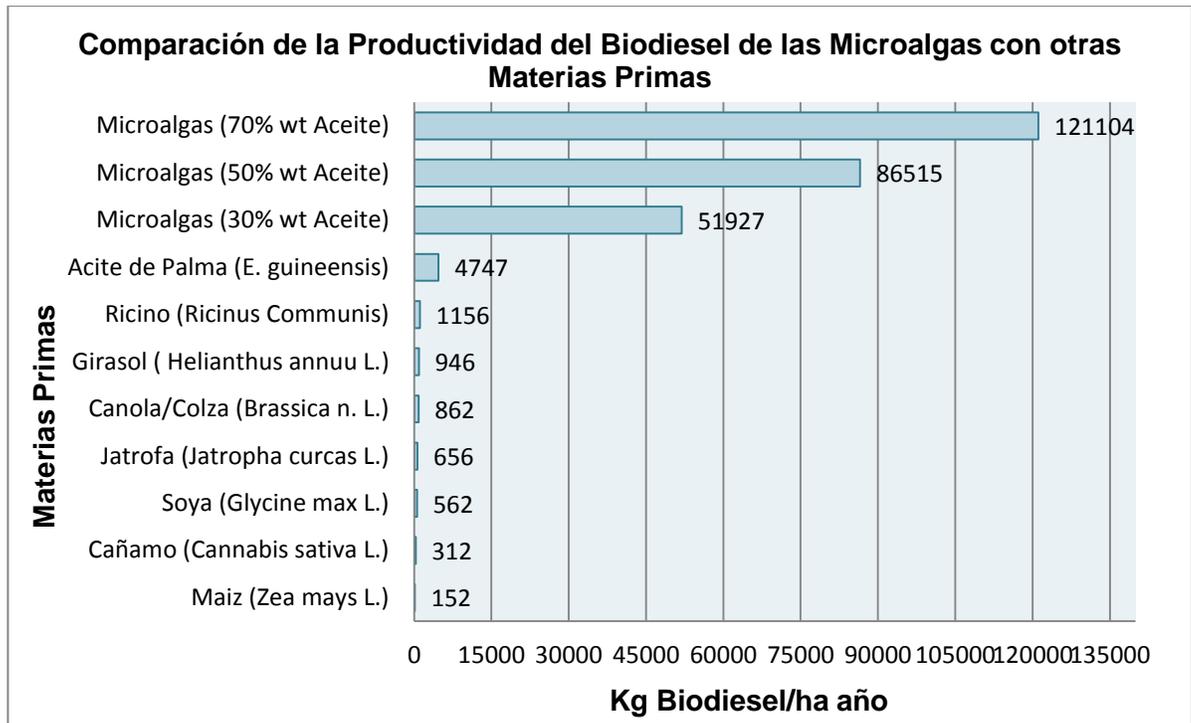


Figura 4. Productividad del Biodiesel de diferentes Materias Primas
Fuente: Adaptado de la referencia [16]

4.2.3 Principales Propiedades y Parámetros de Calidad

La calidad del biodiesel generalmente se controla a través de los parámetros físicos y químicos establecidos por las normas técnicas aprobadas por cada nación. El número de cetano, la viscosidad, la densidad y el poder calorífico superior son propiedades importantes que afectan la utilización del biodiesel, porque están involucrados en la definición de la calidad del combustible y se requieren como datos de entrada para modelos predictivos de motores de combustión. Las propiedades y parámetros de calidad más importantes se mencionan a continuación:

a. Viscosidad

La viscosidad dinámica es una propiedad por medio de la cual los fluidos ofrecen resistencia a los esfuerzos tangenciales que tienden a deformarlo. El biodiesel tiene generalmente mayor viscosidad que el diesel. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en Pa.s (Pascal por segundo) [55].

La viscosidad cinemática está definida como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad y se expresa en Stokes, ésta una propiedad fundamental para los combustibles que se utilizan en motores de encendido por compresión o motores diesel, ya que influye directamente en el funcionamiento de los inyectores y por lo tanto en el proceso de formación de chorro y su posterior atomización. El tamaño de las gotas tiene una elevada influencia tanto sobre la rapidez con la que ocurre el proceso de combustión como sobre la calidad del mismo. Altas viscosidades del combustible han sido relacionadas con aumentos en la opacidad de los humos [56].

Teniendo en cuenta la definición de la viscosidad, se tiene que entre más resistencia crea el líquido, más alta es la viscosidad, y entre más viscoso sea el aceite, más consumo de combustible, más temperatura y más esfuerzo hará el motor; mientras que si esta es muy baja no va a proveer lubricación hidrodinámica, por lo que el motor se va a gastar con mayor rapidez.

Muchos autores han hecho estudios para desarrollar modelos predictivos de la viscosidad entre estos se destacan los más utilizados (Tabla 4):

Tabla 4. Modelos Predictivos más utilizados para el cálculo de la Viscosidad

Modelo y/o Autor	Ecuación	Descripción
Lineal [29]	$\mu_m = \sum x_i \mu_i \quad Ec 4.1$	μ_m = viscosidad de la mezcla (kg/m.s) μ_i = es la viscosidad de cada compuesto (kg/m.s)
Logarítmico; Arrhenius [57]	$\log \mu_m = \sum x_i \log \mu_i \quad Ec 4.2$	x_i = es la fracción molar del componente i en la mezcla
Bingham [58]	$\frac{1}{\mu_m} = \sum \frac{x_i}{\mu_i} \quad Ec 4.3$	
Kendall y Monroe [59]	$(\mu_m)^{1/3} = \sum x_i (\mu_i)^{1/3} \quad Ec 4.4$	
Clements [30]	$\ln \mu_m = \sum x_i^3 \sqrt{\ln(\mu_i)} \quad Ec 4.5$	
Cheenkachorn [33]	$\mu = 1,82 - 55,3(C18:3)^2 - 10,3 (C18:1)^2 + 5,11(2C18:1) + 0,162(4C18:2) + 4,95(C22:1) \quad Ec 4.6$	Solo los ácidos grasos insaturados influyen en la viscosidad del biodiesel
Ramírez-Verduzco y colaboradores [9]	$f_m = \sum_i^n z_i \cdot f_i \quad Ec 4.7$ $\ln \mu_i = -12,503 + 2,496 \ln M_i - 0,1178 N \quad Ec 4.8$	μ_i = viscosidad cinemática del ácido graso i a 40°C (mm ² /s) M_i = peso molecular del ácido graso i N = el número de dobles enlaces en un ácido graso dado.
Krisnangkura y colaboradores [31]	$\mu_i = 1,05 \times 10^{-4} M^2 - 0,024 M + 2,15 \quad Ec 4.9$ $\ln \mu = \sum_i^n y_i \ln \mu_i \quad Ec 4.10$	M = es el peso molecular del ácido graso. y_i = Fracción molar del ac.gr.

Fuente: Adaptado de las referencias [14],[15],[18],[47],[48] y [50]

b. Densidad

La densidad se define como la masa por unidad de volumen. En los líquidos el volumen varía con la temperatura, lo mismo ocurre con su densidad. Para mezclas líquidas no se puede calcular como un simple promedio de las densidades de los componentes. En el Sistema Internacional se encuentra en unidades de [kg/m³]. En los líquidos el volumen varía mucho con la temperatura y poco con la presión, asimismo varía la densidad por lo que debe especificarse la temperatura con la que se mide.

La densidad da idea del contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican una energía térmica mayor, por lo tanto menor consumo de combustible.

En la literatura se encontraron diversas correlaciones para el cálculo de esta propiedad, entre las más destacadas se tienen:

- Ecuación de Rackett Modificada [60]:

$$\rho^b = \frac{P_c \times M}{RT_c Z_{RA} \left(1 + (1 - T_r)^{2/7}\right)} \quad \text{Ec 4.11}$$

Dónde:

ρ^b = densidad molar de la mezcla en el punto de ebullición, P_c = presión crítica de la mezcla, T_c = temperatura crítica de la mezcla, T_r = temperatura reducida de la mezcla, Z_{RA} = constante de Rackett y R = constantes universal de los gases ideales.

De aquí que:

$$P_c = \sum_{i=1}^n P_{ci} x_i \quad \text{Ec 4.12}$$

$$T_c = \sum_{i=1}^n T_{ci} x_i \quad \text{Ec 4.13}$$

$$Z_{RA} = \sum_{i=1}^n Z_{RAi} x_i \quad \text{Ec 4.14}$$

- Ramírez-Verduzco y colaboradores [9]:

$$\rho_i = 0,8463 + \frac{4,9}{M_i} + 0,0118 \quad \text{Ec 4.15}$$

Donde ρ_i es la densidad a 20°C del i-esimo acido graso en g/cm³, M_i =peso molecular del acido graso i, N =el numero de dobles enlaces en un acido graso dado. Usando la siguiente regla de mezcla:

$$f_m = \sum_{i=1}^n z_i \cdot f_i \quad \text{Ec 4.16}$$

Donde f se refiere a la propiedad, en este caso la densidad.

- Yamada y Gunn [61]:

$$\rho(288,15K) = \rho(T)(0,29056 - 0,08775\omega) \times \left[\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^{2/7} - \left(1 - \frac{288,15}{T_c}\right)^{2/7} \right] \quad Ec 4.17$$

Para temperaturas mayores que la temperatura crítica. En esta ecuación se incluye el factor acéntrico ω .

- Lapuerta y colaboradores [62]:

$$\rho_B(15^\circ C) = \rho_B(T) + a(T - 15), \quad T \text{ en } ^\circ C \quad Ec 4.18$$

$$a = \frac{7,536}{\ln n + 3,584} - 0,446 \quad Ec 4.19$$

Donde n es el largo de cadena.

c. Poder Calorífico Superior (High Heating Value) HHV

El poder calorífico superior (HHV) es una propiedad importante que caracteriza el contenido energético de un combustible, ya sea sólido, líquido o gaseoso; esta propiedad es especialmente importante para los aceites vegetales y el biodiesel.

Los autores Channiwala y Parikh [10], mostraron una recopilación de modelos propuestos por diferentes autores, el HHV está expresado en MJ/kg y las composiciones en porcentaje másico, parte de esta recopilación se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Algunas Correlaciones para Estimar el Poder Calorífico Superior HHV

Autor	Correlación
Dulong's [63]	$HHV = 0,3383C + 1,443 \left(H - \left(\frac{O}{8} \right) \right) + 0,0942 S$ <i>Ec 4.19</i>
Strache y Lant [64]	$HHV = 0,3406 C + 1,4324 H - 0,1532 O + 0,1047 S$ <i>Ec 4.20</i>
Streuer [65]	$HHV = 0,3391 \left(C - \left(\frac{3}{8} O \right) + 0,2386 \left(\left(\frac{3}{8} O \right) + 1,444 \left(H - \left(\frac{1}{16} O \right) \right) + 0,1047 S \right)$ <i>Ec 4.21</i>
Schuster [66]	$HHV = (1,0632 + 1,486 \times 10^{-3} O) \left[\frac{\frac{C}{3} + H - (O - S)}{8} \right]$ <i>Ec 4.22</i>
Gumz [67]	$HHV = 0,3403 C + 1,2432 H + 0,0628 N + 0,1909 S - 0,0984 O$ <i>Ec 4.23</i>
IGT [68]	$HHV = 0,341C + 1,323H + 0,0685 - 0,0153A - 0,1194(O + N)$ <i>Ec 4.24</i>
Jenkins y colaboradores [69]	$HHV = -0,763 + 0,301C + 0,525H + 0,0640$ <i>Ec 4.25</i>
Beckman y colaboradores [70]	$HHV = 0,352 C + 0,944 H + 0,105 (S - O)$ <i>Ec 4.26</i>

Fuente: Adaptado de la referencia [10]

Luego de analizar y evaluar los modelos anteriores Channiwala y Parikh [10] propusieron un modelo unificado:

$$HHV = 0,3491 C + 1,1783 H + 0,1005 S - 0,0151 N - 0,0211 A \quad Ec 4.27$$

Donde C es el porcentaje en peso de carbono, H es el porcentaje en peso de hidrógeno, O es el porcentaje en peso de oxígeno, S es el porcentaje en peso de azufre, N es el porcentaje en peso de nitrógeno y A corresponde al porcentaje de cenizas.

Ferdinand y colaboradores [11] por su parte propusieron una correlación basándose en el hecho de que los aceites vegetales y el biodiesel son mayormente una mezcla de ácidos grasos, los cuales presentan la siguiente fórmula química $C_xH_yO_z$, por lo tanto, tenemos las siguientes ecuaciones para estimar el poder Calorífico Superior:

$$HHV = \frac{100(THV)}{T_{FA}} \quad Ec\ 4.28$$

$$THV = \sum(HV_i) \quad Ec\ 4.29$$

$$HV_{(C_x, H_y, O_z)} = 34,03x + 121,64y - 12,54z \quad Ec\ 4.30$$

$$HV_i = x_i HV_{(C_x, H_y, O_z)_i} \quad Ec\ 4.31$$

$$T_{FA} = \sum x_i \quad Ec\ 4.32$$

Por otro lado Ramírez-Verduzco y colaboradores [9] propone un método similar basándose en los metil ésteres presentes en el biodiesel:

$$\delta_i = 46,19 - \frac{1794}{M_i} - 0,21N \quad Ec\ 4.33$$

Donde δ_i es el poder calorífico superior del ácido graso i , M la masa molecular y N el número de dobles enlaces, al igual que las otras correlaciones propuestas por Ramírez-Verduzco y colaboradores [9] se utiliza la regla de mezcla presentada en la Ec 4.16.

d. Número de Cetano

El número de cetano mide la calidad de ignición de un combustible diesel. Un alto número de cetano indica un menor retraso en la ignición, ayuda a un mejor arranque del motor y minimiza la emisión de humo al lograr una combustión más suave [71].

Cheenkachorn [33], propone la siguiente expresión para estimar el número de cetano del biodiesel en función del contenido de ácidos grasos:

$$CN = 33,6 + 0,539(C18:0) + 0,303(C18:1) + 0,0878(C18:2) + 0,233(C22:1) \quad Ec\ 4.33$$

Por su parte Ramírez-Verduzco y colaboradores [9], propone el cálculo del número de cetano para cada metil Ester teniendo en cuenta los metil ésteres presentes en el biodiesel, de la siguiente forma:

$$CN_i = -7,8 + 0,302M_i - 20 \quad Ec\ 4.34$$

De aquí, utilizando la regla de mezcla ideal se puede calcular el número de cetano de la mezcla.

e. Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica es la energía necesaria para aumentar una unidad de temperatura de una determinada sustancia, Indica la mayor o menor dificultad que presenta dicho cuerpo para experimentar cambios de temperatura bajo el suministro de calor. Puede interpretarse como una medida de inercia térmica.

La eficacia del combustible o capacidad calorífica, se mide normalmente en términos de energía térmica (calor) desarrollada cuando una cantidad dada del combustible se quema bajo condiciones estándar o patrón. Las capacidades caloríficas de los combustibles sólidos y líquidos se miden en unidades de energía por unidades de masa o volumen por unidades de temperatura.

4.2.4 Emisiones del Biodiesel

a. Monóxido de Carbono (CO)

Es un gas o líquido tóxico e incoloro que prácticamente no tiene olor ni sabor. Se produce como consecuencia de la oxidación incompleta del carbón en la combustión [72]. La emisión durante la combustión del biodiesel en motores diesel es del orden del 50% inferior, comparada con aquella que produce el mismo motor con combustible diesel.

b. Material Particulado

De acuerdo con la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) [72], el material particulado es una mezcla compuesta por partículas extremadamente pequeñas y gotas líquidas que se encuentran suspendidas en el aire. Sus impactos en la salud están determinados por la capacidad de penetrar en las vías respiratorias. La contaminación del aire por partículas se compone principalmente de especies tales como nitratos, sulfatos, carbono orgánico, carbono elemental, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP's) y metales como el silicio, calcio, zinc, plomo, cadmio,

hierro entre otros [73]. Esta emisión con el empleo del biodiesel se reduce del 65% respecto del combustible diesel [74].

c. Dióxido de Carbono

Es el principal causante del deterioro atmosférico y uno de los gases que mas causa efecto invernadero hoy en día; es consecuencia de los distintos procesos industriales que el hombre utiliza para producir energía. Básicamente la quema de combustibles fósiles (petróleo, leña, gas natural, etc.) y biomasa (materia orgánica) sumándose a los distintos incendios forestales o de pastizales son grandes productores de CO₂ o dióxido de carbono [75]. El dióxido de carbono emitido durante la combustión del biodiesel es totalmente reabsorbido por los vegetales empleados en su producción [74]. En la Tabla 6, se muestran un porcentaje de emisiones del biodiesel puro y una mezcla de 20% biodiesel con diesel en comparación con el diesel:

Tabla 6. Porcentaje de Reducción de las Emisiones de B100 y B20 Comparadas con el Diesel

Emisiones	B100 (%)	B20 (%)
Monóxido de Carbono (CO)	- 48	-12
Hidrocarburos (HC)	- 67	- 20
Material Particulado (MP)	- 47	-12
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	10	2
Sulfates	- 100	- 20
Aire Tóxico	- 60 a – 90	-12 a – 20
Mutagenicidad	-80 a -90	- 20

Fuente: Adaptado de la referencia [76]

4.3 ESTADO ACTUAL

Hoy día, en Colombia se investiga en distintas formas de producir biocombustibles entre los que se destaca el biodiesel obtenido de palma y a partir de microalgas, aunque la industria de los biocombustibles es un hecho, aún falta un amplio camino por recorrer [77].

La Unión Europea, con una producción de 8,812 millones de litros (ML) en el 2008, es el líder mundial en la industria del biodiesel y se estima que lo seguirá siendo durante la próxima década. Alemania encabeza la lista de países productores (3,203 ML), seguido por Estados Unidos (3,182 ML), Francia (2,063 ML) e Italia (676 ML); países en desarrollo tales como Malasia, China, Brasil, Colombia, Argentina e Indonesia, son prometedores en la industria del biodiesel. Se estima un mercado de biodiesel de 168,206 ML para el 2016 [26], [78].

El biodiesel producido a partir de microalgas puede utilizar la infraestructura actual de almacenamiento y distribución para el diesel de petróleo, no requiere amplios terrenos ni utilizar tierras dedicadas a producir productos alimenticios para el cultivo de los microorganismos. Así mismo, debido a la similitud de las propiedades físicas y químicas del diesel fósil con las del biodiesel, su uso no requiere de modificación alguna en los motores diesel convencionales, por lo que puede ser empleado en éste ya sea directamente (B100) o en mezclas biodiesel-diesel al 2% (B2), 5% (B5) y 20% (B20) [3].

Los biocombustibles se constituyen en un elemento importante de la economía colombiana, actualmente se producen en Colombia 1,275 millones de litros diarios de etanol y 1,638 millones de litros de biodiesel a partir de palma de aceite [79], pero se está investigando la producción a partir de microalgas específicamente *Chlorella* la cual es una cepa muy abundante en el territorio nacional y con gran producción de aceite, haciendo atractiva y viable su uso en la generación de biocombustibles [1].

Autores como Yusuf Chisti [5], plantean que las microalgas parecen ser la única fuente de biodiesel renovable que es capaz de satisfacer la demanda mundial de combustibles para el transporte. La producción de biodiesel mediante el uso de microalgas es un proceso

alternativo que a diferencia de otros procedimientos, no solo es biodegradable y no tóxico, sino también se presenta como una solución al calentamiento global a través de la reducción de los gases de emisión. La tecnología algar podría proporcionar una herramienta clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales eléctricas de carbón y otros procesos industriales de carbono intensivo [80].

El biodiesel a partir de microalgas parece ser el único biocombustible renovable que tiene el potencial para desplazar completamente combustibles derivados del petróleo sin afectar negativamente a la oferta de alimentos y otros productos de los cultivos [5].

Recientemente se informó que el biodiesel de aceites vegetales en específico el aceite de colza ofrece menor cantidad de óxidos de nitrógeno (NOx). De igual forma se comunicó que el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NOx) y las emisiones de humo fueron ligeramente inferiores en el biodiesel a partir de soja que el diesel, mientras que las emisiones de CO₂ mostró reducción del 50% en comparación con el diesel [81].

Por su parte, existen instituciones ambientalistas que argumentan que algunos biocombustibles en lugar de atenuar, generan más emisiones y afectan la salud y el medio ambiente, pues crean una contaminación más pulverizada y liberan más contaminantes que destruyen la capa de ozono [19].

En consecuencia, en el Banco Mundial, en la Organización de Naciones Unidas (ONU) y en revistas científicas internacionales, entre otros, actualmente se discute enfáticamente el impacto de los biocombustibles sobre el Cambio Climático Global. Muchos alegan que se lograría una reducción efectiva de los gases efecto invernadero (GEI) con energías más eficientes y limpias, con tecnologías que permitan ahorro energético, así como con la preservación de sumideros naturales de GEI que de otro modo serían devastados por cultivos para la producción de biocombustibles. De hecho, el parlamento británico decidió suspender subsidios para la producción de biocombustibles en 2008 debido a que se puso en duda la idea inicial que el dióxido de carbono sería reducido, en términos netos, y a la emisión de otros contaminantes y particulados producidos por los biocombustibles dañinos para la salud humana [19].

En cuanto a la utilización de biocombustibles en automóviles, se ha detectado un efecto ambiental negativo cuando el tráfico es lento y se usa etanol. Además, si los motores no están adecuadamente calibrados, se incrementan las emisiones de micro partículas orgánicas sobre el aire. En cuanto a la utilización de biodiesel, la mala calibración de los motores aumenta las emisiones de óxido de nitrógeno [79].

Debido a lo antes mencionado, hoy día se están llevando a cabo investigaciones sobre nuevas materias primas para la producción de biodiesel, así como la cantidad de emisiones que se producen en la combustión de este biocombustible, ya que se ha demostrado que estas emisiones dependen en su mayor parte de la materia prima con que se produzca el biodiesel [1].

Por otra parte, hoy en día se están llevando a cabo numerosas investigaciones con relación a la estimación y predicción de propiedades y cálculo de emisiones del biodiesel y el bioetanol; entre los métodos de predicción más utilizados están los que se basan en la cantidad y calidad de ácidos grasos para la determinación de propiedades termo-físicas como la densidad, la viscosidad, el alto poder calorífico y el número de cetano, destacándose principalmente investigaciones recientes como las de Ramírez- Verduzco y colaboradores [9], Lapuerta y colaboradores [62] , Baroutian y colaboradores [82] y Centeno y colaboradores [83].

De la misma forma se han creado modelos predictivos mediante la utilización de herramientas computacionales para predecir los productos de combustión del biodiesel, entre estos se destaca la realizada por Molina [2], quien crea un modelo computacional para medir la variación de las emisiones del biodiesel de palma con respecto a la razón de riqueza del mismo.

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación es de índole descriptiva debido a que se busca identificar y comparar correlaciones y metodologías para caracterizar el biodiesel a partir de las microalgas *Chlorella nativa*; además, no está limitada a la recolección de datos, sino a la predicción de propiedades y emisiones a partir de estos datos. Se recolectaron datos a partir de la hipótesis planteada, luego se analizaron los resultados, a fin de extraer generalizaciones significativas que contribuyan al conocimiento.

5.2 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE MICROALGAS Y COMPOSICION DEL BIODIESEL

5.2.1 Perfil de Ácidos Grasos

Para realizar las reacciones de transesterificación se tomó como referencia la investigación realizada por Alvear y colaboradores [1], quienes hicieron dos pruebas experimentales las cuales arrojaron como resultado el perfil de ácidos grasos del aceite de microalgas *Chlorella nativa*, mostrado en la Tabla 7. Según estos resultados no se detectó la presencia de ácidos grasos libres, por lo que estos no se tendrán en cuenta en el presente estudio para realizar las reacciones de transesterificación.

Tabla 7. Perfil de Ácidos Grasos presentes en el aceite de microalgas *Chlorella nativa*

Ácidos Grasos	Prueba 1 (% másico)	Prueba 2 (% másico)
Ácido Palmítico (C16:0)*	4,03	4,87
Ácido Palmitoléico (C16:1)**	N.D	0,51
Ácido Esteárico (C18:0)*	N.D	1,02
Ácido Oléico (C18:1)**	33,22	36,58
Ácido Linoléico (C18:2)**	20,35	20,76
Ácido Linolénico (C18:3)**	42,40	36,25
Σ AGS*	4,03	5,59
Σ AGI**	95,97	94,1

Fuente: Adaptado de la referencia [1]; *Ácidos Grasos Saturados, ** Ácidos Grasos Insaturados

En la investigación realizada por Alvear y colaboradores [1], se evaluó mediante las pruebas de cromatografía gas-líquido, usando columnas capilares de fase reversa y empleando como agente esterificante el hidróxido de potasio en metanol una muestra de aceite extraído de microalgas *Chlorella nativa* y se consideró que la prueba 2 fue mucho mas acertada ya que se pudo alcanzar una detección óptima de los ácidos grasos presentes en el aceite de microalgas, por lo tanto, en este trabajo se tomaron los datos de la prueba 2 para llevar a cabo las reacciones de transesterificación y estimar de forma teórica la composición de los metilesteres que conforman el biodiesel.

5.2.2 Reacciones de Transesterificación

En el presente trabajo se lleva a cabo de forma teórica las reacciones de transesterificación de cada uno de los triacilglicéridos que forman el aceite de microalgas *Chlorella nativa*, utilizando Hidróxido de Potasio (KOH) como catalizador debido a que la reacción es más rápida que con un catalizador acido, requiere condiciones de operación moderadas, es menos corrosivo y es uno de los catalizadores mas utilizados en la industria; de igual forma se utilizó metanol como materia prima debido al bajo tamaño de la molécula, lo que puede facilitar el ataque simultáneo del metanol sobre la molécula de triglicérido y la polaridad del anión metóxido favoreciendo la reacción con el triglicérido [39]. Además se utilizaron consideraciones similares a las presentadas por Chisti [4] y Montero [39], las cuales se describen a continuación:

- De acuerdo a la estequiometría de la reacción, se requieren 3 moles de metanol por cada mol de triglicérido; para este caso se utilizaron 6 moles de metanol por cada mol de triglicérido, ya que el exceso de metanol garantiza que la reacción conduzca a la formación de metil esterres, evitando una posible saponificación y facilitando la separación de la glicerina [4].
- La reacción se lleva a cabo en un rango de temperatura de 45°C a 65°C teniendo en cuenta que este valor no puede exceder la temperatura de ebullición del metanol (65°C) y a una presión atmosférica, bajo estas condiciones la reacción tardaría 90 minutos en completarse logrando conversiones cercanas al 100% [4], [39].

- El metanol y el aceite no se mezclan, este hecho se vería reflejado en la mezcla a la salida del reactor presentando así dos fases líquidas, lo cual facilitaría la separación de los metilesteres con la glicerina y el metanol en exceso.
- Se considera que en el aceite de microalgas no hay ácidos grasos libres, debido a que el reporte de la investigación realizada por Alvear y colaboradores [1], no da información a respecto; por lo que se asumió que el rendimiento de la reacción será cercano al 100% ya que no se llevarían a cabo las reacciones de saponificación [4].
- El aceite de microalgas y el alcohol están libres de humedad.
- El proceso se lleva a cabo mediante una agitación controlada.

La reacción de transesterificación del aceite de microalgas *Chlorella nativa* con metanol consta de 3 etapas consecutivas reversibles, en las que el triglicérido es convertido en diglicérido, monoglicérido y glicerina.

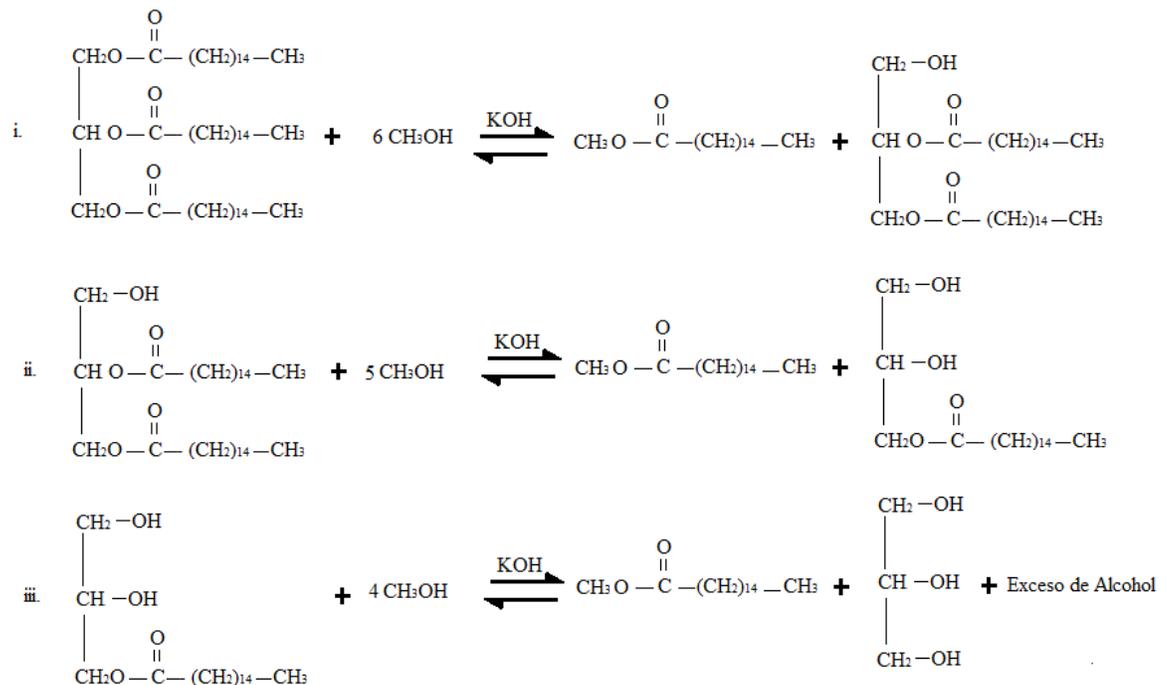


Figura 5. Representación esquemática de la reacción de transesterificación del aceite de microalgas *Chlorella nativa* con metanol en presencia de hidróxido de potasio para producir metil palmitato

Fuente: Realizada en la presente Investigación

Por lo general los tres ácidos grasos de una molécula de triacilglicérido no necesitan ser los mismos y es probable que la grasa o el aceite de una fuente dada sea una mezcla compleja de muchos triacilglicéridos diferentes [84]. Para un triacilglicérido formado solamente por ácido palmítico la reacción de transesterificación se lleva a cabo como se muestra en la Figura 5. De esta manera se dan las reacciones para las distintas combinaciones de las moléculas de triacilglicéridos presente en el aceite de microalgas *Chlorella nativa*, las cuales dan origen a la formación de los metil ésteres respectivos para cada ácido graso.

5.2.3 Composición del Biodiesel

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que en la fase de separación todo el biodiesel es recuperado de la mezcla con metanol y glicerina, es posible asumir que la composición másica de los ácidos grasos es aproximadamente igual a la composición másica de los metil ésteres correspondientes. Este hecho se fundamenta en investigaciones como la realizada por Álvarez Barrera [85], en la cual se realiza la simulación de la producción de biodiesel a partir de aceites de *Jatropha* e *Higuerilla* utilizando la herramienta Super Pro Designer y donde se observa que posterior a las etapas de separación y purificación se obtuvo un biodiesel con composiciones similares a las del aceite correspondiente.

5.3 CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES BÁSICAS DEL BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS *Chlorella nativa*

Se seleccionaron las propiedades básicas más importantes para la caracterización del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa*, teniendo en cuenta la composición del biodiesel estimada en la sección anterior; se identificaron las ecuaciones empíricas y variables requeridas aplicables para cada propiedad calculada reportadas en bases de datos conocidas y se validaron los resultados comparándolos con datos experimentales reportados en la literatura científica. Se seleccionaron algunas propiedades que permitieron de una manera aproximada la caracterización del biodiesel; las propiedades seleccionadas se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades y Parámetros de Calidad Estimados

Propiedades y Parámetros	
Viscosidad Dinámica	Análisis Elemental
Densidad	Gravedad API
Numero de Cetano	Capacidad Calorífica
Poder Calorífico Superior	-----

Fuente: Realizada en la presente investigación

En una disolución ideal las propiedades pueden calcularse mediante las propiedades de los componentes puros, pero la gran mayoría de las disoluciones líquidas no poseen un comportamiento ideal por lo que se han reportado diversas reglas de mezcla y correlaciones dependiendo de la propiedad en estudio, estas son aproximaciones al estado ideal, muchas de las cuales se describieron en la sección 4.2.

5.3.1 Densidad

Para el cálculo de la densidad se utilizaron las correlaciones y reglas de mezcla mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9. Correlaciones utilizadas para el cálculo de la densidad

Modelo	Ecuación
Racket [60]	$\rho^b = \frac{P_c \times M}{RT_c Z_{RA}^{(1+(1-T_r)^{2/7})}}$ <i>Ecuación 5.1</i>
	$P_c = \sum_{i=1}^n P_{ci} x_i$ <i>Ecuación 5.2</i>
	$T_c = \sum_{i=1}^n T_{ci} x_i$ <i>Ecuación 5.3</i>
	$Z_{RA} = \sum_{i=1}^n Z_{RAi} x_i$ <i>Ecuación 5.4</i>
Ramírez-Verduzco y colaboradores [9]	$\rho_i = 0,8463 + \frac{4,9}{M_i} + 0,0118 N$ <i>Ecuación .55</i>
Densidad Promedio Molar [30]	$\rho_m = \sum x_i \rho_i$ <i>Ecuación 5.6</i>

Fuente: Adaptado de las referencias [9], [30] y [60]

5.3.2 Gravedad API

La gravedad API se calculó a partir de los datos de densidad relativa de acuerdo con la ecuación:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\rho_{rel}} - 131,5 \quad \text{Ecuación 5.7}$$

5.3.3 Análisis Elemental

Un gran número de propiedades de las sustancias están en función de su composición, por lo que se determinó el análisis elemental a partir de su fórmula molecular y su proporción en la mezcla.

5.3.4 Viscosidad Dinámica

A pesar de que se han realizado numerosos estudios para la predicción de la viscosidad de mezclas líquidas, no todos son aplicables para el biodiesel a partir de microalgas o en algunos casos no son muy confiables, en este caso se aplicaron las correlaciones mostradas en la Tabla 10. que se ajustaban a los datos obtenidos y han sido comprobadas experimentalmente con otros tipos de biodiesel de características similares como el estudiado en esta investigación.

Tabla 10. Correlaciones utilizadas para el cálculo de la viscosidad dinámica a 40°C

Modelo y/o Autor	Ecuación
Lineal [15]	$\mu_m = \sum x_i \mu_i$ <i>Ecuación 5.8</i>
Logarítmico Arrhenius [47]	$\log \mu_m = \sum x_i \log \mu_i$ <i>Ecuación 5.9</i>
Kendall y Monroe [49]	$(\mu_m)^{1/3} = \sum x_i (\mu_i)^{1/3}$ <i>Ecuación 5.10</i>
Ramírez-Verduzco y colaboradores [50]	$f_m = \sum_i^n z_i \cdot f_i$ <i>Ecuación 5.11</i>
	$\ln \mu_i = -12,503 + 2,496 \ln M_i - 0,1178 N$ <i>Ecuación 5.12</i>
Krisnangura [16]	$\mu_i = 1,05 \times 10^{-4} M^2 - 0,024M + 2,15$ <i>Ecuación 5.13</i>
	$\ln \mu = \sum_i^n y_i \ln \mu_i$ <i>Ecuación 5.14</i>

Fuente: Adaptado de las referencia [15], [31], [47], [49], [50]

Se evaluaron cada una de las ecuaciones descritas anteriormente para el cálculo de la viscosidad dinámica a 40°C teniendo en cuenta los análisis elementales y el perfil de los ácidos grasos y en algunos casos las viscosidades dinámicas de las sustancias puras a 40°C.

5.3.5 Poder Calorífico Superior

En la literatura están plasmadas numerosas correlaciones para el cálculo del poder calorífico superior, entre las cuales se eligieron aquellas que han sido más utilizadas en estudios de biocombustibles; el poder calorífico superior se calculó teniendo en cuenta el análisis elemental y el perfil de ácidos grasos del biodiesel de microalgas; se emplearon las correlaciones mostradas en la Tabla 11, cabe mencionar que las correlaciones desarrolladas

por Vondrecek e IGC se encuentran reportadas en la investigación realizada por Channiwala y colaboradores [10].

Tabla 11. Correlaciones Utilizadas para el cálculo del Poder calorífico Superior

Autor	Ecuación
Dulong's [63]	$HHV = 0,3383C + 1,443 \left(H - \left(\frac{O}{8} \right) \right) + 0,0942 S$ <i>Ecuación 5.15</i>
Vondrecek	$HHV = (0,373 - 0,00026C)C + 1,444 \left(H - \left(\frac{1}{10} \right) O \right) + 0,1047S$ <i>Ecuación 5.16</i>
IGT [68]	$HHV = 0,341C + 1,323H + 0,0685 - 0,0153A - 0,1194(O + N)$ <i>Ecuación 5.17</i>
Método Unificado Channiwala [10]	$HHV = 0,3491C + 1,1783H + 0,1005S - 0,1034O - 0,0151N - 0,0211A$ <i>Ecuación 5.18</i>
Ramírez-Verduzco y colaboradores [9]	$HHV_i = 46,19 - \frac{1794}{M_i} - 0,21 N$ <i>Ecuación 5.19</i>
	$f_m = \sum_i^n z_i \cdot f_i$ <i>Ecuación 5.20</i>
Ferdinand colaboradores [11]	$HHV = \frac{100(THV)}{T_{FA}}$ <i>Ecuación 5.21</i>
	$THV = \sum(HV_i)$ <i>Ecuación 5.22</i>
	$HV_{(C_x, H_y, O_z)} = 34,03 x + 121,64y - 12,54z$ <i>Ecuación 5.23</i>
	$HV_i = x_i HV_{(C_x, H_y, O_z)} i$ <i>Ecuación 5.24</i>
	$T_{FA} = \sum x_i$ <i>Ecuación 5.25</i>

Fuente: Adaptado de las referencias [9], [10], [11]

5.3.6 Número de Cetano

El número de cetano se calculó con las correlaciones de Ramírez-Verduzco y colaboradores:

$$CN_i = -7,8 + 0,302M_i - 20 N \quad \text{Ecuación 5.26}$$

Siendo CN_i el número de cetano del ácido graso i , M_i el peso molecular del ácido graso i , y N el número de enlaces dobles del mismo, se utilizó la regla de mezcla propuesta en la Ecuación 11.

De igual forma, se manejaron los números de cetano reportados por Knothe [71] para cada ácido graso y utilizando la regla de mezcla ideal propuesta por ramos se calculó el número de Cetano para el biodiesel a partir de microalgas.

$$CN = \sum_i^n x_i CN_i \quad \text{Ecuación 5.27}$$

5.3.7 Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica del biodiesel a partir de las microalgas *Chlorella nativa* se calculó por medio de la correlación propuesta por Anand y colaboradores [86], la cual se desarrolló para el cálculo de la capacidad calorífica de biodiesel a partir de la composición de sus metil esteres a 25°C:

$$C_p = -0,000001 M^2 + 0,0009M + 1,9291 \quad \text{Ecuación 5.28}$$

Así mismo se calculó la capacidad calorífica mediante ecuación propuesta por Valencia [87], para líquidos de naturaleza orgánica a 25 °C:

$$C_p = rM^a \quad \text{Ecuación 5.29}$$

Donde M es la masa molecular, *r* y *a* son constantes que dependen de la familia a la que pertenece el compuesto. Para esteres *r* ha sido estimado como 0.60 y *a* como -0.0573.

5.3.8 Validación de Ecuaciones

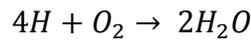
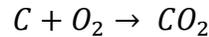
La idoneidad de estas ecuaciones se evaluó mediante de la desviación media absoluta (AAD), calculada como:

$$AAD = \frac{100}{NP} \sum_{i=1}^{NP} \left| \frac{\varphi_{exp} - \varphi_{pr}}{\varphi_{exp}} \right| \quad \text{Ecuación 5.30}$$

Donde *NP* es el número de puntos experimentales reportados en la literatura, φ es la propiedad que se predijo y los subíndices *exp* para el valor experimental y de *pr* para los valores predichos por las ecuaciones.

5.4 CÁLCULO ESTEQUIOMÉTRICO DE EMISIONES

La generación de productos de combustión, se calculó a través de las ecuaciones del balance de materia de la reacción química de oxidación de los elementos constituyentes de la mezcla. La producción de productos de combustión y su composición se realizó a partir de su análisis elemental y se basó en las siguientes reacciones químicas de oxidación:



La cantidad de oxígeno necesario para la combustión está dada por:

$$kg \text{ de } O = \left[\sum_0^n \left(\frac{\% \text{ Elemento}}{100} * \frac{1000}{n * \text{Peso Atómico Elemento}} * \frac{32}{1000} \right) \right] - \frac{(\% O)}{100} \quad \text{Ecuación 5.31}$$

*n: número de átomos que reaccionan con el Oxígeno.

De forma general se establecieron unas ecuaciones básicas para su cálculo:

$$kg \text{ de Oxígeno para el } C = \frac{\%C}{100} * \frac{1000}{12.01} * \frac{32}{1000} = 0.0266445 * (\%C) \quad \text{Ecuación 5.32}$$

$$kg \text{ de Oxígeno para el } H = \frac{\%H}{100} * \frac{1000}{4 * 1.008} * \frac{32}{1000} = 0.0793651 * (\%H) \quad \text{Ecuación 5.33}$$

Luego se calculó la cantidad de humos que se producen y la cantidad de gases de combustión, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Humos} = 1kg \text{ Biodiesel} + O \frac{kg \text{ de Oxígeno}}{kg \text{ de Biodiesel}} = H \frac{kg \text{ de Humo}}{kg \text{ de Biodiesel}} \quad \text{Ecuación 5.34}$$

Para el Carbono:

$$kg \text{ de } CO_2 \text{ del } C = \frac{\%C}{100} * \frac{1000}{12.01} * \frac{44.01}{1000} = 0.0366445 * (\%C) \quad \text{Ecuación 5.35}$$

Para el Hidrógeno:

$$kg \text{ de } H_2O \text{ del } H = \frac{\%H}{100} * \frac{1000}{2 * 1.008} * \frac{18.016}{1000} = 0.0893651 * (\%H) \quad \text{Ecuación 5.36}$$

A continuación, teniendo en cuenta la composición del aire, se determinó la cantidad de aire necesaria para que se dé una combustión estequiométrica, utilizando la siguiente ecuación:

$$kg \text{ de Aire} = \left[\sum_0^n \left(\frac{\% \text{ Elemento}}{100} * \frac{1000}{n * \text{Peso atómico Elemento}} * \frac{32}{1000} * \frac{100}{23.2} \right) \right] - \frac{(\% O)}{100} \quad \text{Ecuación 5.37}$$

Para que la combustión se realice de forma estequiométrica y completa se debe agregar un porcentaje de aire en exceso, por tanto, se multiplicó la relación anterior por el siguiente factor:

$$1 + \frac{\% \text{ Exceso}}{100} \quad \text{Ecuación 5.38}$$

Y se calculó la cantidad de aire necesario por cada kilogramo de biocombustible.

De forma general, se obtuvieron relaciones para hallar las cantidades de gases generados en las emisiones de combustión del biodiesel:

Para el CO₂:

$$kg \text{ CO}_2 \text{ del C} = 0.0266445 * (\%C) + (kg \text{ Aire}) * 0.0005 \quad \text{Ecuación 5.39}$$

Para el H₂O:

$$kg \text{ H}_2\text{O} \text{ del H} = 0.0793651 * (\%H) + (kg \text{ Aire}) * 0.0006 \quad \text{Ecuación 5.40}$$

Para el N₂:

$$kg \text{ N}_2 \text{ de Aire} = (kg \text{ Aire}) * 0.755 \quad \text{Ecuación 5.41}$$

Para Ar:

$$kg \text{ Ar de Aire} = (kg \text{ Aire}) * 0.0123 \quad \text{Ecuación 5.42}$$

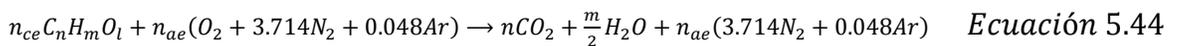
Para O₂ (proveniente del exceso de aire):

$$kg \text{ de O}_2 \text{ del Aire} = (kg \text{ Aire}) * \frac{\% \text{ Exceso Aire}}{100 * \left(1 + \frac{\% \text{ Exceso Aire}}{100} \right)} * 0.232 \quad \text{Ecuación 5.43}$$

5.5 SIMULACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS *Chlorella nativa*

5.5.1 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* a 718 K

El estudio de la combustión a medida que el proceso se desarrolla, permite evaluar de forma aproximada el comportamiento de los productos de reacción, siendo esto el punto inicial para la evaluación de las propiedades termodinámicas del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa*. A partir de estos resultados se determinaron las variables más importantes que caracterizan los procesos de combustión a altas temperaturas; por ejemplo, la variación de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza y a la temperatura. Se utilizaron una serie de correlaciones reportadas en [2], que expresan las moles de combustibles en función de la temperatura y la relación de equivalencia o riqueza. Partiendo de la relación estequiométrica de la combustión, donde la reacción química correcta está dada por la siguiente expresión:



El lado izquierdo de la ecuación muestra la mezcla combustible-aire teórica, utilizada como reactante y el lado derecho muestra las especies químicas formadas teóricamente en los productos. Se asumió que todo el carbono (C) y todo el hidrogeno (H) reaccionaron con el oxígeno (O) formando dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua (H₂O). Así como se consideró que el nitrógeno molecular (N₂) y el argón (Ar) no sufren ningún cambio químico por ser algunos elementos estables. Se tuvieron en cuenta las siguientes notaciones:

$C_nH_mO_l$: formula química del biodiesel.

n, m, l : Número de átomos de carbono, hidrogeno y oxigeno respectivamente.

n_{ce} : Número de moles estequiométrico de biodiesel.

n_{ae} : Número de moles de aire necesarios para la reacción estequiométrica.

Aire: composición volumétrica (21% O_2 , 78% N_2 , 1% Ar) ó ($O_2 + 3.714N_2 + 0.048Ar$).

La relación estequiométrica combustible-aire se determinó mediante:

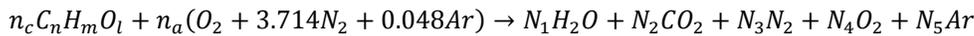
$$F_e = \frac{m_{ce}}{m_{ae}} = \frac{n_{ce}M_c}{n_{ae}M_a} \quad \text{Ecuación 5.45}$$

Donde M_c es el peso molecular del biodiesel y M_a es el peso molecular del aire.

Para la relación estequiométrica se cumple que el número de moles estequiométrico del biodiesel n_{ce} es igual a 1, y que el número de moles de aire necesarios para la reacción estequiométrica $n_{ae} = n + \frac{m}{4} - \frac{l}{2}$ es equivalente a la suma del número de átomos de carbono, un cuarto del número de átomos de hidrogeno menos un medio del numero de átomos de oxigeno; sustituyendo estas consideraciones en la ecuación (5.45) se obtiene:

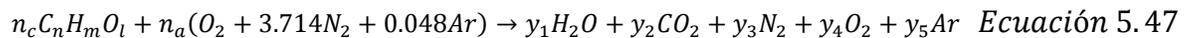
$$F_e = \frac{M_c}{\left(n + \frac{m}{4} - \frac{l}{2}\right)M_a} \quad \text{Ecuación 5.46}$$

Se asumió una reacción no estequiométrica con 5 productos:



El lado izquierdo de la reacción representa la mezcla biodiesel y aire empleada en la combustión, donde n_c y n_a representan las moles de combustible y aire atmosférico empleado. En el lado derecho, se especifican las 5 especies químicas que se consideraron en los productos.

Se consideró una mezcla gaseosa en los productos de reacción:



Donde la relación combustible-aire está dada por:

$$F = \frac{m_c}{m_a} = \frac{n_c M_c}{n_a M_a} \quad \text{Ecuación 5.48}$$

La riqueza o razón de equivalencia, es la relación entre las cantidades de biodiesel y el aire presente en un proceso. Esta relación puede ser mayor, menor o igual a la unidad, lo que permite determinar si la combustión es completa o incompleta.

$$FR = \frac{F}{F_e} \quad \text{Ecuación 5.49}$$

Remplazando las ecuaciones 5.46 y 5.48 en la Ecuación 5.49 se obtiene:

$$FR = \frac{n_c \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{n_a} \quad \text{Ecuación 5.50}$$

De donde se obtuvo la expresión para las moles de aire n_a en función de las moles de biodiesel n_c :

$$n_a = \frac{n_c \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{FR} \quad \text{Ecuación 5.51}$$

Se realizó un balance de masa para cada elemento a la reacción no estequiométrica, con el fin de encontrar la concentración de los gases en los productos.

Para el hidrógeno (H):

$$2y_1 = m n_c \quad \text{Ecuación 5.52}$$

Para el carbono (C):

$$y_2 = n n_c \quad \text{Ecuación 5.53}$$

Para el nitrógeno (N):

$$2y_3 = 2(3.714)n_a \quad \text{Ecuación 5.54}$$

Para el oxígeno (O):

$$y_1 + 2y_2 + 2y_4 = 2 n_a + l n_c \quad \text{Ecuación 5.55}$$

Para el argón (Ar):

$$y_5 = 0.048 n_a \quad \text{Ecuación 5.56}$$

Despejando las fracciones mol para cada producto (ecuaciones 5.52-5.56), se expresaron en función de las moles de combustible n_c :

$$y_1 = \frac{m n_c}{2} \quad \text{Ecuación 5.57}$$

$$y_2 = n n_c \quad \text{Ecuación 5.58}$$

$$y_3 = \frac{3.714 n_c \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{FR} \quad \text{Ecuación 5.59}$$

$$y_4 = \frac{l n_c}{2} + \frac{n_c \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{FR} - n n_c - \frac{m n_c}{4} \quad \text{Ecuación 5.60}$$

$$y_5 = \frac{0.048 n_c \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{FR} \quad \text{Ecuación 5.61}$$

Se utilizó la simulación a 718K para comparar los resultados obtenidos por Molina [2] para el biodiesel de palma; quien obtuvo correlaciones para estimar n_c en función de la riqueza (FR) y la temperatura (T), a una temperatura fija de 718K.

Para $FR \geq 1$

$$n_c = \frac{1.3}{\left[\left(n + \frac{m}{2} \right) + \frac{3.714 \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{FR} \right] e^{0.00013T}} \quad \text{Ecuación 5.62}$$

Para $FR < 1$

$$n_c = \frac{1.3}{\left[\left(\frac{m}{4} \right) + \frac{4.714 \left(n + \frac{m}{4} - \frac{L}{2} \right)}{FR} + \frac{l}{2} \right] e^{0.00013T}} \quad \text{Ecuación 5.63}$$

Se procedió entonces con la programación de las ecuaciones de la 5.57 a la 5.63 con temperatura fija de 718 K para diferentes valores de FR (de 0.5 hasta 1.5) con un aumento

gradual de 0.1. Utilizando el software Scilab 5.2.1 para las corridas del modelo y teniendo en cuenta el biodiesel estimado a partir de microalgas *Chlorella nativa* basado en las consideraciones reportadas en la sección 5.2.

5.5.2 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción H₂O y CO₂ respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* a diferentes temperaturas

Se programaron las ecuaciones de la 5,57 a la 5,63 con temperaturas de 518 K, 718K y 918K, debido a que se encuentran dentro del rango de operación de los motores de combustión alternativa, de esta manera se simuló la variación de las fracciones mol de los productos de combustión vapor de agua y dióxido de carbono con respecto a la riqueza del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa*. Se utilizó el software Scilab 5.2.1 para las corridas del modelo de la misma forma que en la sección 5.5.1 variando la temperatura.

5.6 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

En esta parte del trabajo se realizó un análisis termodinámico a partir del balance de energía del proceso de combustión del biodiesel en un motor alternativo, asumiendo condiciones ideales para los gases de combustión y calculando entalpías de reacción y capacidades caloríficas para cada compuesto, de forma que se pudo hacer análisis de los efectos de la temperatura en el proceso de combustión, variando las condiciones de alimentación del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*. Se partió de los valores de entalpías de formación reportadas por Acá- Acá y colaboradores [88] mostrados en la Tabla12.

Tabla 12 Entalpías de Formación de Metil Esteres

Metil Ester	Metil Palmitato	Metil Palmitoleato	Metil Estearato	Metil Oleato	Metil Linoleato	Metil Linolenato
ΔH°_{f298} [kJ/mol]	-710,2	-586,11	-751,8	-637,4	-522,9	-408,5

Fuente: Adaptado de Aca-Aca y colaboradores [88].

De la misma forma se tomaron los valores de entalpías de formación de los productos de reacción reportados en Smith y colaboradores [89], con estos valores se realizó el balance

de energía con una temperatura inicial de 298 K hasta una temperatura dentro del rango de operación de los motores alternativos reportados por Molina [2], siendo este de 500 K - 1000 K, calculando así el calor generado o liberado por la reacción de combustión para diferentes temperaturas y condiciones molares.

Para el balance energético se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Teniendo que este es un proceso isobárico entonces:

$$Q = \Delta H \quad \text{Ecuación 5,64}$$

Como la combustión se da a una temperatura distinta a la temperatura estándar 298 K, entonces:

$$\Delta H = \Delta H^\circ_{Rxn} + \int_{298}^T n C_p dt \quad \text{Ecuación 5,65}$$

La entalpia estándar de reacción está dada por:

$$\Delta H^\circ_{Rxn} = n_P \Delta H^\circ_{P298} - n_R \Delta H^\circ_{R298} \quad \text{Ecuación 5,66}$$

Donde el subíndice P se refiere a los productos y el subíndice R a los reactivos; si el valor de T es conocido la Ecuación 5,65 que da de la siguiente manera:

$$\Delta H = \Delta H^\circ_{Rxn} + n \overline{C_p} \Delta T \quad \text{Ecuación 5,67}$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección del trabajo se presentan los resultados estimados sobre la composición, propiedades y emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, utilizando la metodología planteada; de igual forma, se realizará la discusión de estos mediante el análisis y la comparación con resultados reportados en la literatura científica.

6.1 TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE MICROALGAS Y COMPOSICION DEL BIODIESEL

Como se mencionó en las secciones 5.1-5.3, para las reacciones de transesterificación se consideró que el aceite esta conformado por una mezcla compleja de triglicéridos [1] que al reaccionar con metanol en exceso, en presencia hidróxido de potasio como catalizador dieron como resultado una mezcla de metil esteres con glicerina. Se consideró una relación molar de metanol y triglicéridos de 6:1, correspondiente al doble de la estequiométrica, prediciendo de esta forma la dirección de la reacción, evitando las reacciones de saponificación y asumiendo una conversión del 100%. Después de llevar a cabo de forma teórica las reacciones de transesterificación se asumió la recuperación total del biodiesel mediante un lavado repetitivo con agua para remover el metanol y el glicerol, obteniendo de esta forma la mezcla de metil esteres con los mismos porcentajes máxicos de sus ácidos grasos correspondientes presentes en la mezcla de triacilglicéridos, como se puede observar en la Tabla 12.

Tabla 13. Fracciones Másicas de los metil esteres que conforman el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*

Metil Esteres	% másico
Metil Palmitato	4,87
Metil Palmitoleato	0,51
Metil Estereato	1,02
Metil Oleato	36,58
Metil Linoleato	20,76
Metil Linolenato	36,25

Fuente: Este trabajo

6.2 PROPIEDADES BÁSICAS DEL BIODIESEL DE MICROALGAS *Chlorella nativa*

6.2.1 Densidad

La estructura molecular del biodiesel no es constante ya que depende en gran parte de las materias primas usadas y del proceso de producción que se utilice. Para esta investigación se tomó como referencia la densidad de cada sustancia pura reportada por Lapuerta y colaboradores [62] y los resultados de las fracciones másicas del inciso anterior, los datos se muestran en la Tabla 13.

Tabla 14. Densidad de los metil ésteres del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*

Metil Esteres	Formula Abreviada	Formula Molecular	% másico	Densidad [g/cm ³] [62]
Metil Palmitato	C16:0	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	4,87	0,8505
Metil Palmitoleato	C16:1	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	0,51	0,875
Metil Estereato	C18:0	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	1,02	0,8496
Metil Oleato	C18:1	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	36,58	0,874
Metil Linoleato	C18:2	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	20,76	0,889
Metil Linolenato	C18:3	C ₁₉ H ₃₂ O ₂	36,25	0,895

Fuente: Esta investigación, los valores de la densidad se tomaron de la referencia [62]

Se espera que la densidad del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* presente una densidad con valores cercanos a los establecidos por la norma ASTM – D6751, la cual establece una densidad para el biodiesel de 0,88 g/cm³.

Para estimar la densidad del biodiesel se procedió de acuerdo a tres métodos, descritos a continuación:

Método de Racket [60]

Se utilizaron las ecuaciones 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4, y se tomaron como referencia los valores de Tc, Pc y Z_{RA} para los ácidos grasos, reportados por Sales- Cruz [88] mostrados en la Tabla 14.

Tabla 15. Propiedades Críticas de los Metil Esteres del Biodiesel

Metil Esteres	Tc [K]	Pc [bar]	Z _{RA}
Metil Palmitato	780,38	14,18	0,22953
Metil Palmitoleato	-----	-----	-----
Metil Estereato	796,65	12,44	0,22467
Metil Oleato	795,17	12,16	0,21939
Metil Linoleato	793,68	11,9	0,2255
Metil Linolenato	792,18	11,64	0,2284

Fuente: Adaptado de la referencia [88]

Sustituyendo los valores mostrados en la Tabla 14, en las ecuaciones 5.2, 5.3 y 5.4 se estimaron las propiedades críticas del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, las cuales se muestran en la Tabla 15.

Tabla 16. Propiedades Críticas del biodiesel obtenido a partir de microalgas *Chlorella nativa*

	Tc (K)	Pc (bar)	Z _{RA}
Biodiesel	788,937	11,96	0,2233

Fuente: Esta investigación

El peso molecular promedio del biodiesel se calculó a partir del peso molecular de cada metil éster y su composición molar, estos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 17. Composición molar del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa*

Metil Esteres	Fracción Másica	Peso Molecular [M]	Fracción Molar
Metil Palmitato	0,049	270,45	0,053
Metil Palmitoleato	0,005	268,43	0,006
Metil Estereato	0,010	298,50	0,010
Metil Oleato	0,366	296,49	0,362
Metil Linoleato	0,208	294,47	0,207
Metil Linolenato	0,363	292,46	0,363

Fuente: Esta investigación, los pesos moleculares se tomaron de la referencia [9]

De lo anterior, se tiene que el peso molecular promedio del biodiesel es: 293,096 g/mol, a una temperatura ambiente de 303,15 K (30°C), la densidad del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* estimada según este método es: **0,885 g/cm³**

Método de Ramírez – Verduzco y colaboradores [9]

Para el método propuesto por Ramírez- Verduzco y colaboradores [9], se evaluaron las densidades de cada metil éster utilizando la Ecuación 5.5, teniendo en cuenta el peso molecular [Mi] de cada metil éster y el número de dobles enlaces [Ni] presentes en ellos; estos datos se presentan en la Tabla 15. Los valores calculados para cada metil éster se muestran en la Tabla 17.

Tabla 18. Numero de dobles enlaces y densidad estimada para algunos metil esterres

Metil Ésteres	Fracción Másica	Peso Molecular [M] [9]	Numero de Enlaces Dobles [N]	Densidad Estimada [g/cm ³]
Metil Palmitato	0,049	270,45	0	0,864
Metil Palmitoleato	0,005	268,43	1	0,876
Metil Estereato	0,010	298,50	0	0,863
Metil Oleato	0,366	296,49	1	0,875
Metil Linoleato	0,208	294,47	2	0,887
Metil Linolenato	0,363	292,46	3	0,898

Fuente: Esta investigación y adaptación de la referencia [9]

A partir de la Tabla 17 y utilizando la ecuación 5.11 que corresponde a la regla de mezcla propuesta por este autor, se tiene que la densidad estimada del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* por este método es: **0,885 g/cm³**

Método de Promedio Molar

En este caso se utilizó la Ecuación 5.6, sustituyendo los valores de densidad que están en la Tabla 13 y las fracciones molares presentadas en la Tabla 16; se tiene que la densidad estimada del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* por este método es: **0,883 g/cm³**

De lo descrito anteriormente, se puede observar que el valor de la densidad por el método de promedio molar es muy cercano a los dos valores estimados por los métodos anteriores, entre las búsquedas realizadas solo dos autores reportan un valor de densidad encontrado experimentalmente para un biodiesel de microalgas, en este caso la *Chlorella protothecoides* estudiada por Xu y colaboradores [13], y por Hung Chen y colaboradores [35]; estos autores encontraron una densidad de 0,864 g/cm³ y 0,882 g/cm³ respectivamente.

En Colombia, la Resolución No. 180782 de Mayo 30 de 2007 del Ministerio de Minas y Energía establece los requisitos de calidad para el biodiesel y fija para la densidad un rango

entre 0,86 g/cm³ y 0,90g/cm³, por lo tanto la densidad estimada para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se encuentra dentro de los límites requeridos.

Los valores estimados y reportados en la literatura se comparan en la siguiente Figura:

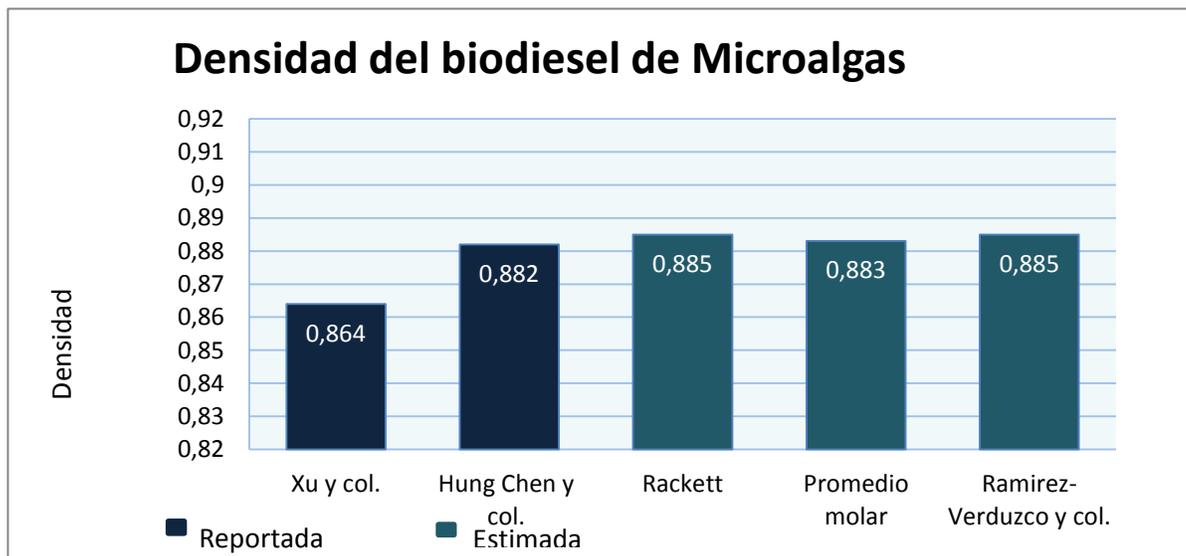


Figura 6. Densidad Estimada y Reportada para el biodiesel de dos especies de microalgas: *Chlorella nativa* y *Chlorella protothecoides*

Fuente: Elaborado en la presente investigación, adaptado de Xu y colaboradores [13], Hung Chen y colaboradores [35]

De la Figura 6, se puede observar la comparación de los valores de densidad estimados para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* y los valores de densidad reportados para el biodiesel de microalgas *Chlorella protothecoides* por dos autores diferentes, cabe señalar que la composición de metil Ésteres de la cepa *Chlorella protothecoides* es diferente a la composición de la cepa *Chlorella nativa*, por lo que la comparación de los valores estimados para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* con los valores reportados para el biodiesel de microalgas *Chlorella protothecoides* se realizó con el fin de evaluar las similitudes y diferencias entre estas cepas de la misma especie.

Teniendo en cuenta que el método de Rackett [60], y el de Ramírez-Verduzco y colaboradores [9], arrojaron resultados similares, y que estos métodos son validados por una serie de investigaciones para el cálculo de la densidad del biodiesel [1], [62], [79], [89], mientras que el método de promedio molar se utiliza para todas las mezclas líquidas, se

tomó como densidad estimada para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* **0,885 g/cm³**. Por su parte, en investigaciones recientes como la realizada por Tejeda [79] se ha reportado el valor de la densidad para el biodiesel de palma siendo este de **0,862 g/cm³**; el valor para la densidad del diesel fósil ha sido reportado por Erwin [90], quien reporta una densidad para el diesel de **0,846 g/cm³**, esta comparación se puede observar en la Figura 7.

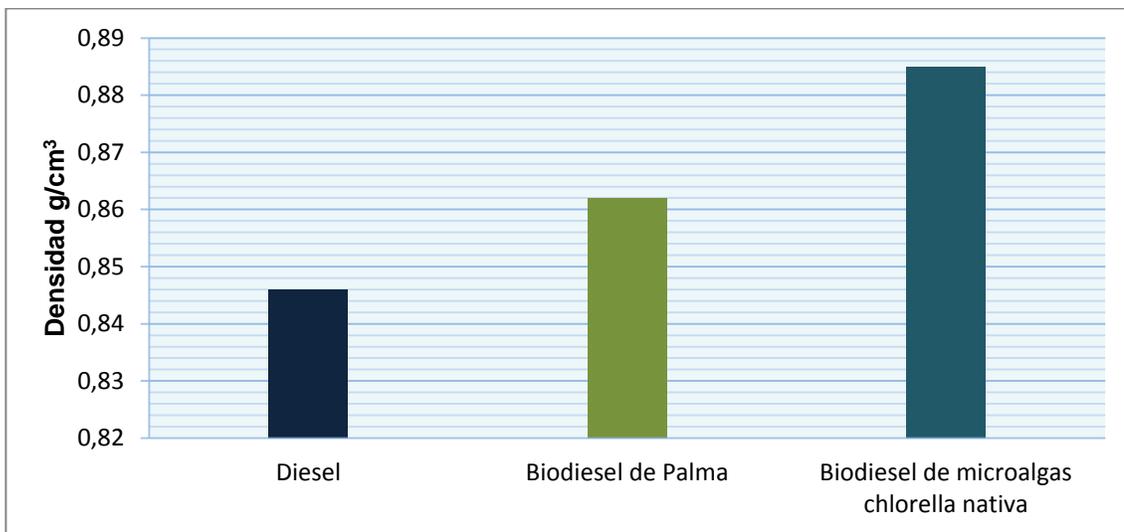


Figura 7. Densidad del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto a la densidad del diesel fósil y del biodiesel de palma

Fuente: Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, este trabajo. Diesel, adaptado de [90], Biodiesel de palma, adaptado de [79]

De la Figura 7, se puede observar que la densidad del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* es superior a la del biodiesel de palma lo cual se debe, a que este se encuentra compuesto principalmente por metil ésteres de ácidos grasos insaturados con cadenas de longitud menores y con mayor cantidad de dobles enlaces, además en este trabajo se consideró un biodiesel de alta pureza, por lo que era de esperarse que este presentara una alta densidad ya que la presencia de contaminantes de baja densidad como el metanol, disminuyen la densidad del biodiesel [91]; este resultado estimado podría afectar el valor comercial de este tipo de biodiesel ya que su gravedad API se estima será menor.

6.2.2 Gravedad API

La gravedad API se determinó de acuerdo a la Ecuación 5.7. La densidad relativa resulta del cociente entre la densidad y la densidad del agua a una temperatura de referencia. A temperaturas cercanas a la ambiental, la densidad del agua es $1,0 \text{ g/cm}^3$.

Tomando los valores de densidad estimados por los métodos de Racket [60] y Ramírez-Verduzco y colaboradores [9], dividiéndolos entre la densidad del agua $1,0 \text{ g/cm}^3$, se calculó la densidad relativa cuyos valores fueron remplazados en la Ecuación 5.7, los valores de la densidad relativa y la gravedad API estimados se exponen en la Tabla 18.

Tabla 19. Densidad Relativa y Gravedad API del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*

Autor o Método	Racket , Ramírez-verduzco
Densidad Relativa	0,885
° API	28,387

Fuente: Adaptado de las referencias [50] y [51]

El valor de la gravedad API para el biodiesel de palma reportado por Tejeda [79], es de 32,729; por su parte Erwin [90] reporta que la gravedad API basándose en el método ASTM 1298 es 35,8; estos valores se pueden comparar en la Figura 8.

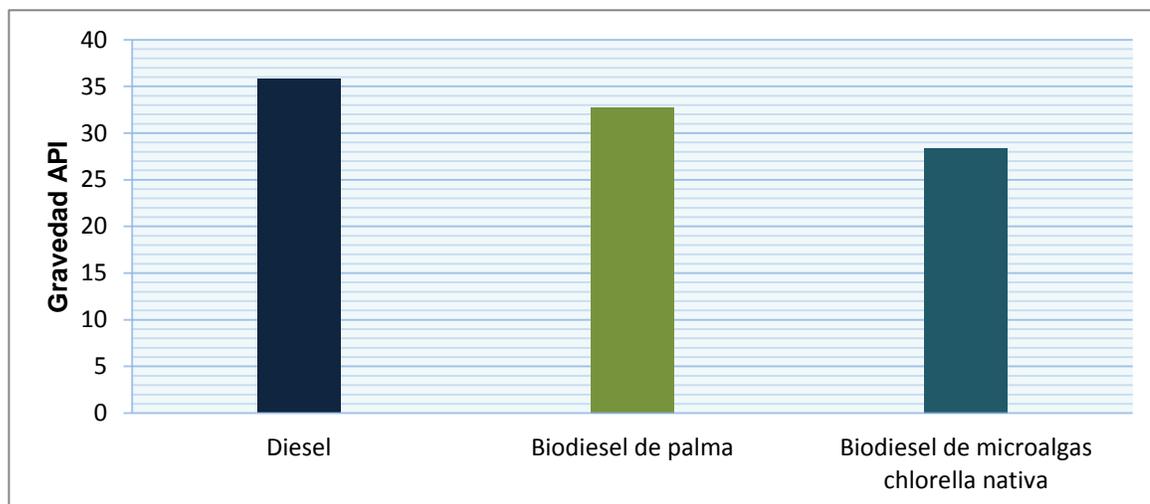


Figura 8. Gravedad API del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y el diesel

Fuente: Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, este trabajo. Diesel, adaptado de [72]. Biodiesel de palma, adaptado de [71].

De la Figura 8 y teniendo en cuenta que la gravedad API es un parámetro de caracterización de los combustibles y biocombustibles ya que los clasifica en pesados ($^{\circ}\text{API}=15-20$), livianos ($^{\circ}\text{API} = 32 - 40$) e intermedios ($^{\circ}\text{API} = 21 - 30$); siendo los livianos los de mayor valor adquisitivo e importancia comercial [92]. Se puede decir que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* es un biocombustible intermedio, lo cual era de esperarse teniendo en cuenta el valor estimado de su densidad.

6.2.3 Análisis Elemental

Después de evaluar las consideraciones expuestas en la sección 5,2 para las reacciones de transesterificación, se obtuvo la composición de los metil esterres que constituyen el biodiesel, lo cual permitió realizar el análisis elemental de este tipo de biodiesel, partiendo del análisis elemental de cada uno de los metil esterres que lo conforman, por ejemplo:

Metil Palmitato

$$\text{masa de C} = 17 \text{ mol de C} * 12.01 \frac{\text{kg de C}}{\text{mol de C}} = 204.17 \text{ kg de C}$$

$$\text{masa de H} = 34 \text{ mol de H} * 1.008 \frac{\text{kg de H}}{\text{mol de H}} = 34.27 \text{ kg de H}$$

$$\text{masa de O} = 2 \text{ mol de O} * 16.00 \frac{\text{kg de O}}{\text{mol de O}} = 32 \text{ kg de O}$$

Masa total del metil palmitato:

$$\text{masa M. Palmitato} = 270.442 \text{ kg } \text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$$

Porcentaje en masa de cada elemento en el metil palmitato:

$$\text{C} = \frac{204.17 \text{ kg de C}}{270.442 \text{ kg } \text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2} * 100\% = 75.49\%$$

$$\text{H} = \frac{34.272 \text{ kg de H}}{270.442 \text{ kg } \text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2} * 100\% = 12.67\%$$

$$O = \frac{32 \text{ kg de } O}{270.442 \text{ kg } C_{17}H_{34}O_2} * 100\% = 11.83\%$$

De igual forma se procede con los demás metil ésteres, los resultados se pueden observar en la Tabla 19, donde se consideran los porcentajes de cada metil éster en la mezcla para el cálculo del porcentaje elemental del biodiesel.

Tabla 20. Análisis elemental del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*

Metil Ésteres	%C	%H	%O
Metil Palmitato	75,495	12,673	11,832
Metil Palmitoleato	76,062	12,017	11,291
Metil Estereato	76,447	12,832	10,720
Metil Oleato	76,967	12,240	10,793
Metil Linoleato	77,494	11,639	10,867
Metil Linolenato	78,028	11,030	10,942
BIODIESEL	77,450	11,716	10,931

De la Tabla 19, se tiene que el biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* tiene un 77,450% de carbono un 11,716% de hidrogeno y un 10,931 % de oxígeno. Se comparó esta composición con la composición del biodiesel de palma [79] y el diesel [90]; los resultados se muestran en la Figura 9.

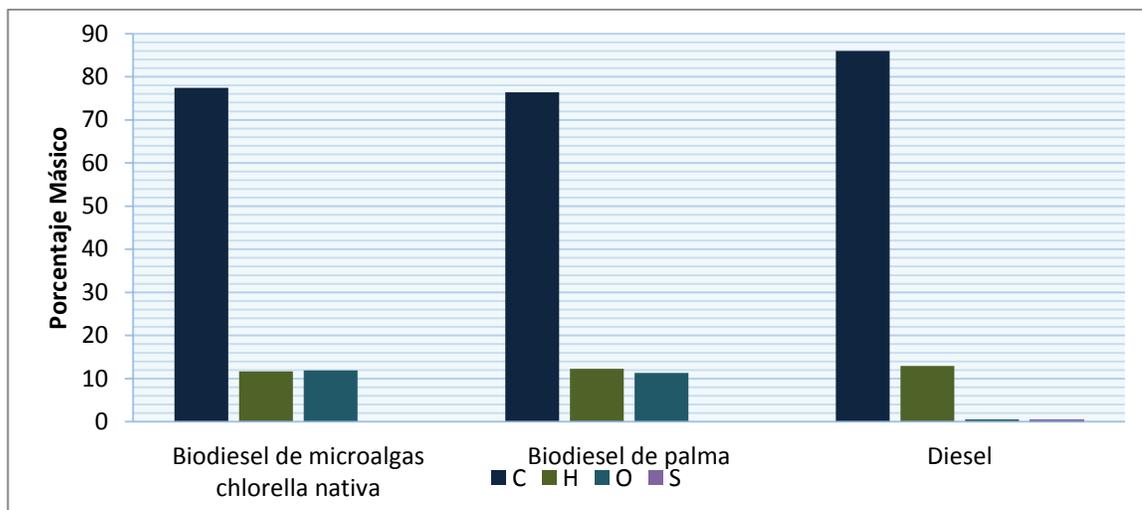


Figura 9. Composición del Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y al diesel.

Fuente: Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, este trabajo. Biodiesel de palma, adaptado de [71]. Diesel, adaptado de [72].

De la figura 9, se pudo constatar que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* tiene una mayor cantidad de carbono en comparación con el aceite de palma, como era de esperarse debido a que su composición se basa principalmente a metil linoleato y metil oleato, metil ésteres de gran contenido de carbono; sin embargo, la composición es muy similar a la del biodiesel de palma presentando una desviación estándar no mayor a 0,74. Se estimó que tiene una cantidad de carbono inferior a la del diesel como era de esperarse, ya que este último está compuesto principalmente por largas cadenas de hidrocarburos, conteniendo de esta manera una mayor cantidad de carbono. Esta estimación puede influir en el resultado de propiedades importantes como son: el poder calorífico superior, el número de cetano y la capacidad calorífica, las cuales dependen de la composición del biodiesel. De la misma forma se puede observar una de las características más importantes de los biocombustibles, como lo es el carácter de ser más limpios que los combustibles fósiles; en este caso se puede ver que el diesel fósil a diferencia del biodiesel contiene azufre, este hecho afectaría el resultado de las emisiones, por lo que se prevé que las emisiones del diesel fósil sean superiores a las del biodiesel.

6.2.4 Viscosidad

En esta investigación se usaron las ecuaciones 5.8, 5.9 y 5.10 remplazando las fracciones másicas, molares y los valores de viscosidad dinámica reportados en [62]; de forma adicional, se evaluaron las correlaciones propuestas por Ramírez-Verduzco y colaboradores [9] ecuaciones 5.11 y 5.12, junto con las propuestas por Krisnangura y colaboradores [31] ecuaciones 5.13 y 5.14 para el cálculo de la viscosidad dinámica del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa*.

Para estimar la viscosidad del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* usando estas ecuaciones se requiere su composición molar la viscosidad dinámica de sus componentes a 40°C que se tomaron de Knothe [12] y el peso molecular de estos, los datos se muestran en la Tabla 20.

Se espera que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* tenga una viscosidad mayor que la del biodiesel de palma debido a su composición molecular en cuanto a que los ácidos grasos del aceite del que provienen son insaturados en su mayoría y considerando los resultados mostrados en la Figura 7, correspondientes a la densidad de estos, conociendo el hecho de que estas propiedades se encuentran relacionadas entre si.

Tabla 21. Viscosidad de los componentes del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*

Metil Ésteres	μ [mPa .s] [12]	Peso Molecular [M] [9]	Fracción Molar
Metil Palmitato	3,725	270,45	0,053
Metil Palmitoleato	3,211	268,43	0,006
Metil Estereato	4,970	298,50	0,010
Metil Oleato	3,942	296,49	0,362
Metil Linoleato	3,245	294,47	0,207
Metil Linolenato	2,810	292,46	0,363

Fuente: Viscosidad dinámica adaptada de [12], pesos moleculares adaptados de [9].

Para los modelos: lineal (Ecuación 5.8), logarítmico de Arrhenius (Ecuación 5.9) y Kendall y Monroe (Ecuación 5.10) se sustituyeron los datos de viscosidad para cada metil éster y la fracción molar reportados en la Tabla 20, obteniéndose resultados para la viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* de: 3,383; 3,344 y 3,356 [mPa*s] respectivamente.

En el caso de las correlaciones propuestas por Ramírez-Verduzco y colaboradores [9] (Ecuaciones 5.11 y 5.12) se utilizaron los valores de peso molecular mostrados en la Tabla 20 y los datos de número de enlace [N] mostrados en la Tabla 17, estos valores se remplazaron en la Ecuación 5.12 para calcular la viscosidad dinámica de cada metil éster, cuyos valores fueron sustituidos en la Ecuación 5.12 para calcular el valor de la viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* a 40°C, obteniéndose como resultado una viscosidad dinámica de: 3,815 mPa*s.

Para el método propuesto por Krisnangkura y colaboradores [31] (Ecuaciones 5.13 y 5.14), se tomaron los valores de peso molecular de cada metil éster mostrados en la Tabla 19 y se sustituyeron en la ecuación 5.13 para calcular la viscosidad cinemática de cada metil éster, estos valores se remplazaron en la ecuación 5.14, obteniéndose de esta forma una viscosidad cinemática para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* de: 4,137 cSt; que al ser multiplicada por la densidad del biodiesel de microalgas estimada como 0,885 g/cm³ (promedio de las densidades estimadas), se obtuvo que la viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* es: 3,662 mPa*s. Los resultados se pueden observar en la Figura 10.

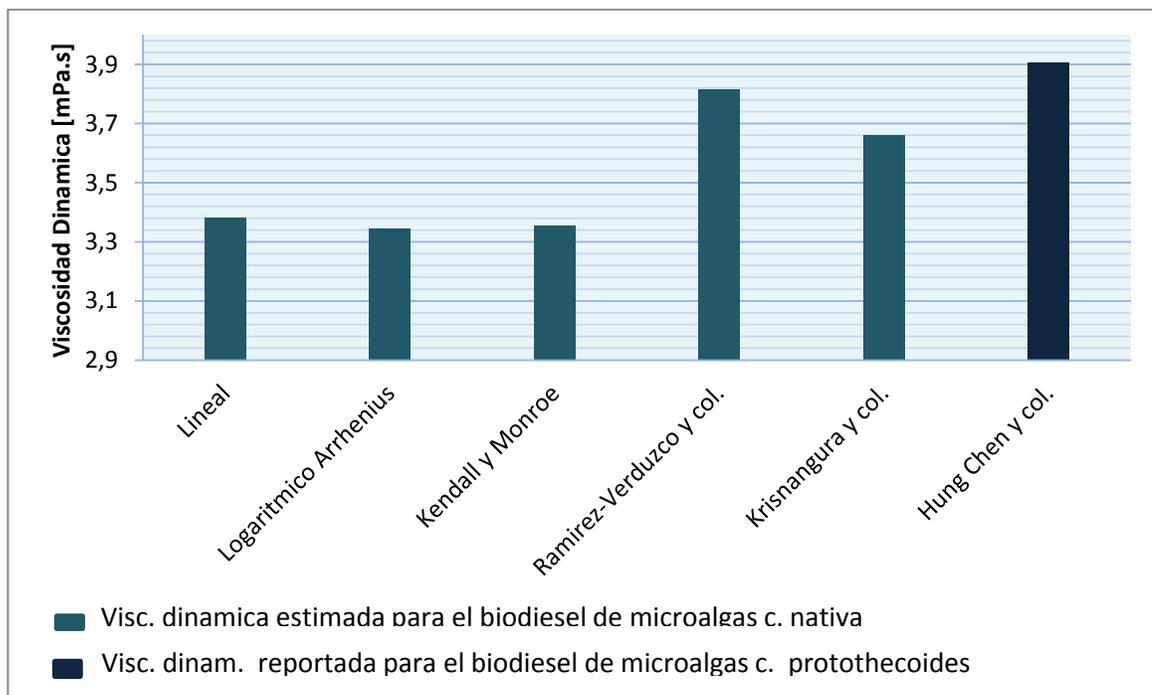


Figura 10. Comparación de la viscosidad dinámica estimada y reportada para el biodiesel de dos especies de microalgas *Chlorella*

Fuente: Elaborada en el presente trabajo, adaptación de Hung Chen y colaboradores [35].

De la Figura 10, se pueden observar los valores de la viscosidad dinámica estimada para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* y la viscosidad dinámica reportada para el biodiesel de microalgas *Chlorella protothecoides* [35] a 40°C, de aquí que los valores estimados se encuentran cercanos al valor experimental reportado para esta cepa de microalga *Chlorella*, sin embargo todos los modelos predictivos utilizados para estimar la viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* arrojan valores para esta propiedad inferiores a los reportados por Hung Chen y colaboradores [35], lo cual se debe a que la cantidad de ácidos grasos insaturados y saturados es diferente para el biodiesel producido por esta cepa de microalgas *chlorella*.

Los valores estimados para la viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* por las correlaciones de Krisnangkura y colaboradores [31] y Ramirez-Verduzco y colaboradores [9], se desarrollaron específicamente para predecir las viscosidades del biodiesel, mientras que las correlaciones Lineal [29], Logarítmica [57] y la propuesta por

Kendall y Monroe [59] fueron desarrolladas para todas las mezclas líquidas, por lo que para este caso las correlaciones desarrolladas por Krisnangkura y colaboradores [31] y Ramirez-Verduzco y colaboradores [9] se ajustarían mejor a la evaluación del biodiesel de microalga. Se calculó la media geométrica de los valores estimados por estas correlaciones para compararla con las viscosidades reportadas para el biodiesel de palma y el diesel. De esta forma se tiene que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* tiene una viscosidad promedio de **3,737 mPa.s**.

Tejeda [79], reporta un valor promedio de la viscosidad dinámica para el biodiesel de palma de 3,608 mPa.s; así mismo Erwin [90], reporta una viscosidad del diesel con un valor de 3,52 mPa.s. En la Figura 11. se puede observar la comparación de la viscosidad estimada para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* con respecto al biodiesel de palma y el diesel fósil.

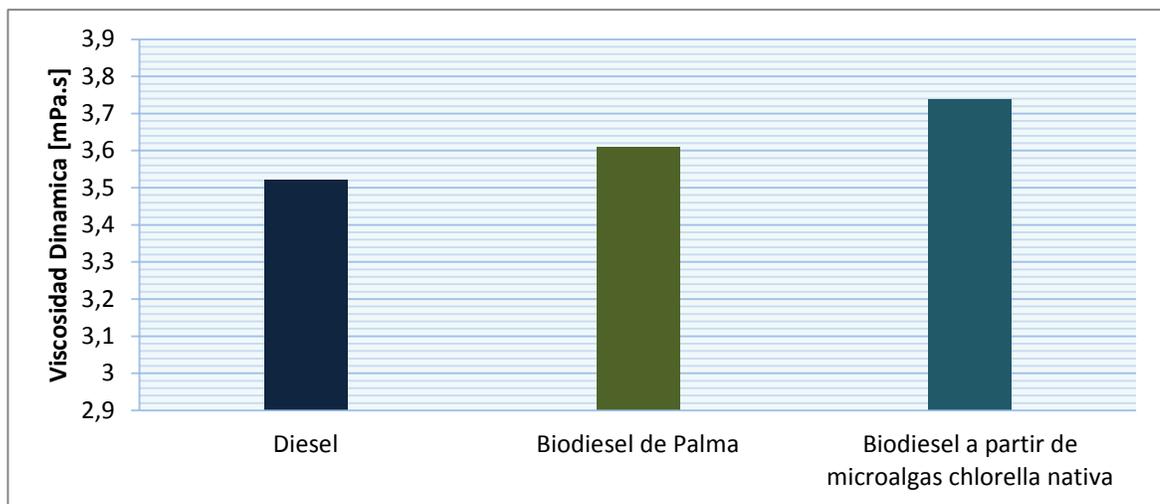


Figura 11. Viscosidad dinámica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y el diesel

Fuente: Biodiesel de microalgas *C. nativa* elaborado en la presente investigación, biodiesel de palma adaptada de Tejeda [71], diesel adaptada de Erwin [72].

De los resultados mostrados en la Figura 11, se estima que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* tiene una viscosidad cinemática promedio de 4,2 cSt, considerando los modelos de Krisnangkura y colaboradores [31] y Ramirez-Verduzco y colaboradores [9] que permiten una mejor predicción para el caso analizado, y teniendo en cuenta que la

viscosidad cinemática para el biodiesel según los parámetros de calidad establecidos por la norma ASTM D6751 debe estar entre 1,9 y 6,0 cSt se deduce que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* está dentro de los límites de calidad, cabe señalar que es importante la estimación de este parámetro ya que con este se predice si el combustible genera o no desgaste en el motor y si el consumo de este podría o no ser alto; de esta forma, se estima que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* podría generar desgaste en el motor y tener un consumo mayor de combustible debido a la alta viscosidad que este presenta, en comparación con el diesel y el biodiesel de palma.

6.2.5 Poder Calorífico Superior

La estimación del poder calorífico superior se hizo mediante la utilización de las ecuaciones 5.15-5.18. Estas ecuaciones se basan en el análisis elemental másico del combustible. Así mismo, se evalúan los métodos de Ramírez-Verduzco y colaboradores (Ecuaciones 5.19 y 5.20) y el método de Ferdinand y colaboradores (Ecuaciones 5.21-5.25), utilizando los datos expuestos en las Tablas 16 y 19. Los resultados obtenidos de estas estimaciones se compararon con dos valores experimentales reportados en la literatura para el biodiesel de *Chlorella protothecoides*, las estimaciones realizadas y los valores reportados en la literatura se muestran en la Figura 12.

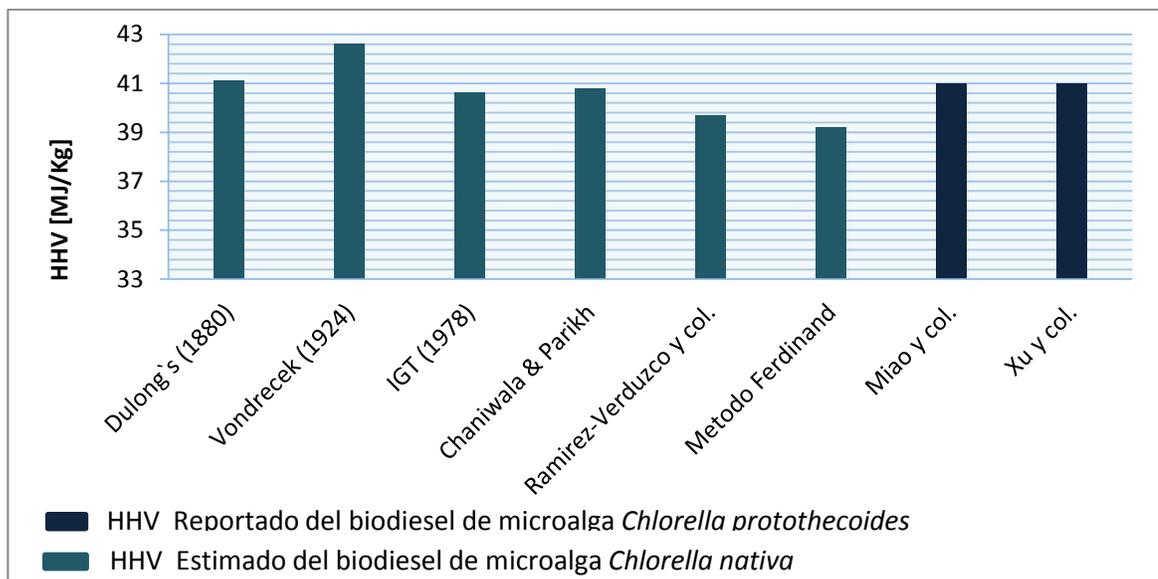


Figura 12. Poder calorífico superior (HHV) estimado y reportado del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* y *Chlorella protothecoides*
Fuente: Elaborada en la presente investigación con adaptaciones de Xu y colaboradores [13], Miao y colaboradores [14].

En la Figura 12, se puede constatar los valores del poder calorífico superior calculado experimentalmente por Xu y colaboradores [13] y por Miao y colaboradores [14] quienes reportaron valores de poder calorífico superior de 41 MJ/kg para el biodiesel de microalgas *Chlorella protothecoides*; la mayoría de valores estimados para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se encuentran en un rango de $40,67 \text{ MJ/kg} \pm 1,737$, se observa que los valores son cercanos pero inferiores a los reportados para el biodiesel de microalgas *Chlorella protothecoides* teniendo en cuenta que el contenido de carbono, hidrogeno y oxigeno de esta difiere del contenido de carbono, hidrogeno y oxigeno del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, lo que significaría que el biodiesel de microalgas *Chlorella protothecoides* tiene un mejor desempeño en cuanto a la energía que este contiene.

Se consideró un valor promedio de poder calorífico superior estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* de $40,77 \text{ MJ/kg}$, correspondiente a la media geométrica de las estimaciones arrojadas por las correlaciones y modelos que se estudiaron. Este valor se comparó con los valores reportados en la literatura para el biodiesel de palma y el diesel.

Tejeda [79], reporta un valor de poder calorífico superior para el biodiesel de palma B100 de 39,4 MJ/kg. Por su parte Demirbas [93] reporta un poder calorífico superior para el diesel de 44,728 MJ/kg. Estos valores reportados se compararon con el valor estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, el resultado se puede observar en la Figura 11.

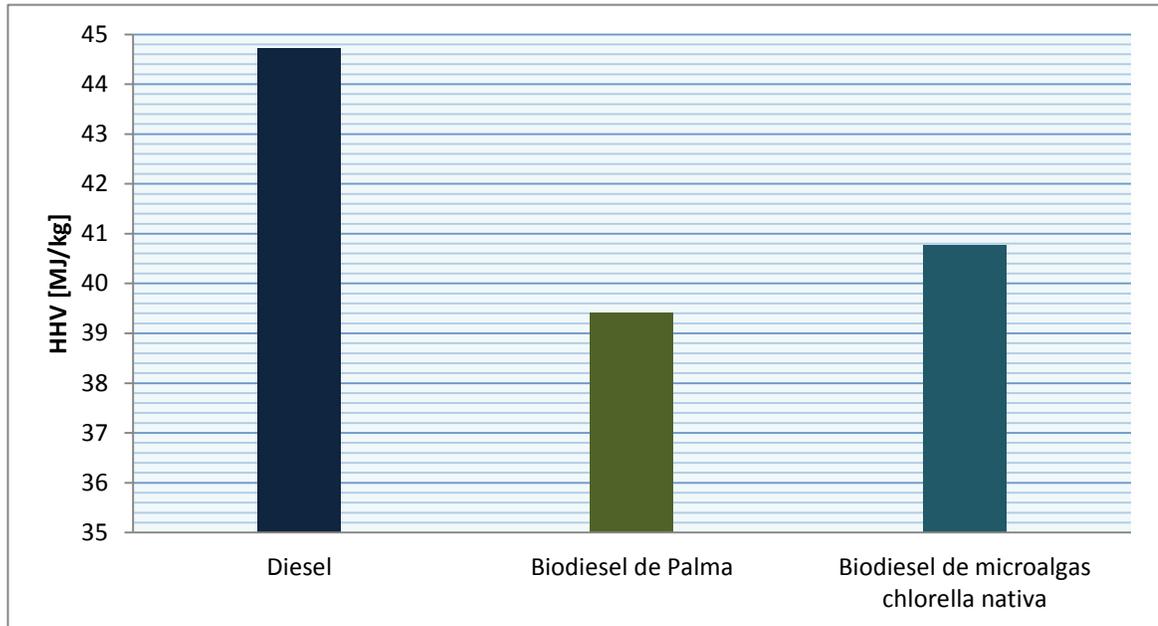


Figura 13. Poder Calorífico Superior (HHV) del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y el diesel

Fuente: Biodiesel de microalgas *C. nativa* elaborado en la presente investigación, biodiesel de palma adaptada de Tejeda [71], diesel adaptada de Demirbas [74].

De la Figura 13, se puede observar que el poder calorífico superior promedio estimado para el biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* es mayor al reportado por Tejeda [79] para el biodiesel de palma, sin embargo se estima seguirá siendo inferior al poder calorífico superior del diesel fósil, lo cual era de esperarse teniendo en cuenta que hay menos contenido de carbono en el biodiesel que en el diesel. Este valor de poder calorífico se encuentra dentro de los límites de calidad establecidos por la normatividad vigente para el biodiesel, se esperaba que este valor estuviera superior al calculado para el biodiesel de palma, debido a la composición elemental de este. Considerando que el poder calorífico superior es una propiedad que caracteriza la energía contenida en un combustible o biocombustible, se puede decir que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* tendrá un

mejor desempeño que el biodiesel de palma en cuanto a la energía que puede proporcionar este biocombustible.

6.2.6 Número de Cetano

El número de cetano se calculó por dos métodos el primero propuesto por Ramírez-Verduzco y colaboradores [9] (Ecuación 5.26) donde se utilizaron los valores de masa molecular para cada metil éster y número de dobles enlaces N de los mismos expuestos en la Tablas 16 y 19, luego se utilizó la regla de mezcla descrita en la ecuación 5.11 para calcular el número de cetano del biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa*.

El segundo método se basa en la regla de mezcla ideal utilizada por numerosas investigaciones, en este caso se utilizaron los números de cetano reportados por Knothe [12], y las fracciones másicas; los valores del número de cetano de los metil ésteres se pueden observar en la Tabla 21.

Tabla 22. Número de Cetano de algunos metil ésteres

Metil Esteres	Fracción Másica	Numero de Cetano CN	Formula abreviada
Metil Palmitato	0,049	88	C16:0
Metil Palmitoleato	0,005	56,59	C16:1
Metil Estereato	0,010	86,9	C18:0
Metil Oleato	0,366	58,9	C18:1
Metil Linoleato	0,208	45,9	C18:2
Metil Linolenato	0,363	37,7	C18:3

Fuente: Este trabajo y adaptación de Knothe [73]

Los resultados de ambos métodos del número de cetano estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se muestran en la Tabla 22; en esta se puede observar que el método predictivo propuesto por Ramírez-Verduzco y colaboradores no es el más apropiado para este tipo de biodiesel, ya que este se basa en biodiesel con alto contenido de

metil ester saturados y ese no es el caso del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, de esta forma se utilizó el resultado obtenido por la ecuación de mezcla ideal, para comparar este con los resultados reportados por Tejeda [79] para el biodiesel de palma y los reportados por Erwin [90] para el diesel.

Tabla 23. Numero de Cetano estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*

	Numero de Cetano (Ec. 26)	Numero Cetano (Mezcla Ideal)
Biodiesel	43,337	50,201

Fuente: esta investigación

En la Figura 14. Se muestra la comparación del número de cetano estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* utilizando la ecuación de mezcla ideal; el número de Cetano reportado por Tejeda [79] para el biodiesel de palma y el número de Cetano reportado por Erwin [90] (50,201; 59; 53,6; respectivamente).

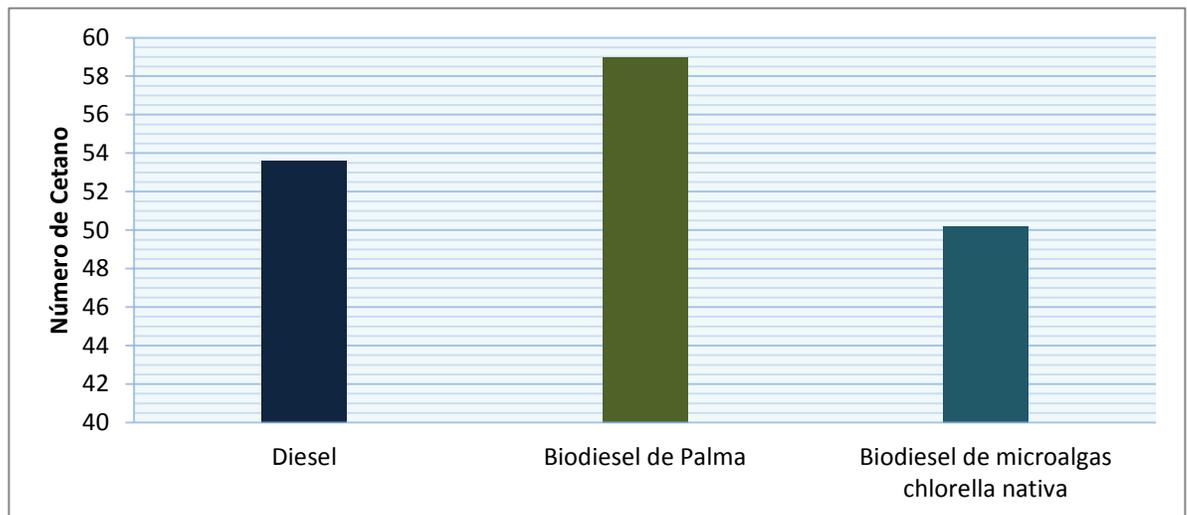


Figura 14. Número de Cetano del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y el diesel

Fuente: Biodiesel de microalgas *C. nativa* este trabajo y adaptación de biodiesel de palma [79] y diesel [90].

De acuerdo con la norma ASTM D-6751 el número de cetano del biodiesel debe estar entre el intervalo 48-60 por lo que los resultados para el numero de cetano estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* mostrados en la Figura 14, son satisfactorios, sin

embargo se estima que es inferior al diesel y al biodiesel de palma, esto debido a la composición de este biodiesel ya que el tipo de metil éster predominante es el metil oleato un metil éster de ácido graso insaturado. El hecho de que el número de cetano del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* sea inferior a los reportados para el biodiesel de palma y el diesel, indica que hay una menor relación de compresión en la cámara de combustión de los motores provocando que el motor pierda potencia y afectando las reacciones de combustión.

6.2.7 Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se estimó mediante las correlaciones de Anand y colaboradores [86] (Ecuaciones 5.28) y Valencia [87] (Ecuación 5.29) prediciendo de esta manera la capacidad calorífica de cada metil éster a través de su peso molecular y de los parámetros descritos en la metodología; luego se empleó la regla de mezcla ideal descrita en la Ecuación 5.11 para estimar la capacidad calorífica del biodiesel usando las fracciones másicas de sus metil ésteres.

Los datos utilizados y los resultados para ambos métodos se pueden constatar en la Tabla 23.

Tabla 24. Capacidad calorífica estimada del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* a 25°C

Metil Esteres	Fracción Másica	Mi[g/mol]	Cp [J/gK] [86]	Cp [J/gK] [87]
Metil Palmitato	0,049	270,451	2,099	1,821
Metil Palmitoleato	0,005	268,435	2,099	1,822
Metil Estereato	0,010	298,504	2,109	1,811
Metil Oleato	0,366	296,488	2,108	1,812
Metil Linoleato	0,208	294,472	2,107	1,812
Metil Linolenato	0,363	292,456	2,107	1,813
Biodiesel	1,000	293,188	2,107	1,813

Por su parte los autores Dzida y Prusakiewicz [94], reportaron la capacidad calorífica para el biodiesel a diferentes temperaturas tomando ésta un valor de 1,98 J/gK a 25°C; Al comparar este valor con los estimados, se encuentra un error de 6,41% para la Ecuación 5.28 y de 8,43% para la Ecuación 5.29. Por lo tanto se considera que la Ecuación 5.28 correspondiente al modelo de Annand [86] es la apropiada para estimar la capacidad calorífica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*.

Posteriormente, se hizo un paralelo del resultado estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* por la ecuación 5.28, el reportado por Dzida y Prusakiewicz [94] para el diesel fósil con un porcentaje de azufre inferior al 10% y el reportado por Tejeda [79] para el biodiesel de palma; este cotejo se puede observar en la Figura 15, donde se observa que el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* tiene una capacidad calorífica estimada mayor a la a la del biodiesel de palma, lo cual era de esperarse debido a los resultados obtenidos para el poder calorífico superior mostrados en la Figura 13 y debido a que según el método de cálculo el valor de la capacidad calorífica depende de la masa molecular del compuesto y como se ha mencionado el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* está compuesto en su mayor parte por metil ésteres de gran peso molecular como el metil oleato y el metil linolenato.

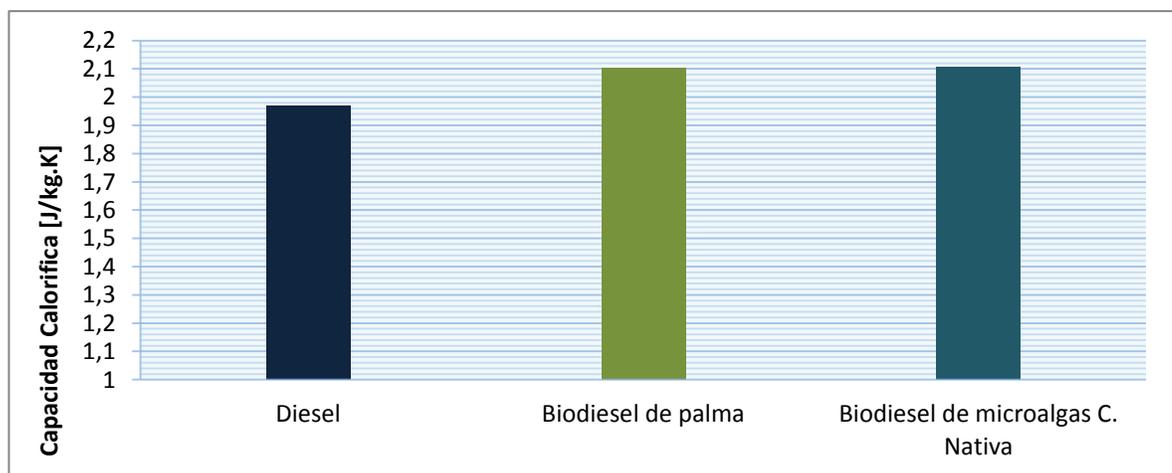


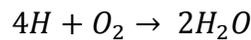
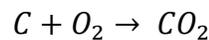
Figura 15. Capacidad calorífica estimada del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y el diesel fósil

Fuente: Biodiesel de microalgas *C. nativa* la presente investigación, biodiesel de palma adaptado de Tejeda [79] y diesel adaptado de Dzida y Prusakiewicz [94]

De la Figura 15, también se puede observar que la capacidad calorífica es mayor para el biodiesel que para el diesel fósil con bajo contenido de azufre, se sabe que esta propiedad es también llamada eficacia del combustible, por lo que se estima que según su capacidad calorífica el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* sea de mejor eficacia que el biodiesel de palma y el diesel fósil ya que este tendría mayor capacidad para absorber, almacenar y transferir calor, de esta manera se prevé que las emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* sean menores que las del biodiesel de palma y las del diesel.

6.3 EMISIONES ESTEQUIOMÉTRICAS

Para realizar el cálculo de emisiones de manera estequiométrica se utilizaron los resultados del análisis elemental del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* reportado en el apartado anterior. Se partió de las reacciones básicas de combustión:



Y se consideró que, de estas reacciones no se producen disociaciones moleculares ni otro tipo de cambio fisicoquímico.

Se manejaron las ecuaciones 5.31, 5.32 y 5.33 para determinar la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión del Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, considerando el análisis elemental del biodiesel (Tabla 18), obteniéndose:

$$Total\ Oxígeno = 2.88102 \frac{kg\ de\ Oxígeno}{kg\ de\ Biodiesel}$$

Luego mediante el uso de la ecuación 5.34 se calculo la cantidad de humos producida usando una base de cálculo de 1 kg. de biodiesel:

$$Humos = 3.88102 \frac{kg\ de\ Humo}{kg\ Biodiesel}$$

Se utilizaron las ecuaciones 5.35 y 5.36 para estimar la cantidad de gases de combustión:

$$kg \text{ de } CO_2 \text{ del } C = 2.835247 \frac{kg \text{ } CO_2}{kg \text{ Biodiesel}}$$

$$kg \text{ de } H_2O \text{ del } H = 1.04567 \frac{kg \text{ } H_2O}{kg \text{ Biodiesel}}$$

Se consideraron dos casos en los que se variaron las composiciones de aire, para observar el comportamiento de las emisiones con respecto a este parámetro:

Caso 1.

Teniendo en cuenta la composición del aire mostrada en la Tabla 24 se calculó la cantidad de aire necesaria para que se dé una combustión estequiométrica.

Tabla 25. Composición del Aire para el Caso 1.

Gas	Fracción mol	Fracción Másica
N ₂	0,78	0,755
O ₂	0,21	0,232
Ar	0,01	0,0123

Con los datos de la Tabla 24 y empleando las ecuaciones 37 y 38 se calculó la cantidad de aire como:

$$Cantidad \text{ de Aire por } kg. \text{ de biodiesel} = 12.4182 \text{ kg de Aire}$$

Se consideraron relaciones en exceso de 5%, 10%, y 15% para el oxígeno y de 5% y 10% de Nitrógeno con el fin de observar la influencia de estas sobre la cantidad de emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*.

Finalmente utilizando las ecuaciones 5.39 - 5.43 se calcularon las cantidades de gases contenidas en los humos de combustión, para una composición volumétrica de aire de 78% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno y 1% de Argón; los resultados se muestran en la Tabla 25.

Tabla 26. Gases de Combustión del Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*. Caso 1

Gases de Combustión	kg/kg. de Combustible
CO ₂	2,068
H ₂ O	0,936
Ar (0 % de aire en exceso)	0,1527
N ₂ (0 % de aire en exceso)	9,3757
N ₂ (5 % de aire en exceso)	9,844
N ₂ (10% de aire en exceso)	10,313
O ₂ (5% de aire en exceso)	0,137
O ₂ (10 % de aire en exceso)	0,262
O ₂ (15% de aire en exceso)	0,376

En los resultados mostrados en la Tabla 25. Se puede observar que la utilización de aire en exceso influye en la cantidad de nitrógeno y oxígeno producido, entre mayor aire en exceso se utilice mayor cantidad de nitrógeno y oxígeno emitida, pero este hecho se evidencia de diferente manera en los gases de combustión ya que el oxígeno interviene en la reacción de combustión por lo que una parte de este se consume y entre mas aire en exceso se utilice se disminuirían las emisiones de CO₂ y de vapor de agua los cuales son gases de efecto invernadero causantes de los principales problemas ambientales que se observan en la actualidad, por el contrario, el nitrógeno no reacciona y un exceso de este incrementaría las emisiones de NO_x, dependiendo la temperatura a la cual se lleve a cabo la reacción de combustión ya que estos solo se forman a altas temperaturas.

Caso 2.

Se tuvo en cuenta la composición del aire mostrada en la Tabla 26.

Tabla 27. Composición del Aire para el Caso 2.

Gas	Fracción mol	Fracción Másica
N ₂	0,79	0,768
O ₂	0,21	0,232

De forma similar al caso anterior se utilizó un exceso de aire, en este caso de 5% y 10% para el oxígeno y el nitrógeno, con el propósito de constatar la influencia de estos en las emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* y además observar de que manera influye la composición del aire en los productos de combustión.

Los resultados se pueden observar en la Tabla 27.

Tabla 28. Gases de Combustión del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*. Caso 2

Gases de Combustión	kg/kg. de Combustible
CO ₂	2,068
H ₂ O	0,936
N ₂ (5 % de aire en exceso)	10,014
N ₂ (10% de aire en exceso)	10,491
O ₂ (5% de aire en exceso)	0,137
O ₂ (10 % de aire en exceso)	0,262

En la Tabla 27 se puede observar la cantidad de productos de combustión emitidos por el biodiesel de microalgas *chlorella nativa* utilizando una relación de aire de 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno, si se comparan los casos 1 y 2 se puede observar un aumento en la emisiones de nitrógeno como era de esperarse ya que este se encuentra en mayor proporción en el aire y no reacciona en la combustión estequiometrica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*; por su parte, la cantidad de oxígeno emitida no varia. Estos resultados se pueden observar en la Figura 16.

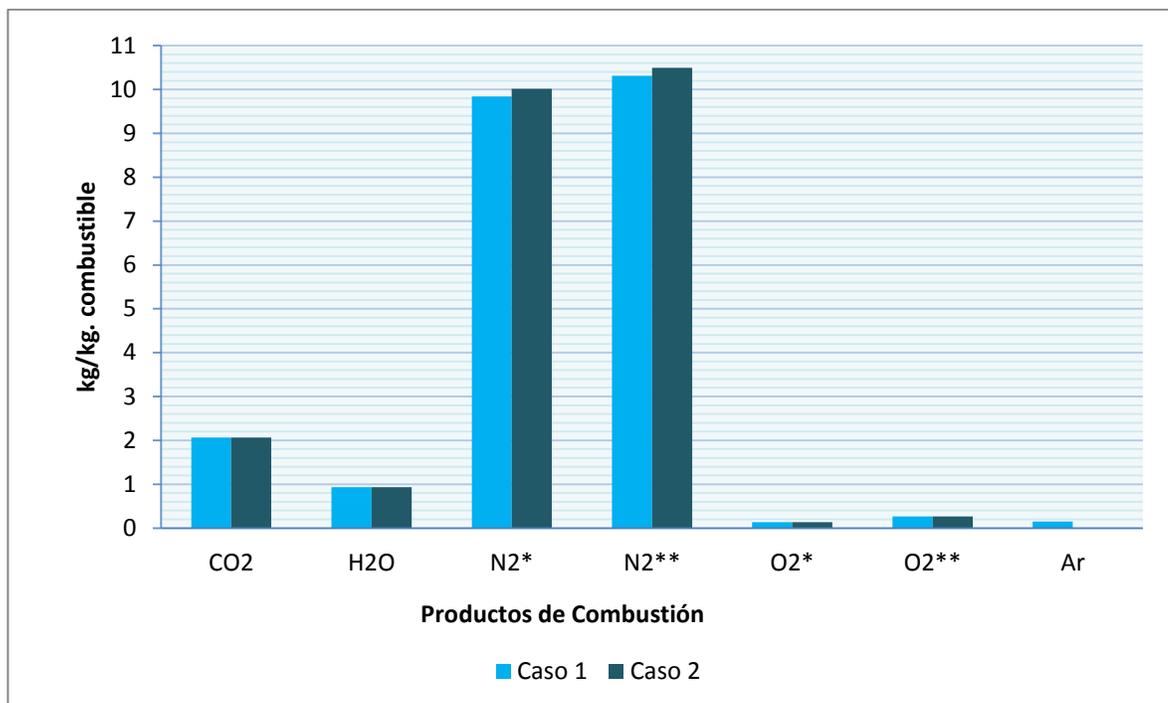


Figura 16. Productos de combustión generados por el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*. Caso 1 vs. Caso 2

Por otra parte, Tejeda [79] reporta emisiones para el biodiesel de palma y el diesel fósil, utilizando una composición molar de aire de 79% nitrógeno y 21% Oxígeno, con relaciones de exceso de aire de 5% y 10%. Los datos reportados se pueden observar en la Tabla 28.

Tabla 29. Gases de combustión del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* vs. Biodiesel de palma y diesel fósil

Gases de Combustión	Diesel	Biodiesel de Palma	Biodiesel de microalgas <i>Chlorella nativa</i>
CO ₂	3,09	2,78	2,068
H ₂ O	1,3	1,06	0,936
N ₂ (0% de aire en exceso)	11,57	9,7	9,537
N ₂ * (5% de aire en exceso)	12,125	10,125	10,014
N ₂ ** (10% de aire en exceso)	12,7	10,65	10,491
O ₂ * (5% de aire en exceso)	0,16	0,145	0,137
O ₂ ** (10% de aire en exceso)	0,345	0,28	0,262

Los datos reportados por Tejeda [79] para el biodiesel de palma y el diesel fósil se comparan con los resultados mostrados en el caso 2, ya que en este caso se utiliza la misma relación molar de aire, esta comparación puede observarse en la Figura 17.

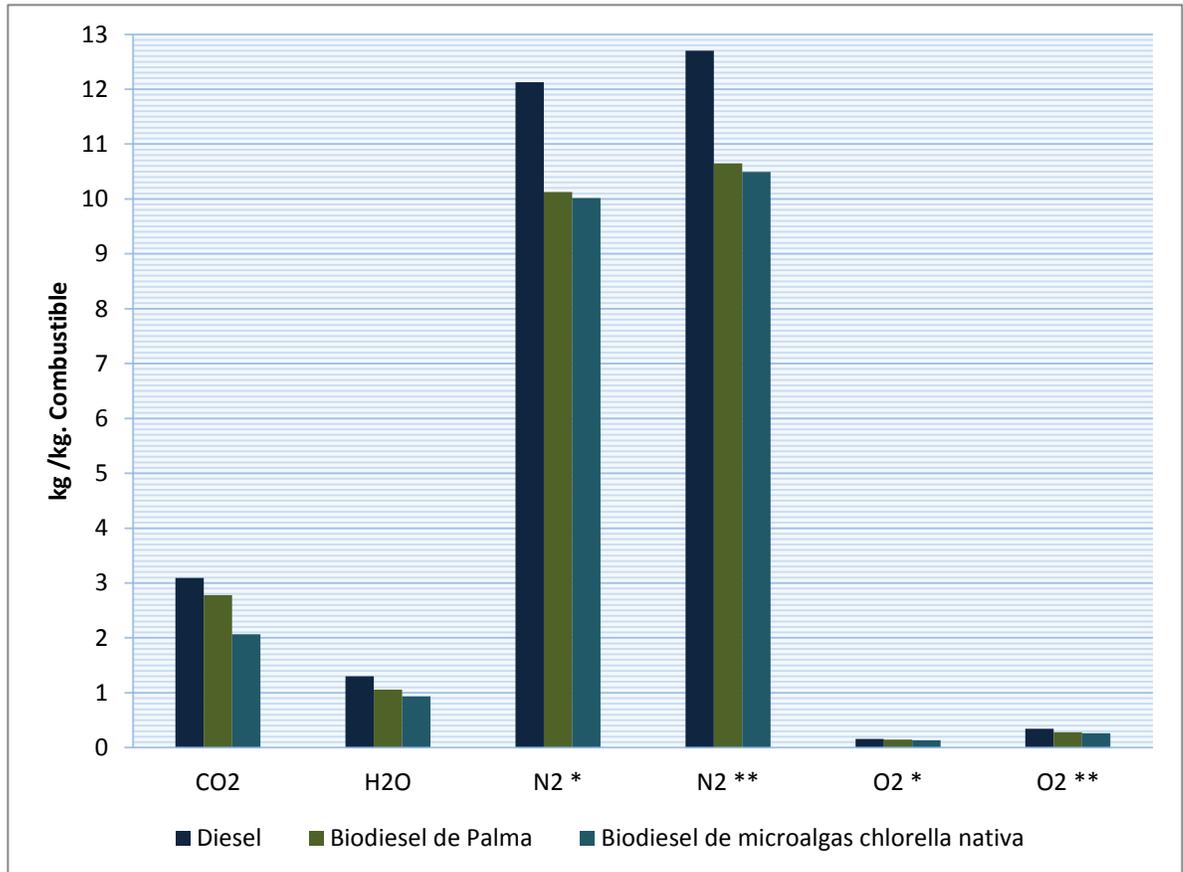


Figura 17. Emisiones generadas por el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* respecto al biodiesel de palma y el diesel

Fuente: Biodiesel de microalgas *C. nativa* este trabajo, diesel y biodiesel de palma adaptado de la referencia [71]

De la Figura 17, respecto a la cantidad de CO₂ generado por el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se puede observar que es inferior a la cantidad de CO₂ que genera el biodiesel de palma y el diesel fósil, este hecho confirma que el uso del biodiesel en este caso el biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* favorece la reducción del efecto invernadero, porque por un lado se produce menos CO₂, y adicionalmente el CO₂ producido a causa de la combustión del biodiesel se incorpora al ciclo del carbono rápidamente debido a que el biodiesel a diferencia del diesel, proviene de fuentes

renovables, este hecho era de esperarse debido a los resultados de la capacidad calorífica mostrados en la figura 15, ya que esta los altos valores en esta propiedad están relacionados con el menor número de emisiones causadas por el combustible.

Las emisiones de H₂O están relacionadas con la cantidad de hidrógeno presente en el biodiesel y con la capacidad calorífica de este, por lo que teniendo en cuenta que el diesel tiene una cantidad superior de hidrógeno, era predecible este resultado, de igual forma debido a la alta capacidad calorífica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* era de esperarse que las emisiones de vapor de agua de este biodiesel fueran inferiores al biodiesel de palma, este hecho favorece la reducción del efecto invernadero debido a que el vapor de agua es un GEI de alta potencia.

No se tuvieron en cuenta las emisiones de SO₂ debido a que estas se relacionan con la cantidad de azufre contenida en el combustible y como bien se sabe el biodiesel a diferencia del diesel no contiene azufre, sin embargo se reporta que el diesel genera una cantidad estimada de 970 mg/kg. de mezcla [79]. Por lo que el uso de biocombustibles permite que se favorezca la reducción de la generación de lluvia ácida que es uno de los principales problemas asociados con este gas.

El oxígeno y nitrógeno en los productos de combustión dependen de la cantidad de aire alimentado. Para el nitrógeno se consideró 0%, 5%* y 10%** de aire en exceso, mientras que para el oxígeno se consideró 5%* y 10%** de aire en exceso. Se observa una disminución de la cantidad de nitrógeno y oxígeno en el biodiesel, siendo menor en el biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* dado que el aire requerido es menor, y por lo tanto la cantidad alimentada de aire también disminuye. Esta disminución es más evidente en el nitrógeno que en el oxígeno ya que, no reacciona en la combustión y que se encuentra en mayor proporción en el aire. De igual forma, se esperaba esta disminución en las emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, teniendo en cuenta los resultados de propiedades como el poder calorífico superior y la capacidad calorífica mostrados en las Figuras 11 y 13 respectivamente.

Cabe señalar que solo se compararon las emisiones de CO₂, H₂O, N₂ y O₂, ya que solo se encontraron en la literatura los datos para estas emisiones, de esta forma para efectos de comparación con el biodiesel de palma se considero una proporción de aire de 79% Nitrógeno y 21% Oxígeno.

6.4 SIMULACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN DEL BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS *Chlorella nativa*

6.4.1 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* a 718 K

La simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza se realizó a temperatura de 718 K, utilizando las ecuaciones del modelo planteado por Molina [2], quien estimó las fracciones mol de los productos de reacción considerando 12 especies para el biodiesel de palma, en este trabajo se consideraron 5 especies C, H, N, O y Ar; se despejaron ecuaciones para las fracciones mol de los productos de reacción para dejarlos en función de la razón de riqueza, del número de moles de biodiesel y la temperatura, y las ecuaciones de la razón de riqueza y los moles de producto, utilizando las ecuaciones de la 5.44 a la 5.56; para obtener las ecuaciones de las 5.57 a la 5.63. Luego, se programaron las ecuaciones 5.57- 5.63 a la temperatura de 718 K, para diferentes valores de FR (0,5- 1,5) con un aumento gradual de 0,1; se utilizó el Software Scilab 5.2.1 para realizar las corridas del modelo para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*.

Luego de obtener los resultados de las fracciones mol de los productos de combustión, estas se normalizaron para graficar el comportamiento de estas con respecto a la razón de riqueza a una temperatura de 718K, el resultado de estas fracciones normalizadas se puede observar en la Tablas 29.

Tabla 30 Fracciones normalizadas de los productos de reacción del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* con respecto a la razón de riqueza a 715 K

FR \ Fracción	H₂O	CO₂	N₂	O₂	Ar
0,5	0,05395324	0,0603728	0,62512216	0,25247265	0,00807916
0,6	0,06435559	0,07201286	0,62137302	0,23422785	0,00803069
0,7	0,07463388	0,08351416	0,61766855	0,21620063	0,00798278
0,8	0,08479037	0,09487912	0,61400794	0,19838705	0,00793552
0,9	0,09482723	0,10611016	0,61039043	0,18078342	0,00788876
1	0,10474642	0,11720961	0,60681547	0,16338598	0,00784252
1,1	0,11455019	0,12817984	0,603282	0,14619113	0,00779683
1,2	0,12426483	0,13885358	0,59990755	0,12922081	0,00775323
1,3	0,13381903	0,14974139	0,5963372	0,11239525	0,00770713
1,4	0,14328809	0,16033705	0,59292439	0,09578746	0,00766302
1,5	0,15264935	0,17081215	0,58955043	0,07936869	0,00761938

El modelo reportado por Molina [2] desarrollado para la evaluación de las emisiones del biodiesel a partir de aceite de palma, se utilizó para el mismo fin con el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, considerando 5 especies como ya se mencionó; en la Tabla 29 se puede observar el comportamiento de las emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* con respecto a las relación de riqueza FR, a una temperatura fija de 718K.

Es pertinente señalar que el modelo desarrollado por Molina [2], aplica para cualquier combustible y a cualquier temperatura deseada, sin embargo para efecto de comparación con el biodiesel de palma se utilizó la temperatura de 718K, ya que Molina [2] reporta resultados para el biodiesel mencionado a esta temperatura, además esta es la temperatura de funcionamiento para los motores de combustión interna.

El modelo que describe el comportamiento de los productos de reacción con respecto a la razón de riqueza a 718 K del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se puede observar en la Figura 18.

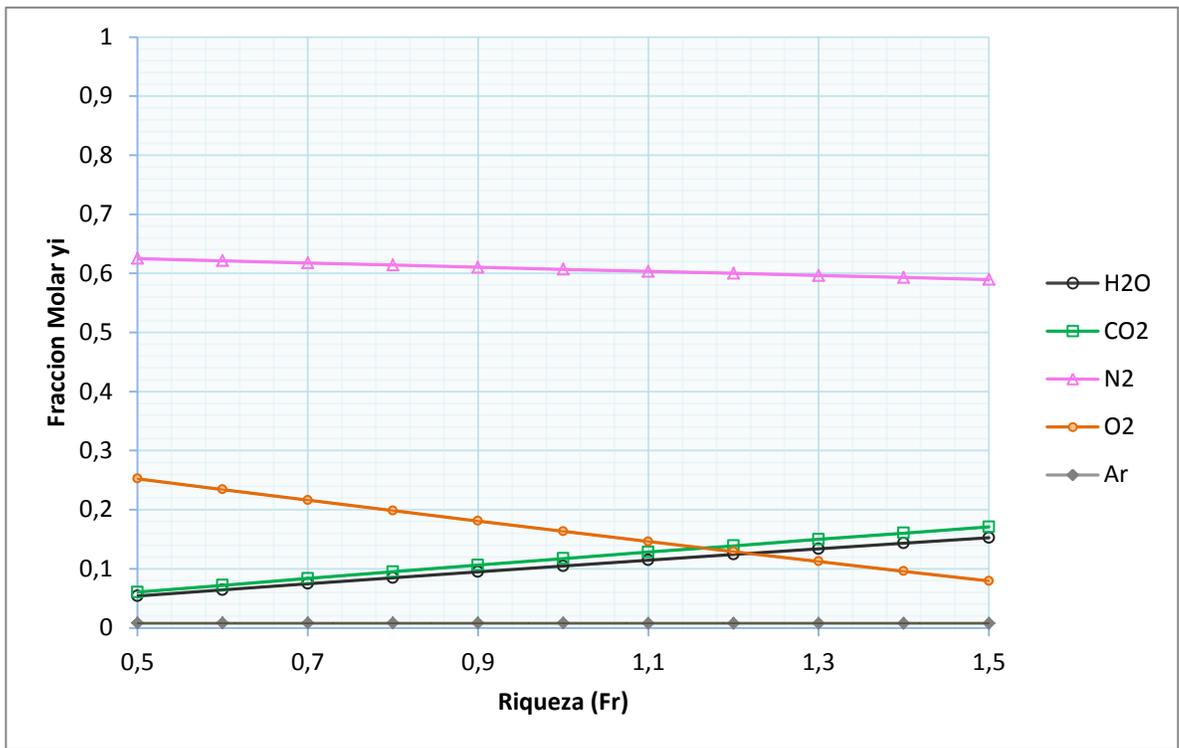


Figura 18. Simulación de la fracción molar de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del biodiesel de microalgas *C. nativa*

Fuente: Realizada en la presente investigación

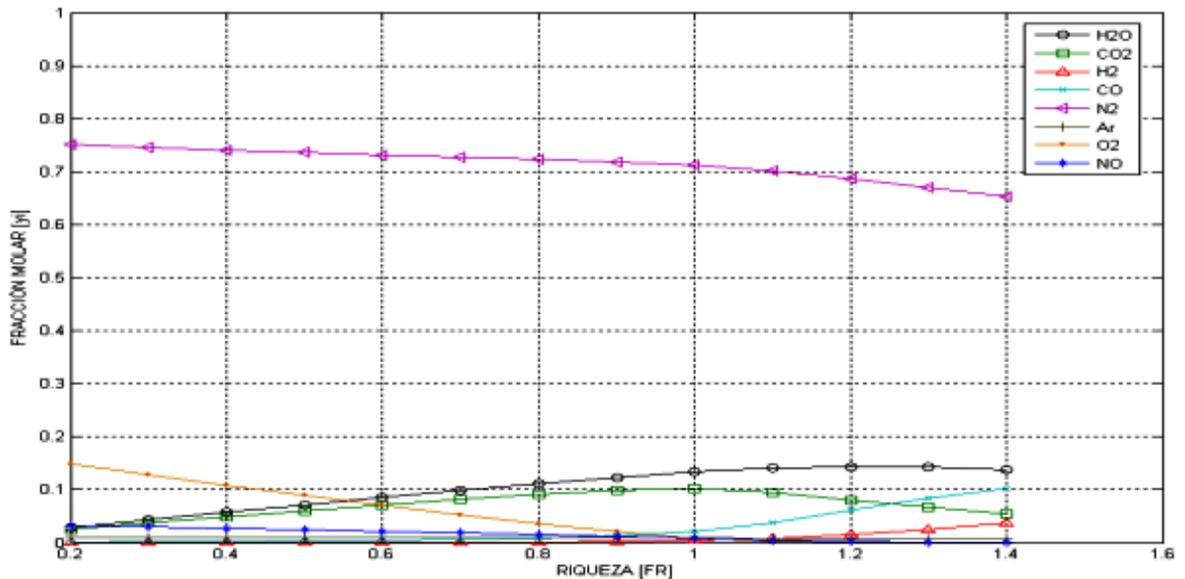


Figura 19. Simulación de la fracción molar de los productos de reacción respecto a la razón de riqueza del biodiesel de palma

Fuente: Adaptado de la referencia [67]

Se comparó la Figura 18, con los resultados obtenidos para el biodiesel de palma considerando 12 especies, este resultado se muestra en la Figura 19.

Como se puede observar en las Figuras 18 y 19 las curvas de los productos de reacción estudiados para biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* son similares a las curvas obtenidas para el biodiesel de palma por Molina [2], sin embargo también se aprecia una disminución considerable en las fracciones de O_2 y un aumento en las fracciones de H_2O y CO_2 ; para el caso del argón las fracciones son las mismas tanto para el biodiesel de palma como para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*.

Al analizar la variación de la composición de los productos de combustión estudiados en el presente trabajo (H_2O , CO_2 , N_2 , O_2 , y Ar); se observa que el contenido de nitrógeno y argón en los productos de combustión es prácticamente el mismo, a medida que varía la fracción de riqueza de la mezcla, ya que por ser gases inertes estos permanecen casi que constantes. En cuanto a las emisiones de CO_2 y vapor de agua se puede decir que aumentan a medida que la mezcla se hace rica, esto se debe a que a medida que aumenta la relación de riqueza aumenta la cantidad de combustible a reaccionar con el aire.

La simulación arroja valores de emisiones de CO_2 y vapor de agua superiores a los estimados en los cálculos estequiométricos debido a que se consideran condiciones de operación que se aproximan a los que se dan en el funcionamiento de motores de combustión; como por ejemplo: elevadas temperaturas y distintas relaciones de mezcla haciendo que se presenten reacciones incompletas y aumente la formación de óxidos y otros productos de reacción.

Comparando las Figuras 18 y 19, se puede observar que las operaciones de combustión con exceso de aire son favorables desde el punto de vista de emisiones de CO_2 y vapor de agua. Ya que un exceso de aire permite que todo el combustible existente reaccione, además que la cantidad de combustible que reacciona en relación a la cantidad de aire es menor.

6.4.2 Simulación de la variación de las fracciones mol de los productos de reacción H₂O y CO₂ respecto a la razón de riqueza del Biodiesel a partir de microalgas *Chlorella nativa* a diferentes temperaturas

Se hizo la simulación de las emisiones de vapor de agua y dióxido de carbono teniendo en cuenta que el oxígeno se trabajó en exceso mientras que el argón y el nitrógeno se tomaron como inertes en el modelo planteado por Molina [2], por lo que no se esperaba una variación en estos productos. Los resultados de la simulación de las emisiones de vapor de agua se muestran en la Figura 20.

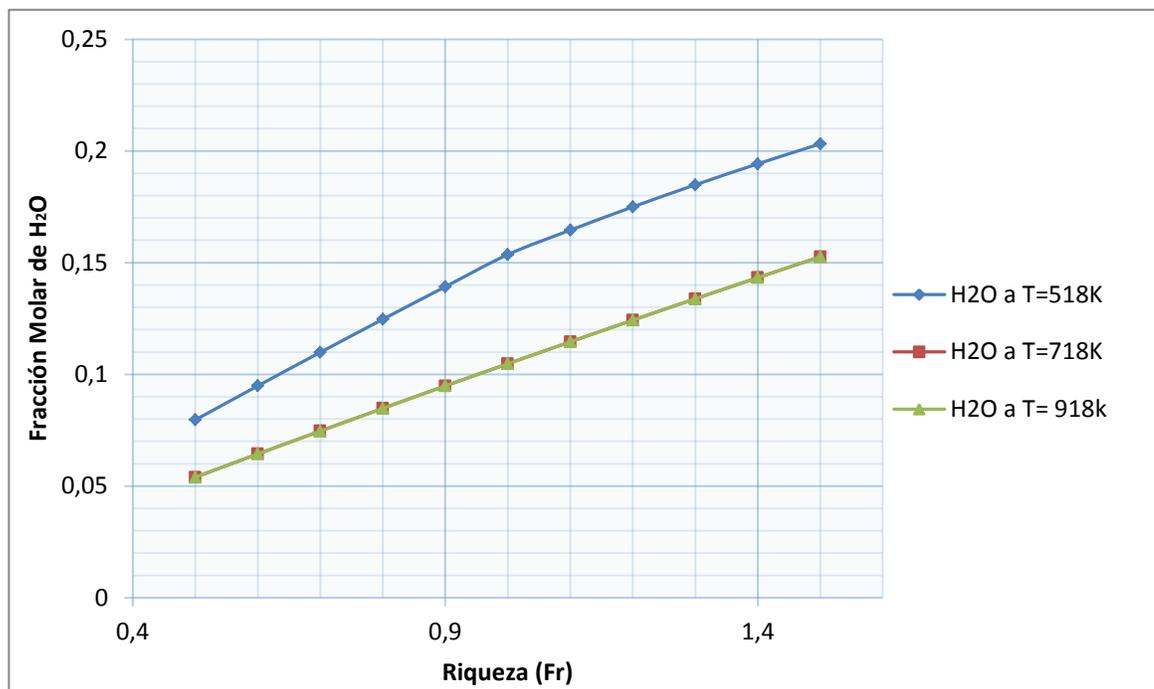


Figura 20. Simulación de la Fracción molar del vapor de agua respecto a la razón de riqueza del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* evaluado a diferentes temperaturas
Fuente: Realizada en la presente investigación

En la Figura 20, se observa el comportamiento de la fracción molar de vapor de agua en función de la riqueza del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, considerando temperaturas dentro del rango de operación de un motor de combustión alternativa (500-1000 K) según Molina [2]. La simulación de la variación de la fracción de vapor de agua se hizo a 518K, 718K y 918K tratando de esta forma de abarcar todo el rango de operación de los tipos de motores antes mencionados.

Al analizar la Figura 20, se observa que a temperaturas cercanas al límite inferior de operación, se emite una mayor cantidad de vapor de agua y a medida que la temperatura aumenta esta variación se va haciendo constante, como era de esperarse ya que a temperaturas menores las reacciones de combustión no se dan de forma completa y por lo tanto hay mayor emisión de vapor de agua, mientras que a altas temperaturas la molécula de agua tiende a disociarse, disminuyendo así su presencia en los productos de combustión.

El resultado de la simulación las emisiones de dióxido de carbono a diferentes temperaturas, se muestra en la Figura 21.

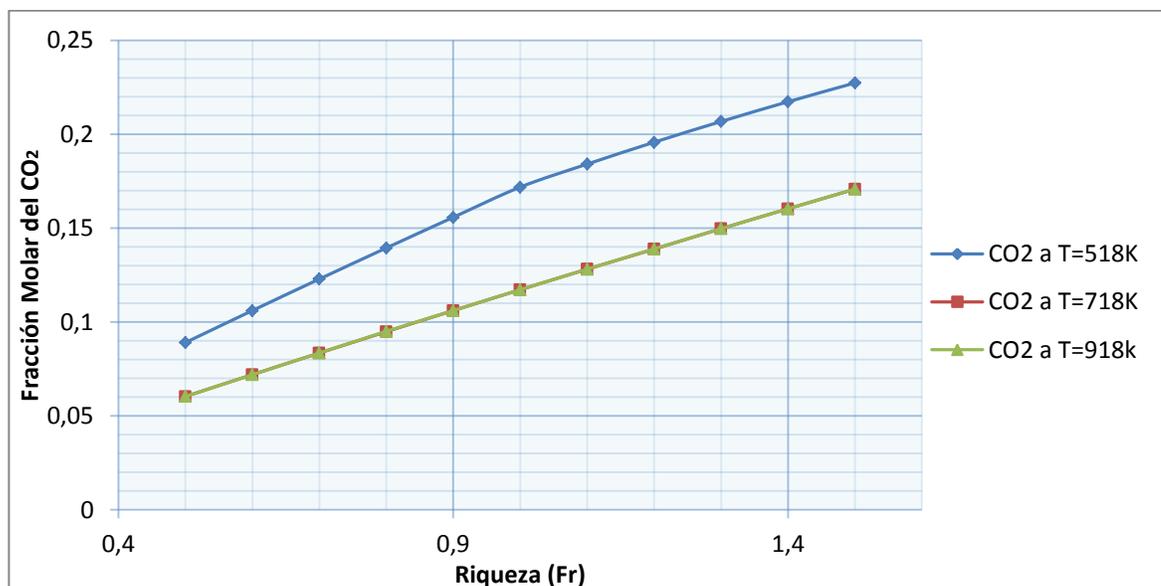


Figura 21. Simulación de la Fracción molar del Dióxido de Carbono respecto a la razón de riqueza del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* evaluado a diferentes temperaturas Fuente: Realizada en la presente investigación

En la Figura 21. se puede observar un comportamiento en las emisiones del dióxido carbono similar al presentado por el vapor de agua, esto se puede explicar gracias a los fenómenos de disociación que se dan a medida que aumenta la temperatura de combustión.

6.5 ANÁLISIS TERMODINÁMICO

En este trabajo se realizó la parte de la termodinámica correspondiente a la energía liberada en el proceso de combustión y la temperatura máxima de los productos de combustión teniendo en cuenta diferentes concentraciones molares de aire.

6.5.1 Energía Liberada

Partiendo de los datos reportados en la Tabla 12, correspondientes a las entalpías de formación de los metil esterés, las fracciones másicas reportadas en la Tabla 13, los datos reportados por Smith y colaboradores [89], las capacidades caloríficas de los productos de combustión a presión constante y el número de moles de los productos y reactivos, se realizó el balance energético, variando la temperatura en el rango de operación de los motores de combustión alternativa; los datos para esta parte del análisis termodinámico se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31. Datos para el Análisis Termodinámico para una reacción de combustión estequiométrica

		Número de Moles							Capacidad Calorífica de los productos [kJ/mol K]	
Compuesto	ΔH°_{f298} [kJ/mol]	FR=0,8	FR= 0,87	FR= 0,91	FR= 0,95	FR=1,0	FR= 1,1	FR= 1,2		
Reactivos	Metil Palmitato	-710,2	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	----
	Metil Palmitoleato	-586,11	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	----
	Metil Estereato	-751,8	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	----
	Metil Oleato	-637,4	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362	----
	Metil Linoleato	-522,9	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	0,207	----
	Metil Linolenato	-408,5	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362	0,362	----
	Biodiesel	-535,58	1	1	1	1	1	1	1	----
	O ₂	0	32,187	29,61	28,32	27,04	25,75	23,175	20,6	----
	N ₂	0	119,54	109,98	105,2	100,42	95,63	86,072	76,508	----
	Ar	0	1,54	1,42	1,36	1,3	1,236	1,112	0,989	----
Productos	H ₂ O	-241,818	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	13,2	0,038
	CO ₂	-393,509	18	18	18	18	18	18	14,4	0,05
	N ₂	0	119,54	109,98	105,2	100,42	95,635	86,072	76,508	0,031
	Ar	0	1,54	1,42	1,36	1,3	1,236	1,112	0,989	0,02
	O ₂	0	6,9375	4,36	3,07	1,79	0,5	0,425	0,4	0,033
	Biodiesel en exceso	-535,58	0	0	0	0	0	0	0,2	0,618

Fuente: Adaptado de las Referencias [88], [89] y de la presente investigación

Se calculó la energía liberada en el proceso de combustión mediante el balance termodinámico a diferentes temperaturas utilizando las Ecuaciones 5,64- 5,67, se graficó este comportamiento para distintas fracciones de riqueza, es decir con diferentes porcentajes de exceso de aire, esta grafica se puede observar en la Figura 22.

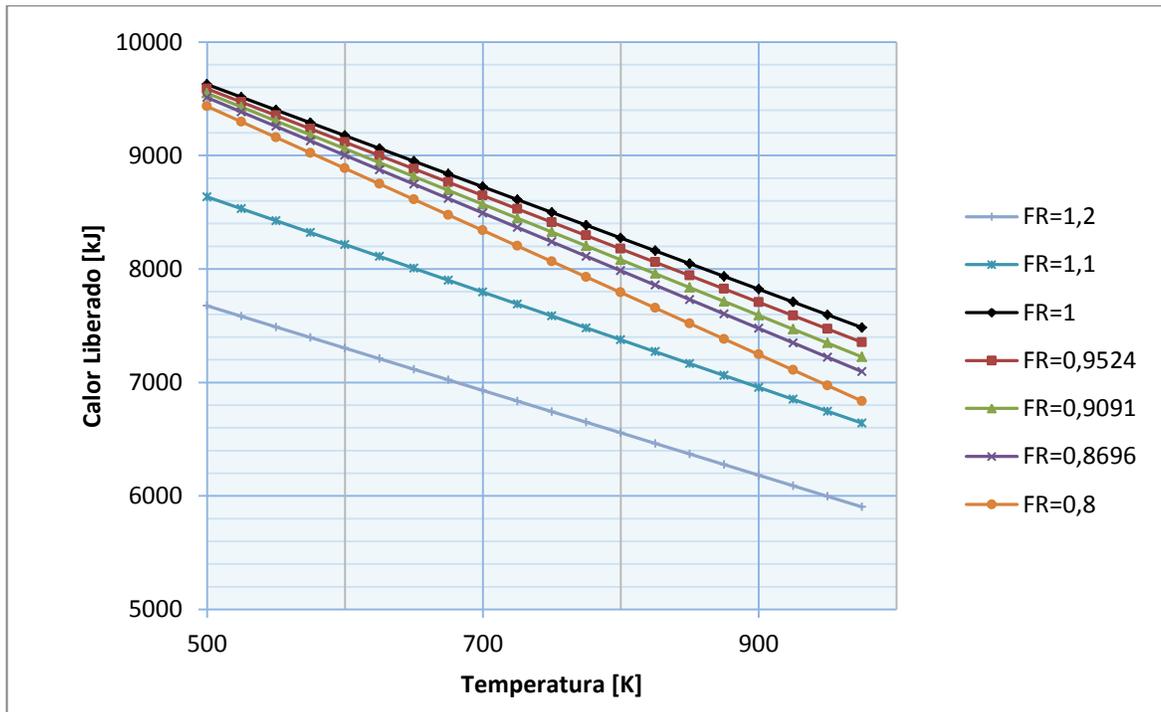


Figura 22. Variación de la Energía Liberada en la combustión del Biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* con respecto a la Temperatura a diferentes razones de Riqueza
Fuente: Realizada en la Presente investigación

En la Figura 22, se puede observar que para un exceso de aire fijo, es decir para una fracción de riqueza determinada el calor disminuye a medida que la temperatura de los gases aumenta, esto indica que los humos se están llevando mucha de la energía liberada en la reacción de combustión emitiendo de esta forma un remanente energético importante y susceptible de aprovechamiento al ambiente, afectando y contaminando el ecosistema.

Por otra parte, para una temperatura fija se observa la influencia negativa del exceso de aire o baja riqueza, puesto que el calor disponible disminuye debido a que el aire que adicionalmente ingresa a la combustión consume parte de la energía química transformada, de igual forma, una alta riqueza también afecta el aprovechamiento útil de la energía

liberada en el proceso puesto que gran parte de esta se pierde junto con el combustible que no reacciona.

6.5.2 Temperatura de Llama Adiabática

Teniendo en cuenta las Ecuaciones 5,64-5,67 y asumiendo un proceso adiabático e isobárico es decir, es la temperatura que se obtiene si todo el calor desarrollado durante el proceso se utiliza integralmente para calentar los productos. Las condiciones de los reactantes, son 298 K y 1 atm.

El procedimiento de cálculo de la temperatura de llama adiabática, considerando los fenómenos de disociación, se llevó a cabo por iteración hasta que se cumpla en la Ecuación 5,64 que la energía liberada sea cero. Se calculó una temperatura de llama adiabática para cada una de las fracciones de riqueza mostradas en la Tabla 31. los resultados se muestran la Figura 23.

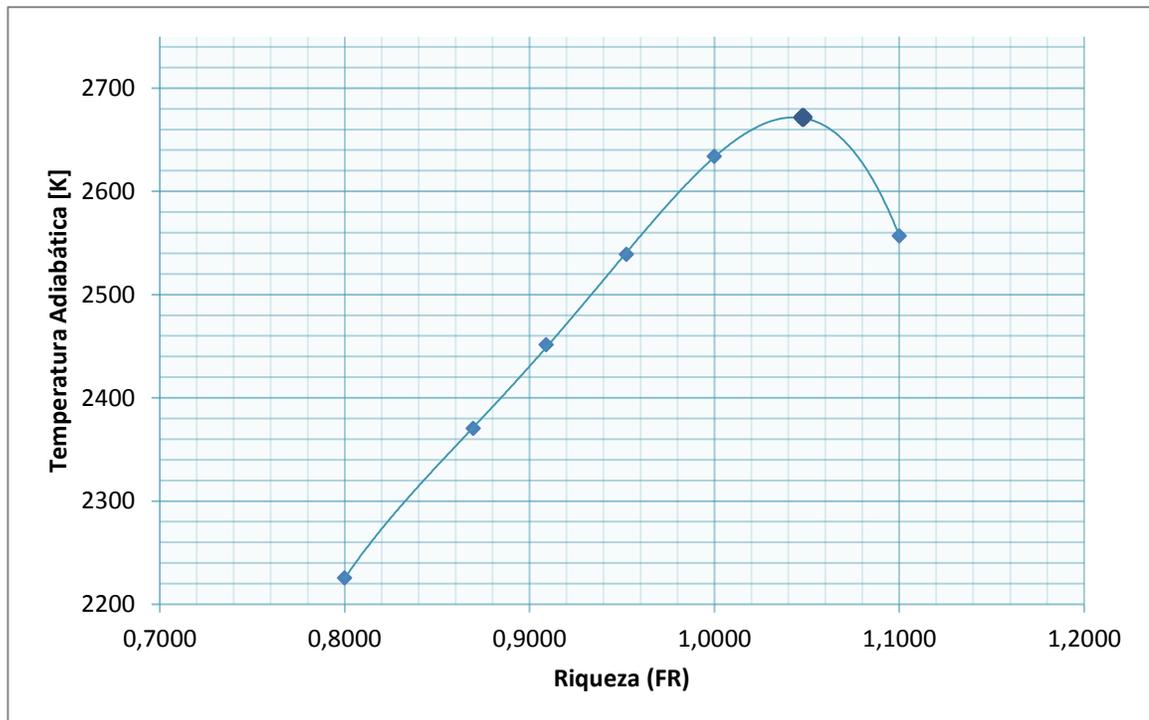


Figura 23. Variación de la Temperatura de Llama Adiabática respecto a la Riqueza
Fuente: Elaborada en la presente investigación

De la Figura 23. se observa que la máxima temperatura se da para una condición de mezcla rica de 4%, este hecho lo explica Serrano y colaboradores [97] en su investigación donde afirma que aunque comúnmente se asocia la temperatura de llama adiabática a la condición estequiométrica o de cero exceso de aire, para la condición real de disociación de especies mayores (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) y formación de especies menores (CO , HO , NO , NO_2 , entre otras) la máxima temperatura adiabática ocurre en una mezcla ligeramente rica porque el calor específico de los productos se reduce permitiendo el incremento de la temperatura, luego de este punto la temperatura de llama adiabática se hace menor ya que la disociación es mayor entre mas rica sea la mezcla, este fenómeno de disociación permite que los productos absorban calor lo cual hace que la temperatura de llama adiabática disminuya.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se estimó la composición del biodiesel obtenido a partir del aceite de las microalgas *Chlorella nativa* mediante las reacciones de transesterificación, obteniéndose una mayor composición de metil ésteres de ácidos grasos insaturados, lo cual influyó en la alta densidad y viscosidad, concluyéndose que se presentaría un alto contenido energético pero menos atractivo que el biodiesel de palma y el diesel ya que generaría mayor consumo de biocombustible y una temperatura mayor para reaccionar en motores de combustión alternativa.

Según su gravedad API, el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se puede clasificar como un combustible intermedio, haciendo que este en relación al diesel y al biodiesel de palma tenga un valor comercial menor.

Los resultados estimados en propiedades como densidad, viscosidad, poder calorífico superior y capacidad calorífica del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* muestran valores similares a los datos reportados por otras investigaciones sobre el biodiesel de microalgas de una cepa diferente de *Chlorella*.

El poder calorífico superior estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* es superior al del biodiesel de palma, por lo que se obtuvo un biodiesel con mayor contenido energético, lo cual representa una mayor potencia en los motores de combustión alternativa; sin embargo el resultado estimado es inferior al diesel fósil como era de esperarse debido a que el número de carbonos que este contiene es superior.

El número de cetano estimado para el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* estuvo por debajo del número de cetano del biodiesel de palma y el diesel fósil, este comportamiento se debió a que estos últimos cuentan con más contenido de carbono y a la ramificación de las cadenas carbonatadas presentes en su estructura molecular. Por otra parte, la capacidad calorífica presentada por el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* es mayor que la del diesel fósil con bajo contenido de azufre y la del biodiesel de palma, por lo que se puede

concluir que según su capacidad calorífica el biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* es mas favorable que el biodiesel de palma y el diesel fósil.

La cantidad de emisiones de CO₂ y vapor de agua estimadas del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*, es menor que las generadas por el biodiesel de palma y el diesel, esto es bastante significativo si se tiene en cuenta que estas emisiones son las principales causantes de la problemática del efecto invernadero. De la misma forma, las emisiones de O₂ y N₂, son inferiores para este tipo de biodiesel lo cual se vería reflejado en una disminución en las emisiones de NOx.

El comportamiento de las emisiones estimadas por la modelación de la reacción a altas temperaturas (718 K), variando la razón de riqueza (FR) es similar al comportamiento presentado por el biodiesel de palma. A estas temperaturas operan los motores de combustión interna y según los resultados, el exceso de aire en el proceso de combustión, disminuye la producción de CO₂ y vapor de H₂O, lo cual es favorable desde el punto de vista ambiental.

De igual forma se puede concluir teniendo en cuenta los resultados mostrados en el análisis termodinámico, que la reacción de combustión es fuertemente exotérmica, siendo el proceso mas eficiente cuando la mezcla es ligeramente rica, ya que en estas condiciones se libera mayor energía útil y se liberan humos con una menor temperatura al ambiente.

Las propiedades estimadas muestran que el biodiesel producido a partir de microalgas *Chlorella nativa* se encuentra dentro del rango de aceptación de calidad de las normas ASTM D-6751 y de la EPA, para los parámetros evaluados. Así mismo, se concluye que este tipo de biodiesel es viable desde el punto de vista ambiental debido a que según lo estimado produce menos emisiones que el diesel y el biodiesel de palma.

8. RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir investigando en el cálculo de las propiedades y emisiones del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* de forma experimental. Producir biodiesel suficiente para evaluar su comportamiento en un motor de combustión interna, permitiendo de esta manera tener datos experimentales de emisiones y variables de funcionamiento que llevarían a una mejor evaluación técnica y ambiental del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa*.

Teniendo en cuenta los resultados estimados para las propiedades del biodiesel de microalgas *Chlorella nativa* se recomienda realizar mezclas con otros tipos de biodiesel y con el diesel, de forma que se puedan hacer estudios de predicciones de propiedades, emisiones y análisis de calidad.

Es recomendable desarrollar un modelo preciso que incluya la cinética química y las condiciones de equilibrio, simulando de esta forma las condiciones de un motor de combustión interna y las emisiones de CO y NO generadas.

De igual forma, se recomienda ampliar la investigación realizando más simulaciones de los productos de combustión respecto a la riqueza a diferentes temperaturas.

REFERENCIAS

- [1] Alvear, Mario; Castillo, Carlos; Henao, Daniela. «Evaluación del pH y concentración de nitrógeno en el cultivo de las microalgas *Dunaliella Salina* y *Chlorella nativa* como fuente de aceite vegetal para la producción de biodiesel,» Tesis. Universidad de Cartagena, Cartagena, 2011.
- [2] Molina, Jose. «Determinación de las propiedades termodinámicas de la mezcla de gases de combustión considerando doce especies,» Tesis. Programa Ingeniería Mecánica - Universidad de Pamplona, Pamplona, 2007.
- [3] Garibay, Adriana; Vazquez-Duhalt, Rafael; Sanchez-Saavedra, Maria; Serrano, L.; Martinez, A. «Biodiesel a partir de microalgas,» Revista *Biotechnologia*, vol 13, n° 3; pp. 38-61, 2009.
- [4] Chisti, Yusuf. «Biodiesel from Microalgae,» *Biotechnology Advances*, vol. 25, n° 2007, pp. 294-306, 2007.
- [5] Chisti, Yusuf. «Biodiesel from microalgae beats bioethanol,» *Trends in Biotechnology*, vol. 26, n° 3, pp. 126-131, 2008.
- [6] Loera-Quezada, Maribel; Olguin, Eugenia «Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades,» Revista Latinoamericana de Biotechnologia vol. 1, n° 1, pp. 91-116, 2010.
- [7] Quezada, Juan C. «Evaluación de la energía de combustión y otros parámetros físico-químicos del biodiesel obtenido a partir de cinco aceites vegetales,» Tesis. Universidad de Zamorano, Tegucigalpa, 2007.
- [8] Piloto Rodriguez, R.; Sierens, R.; Verhelst, S.; Ferrer Frontela, N. «Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel,» *Revista de Ingeniería Mecánica*, vol. 11, n° 3, pp. 33-38, 2008.
- [9] Ramírez-Verduzco, L. F.; Rodríguez-Rodríguez, J. E.; Jaramillo-Jacob, A. «Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition,» *Revista Fuel*. vol. Article in Press, 2011.
- [10] Channiwala, S.; Parikh, P. «A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels,» *Revista Fuel*. vol. 81, pp. 1051-1063, 2002.

- [11] Ferdinand Fassinou, W.; Sako, A.; Fofana, A.; Blaise Koua, K.; Toure, S. «Fatty acids composition as a means to estimate the high heating value (HHV) of vegetable oils and biodiesel fuels,» *Revista Energy*. vol. 35, pp. 4949- 4954 2010.
- [12] Knothe, Gerard «Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters,» *Fuel processing technology*, vol. 86, p. 1059– 1070, 2005.
- [13] Xu, H.; Miao, X.; Wu, Q. «High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters,» *Journal of Biotechnology*, vol. 126, p. 499–507, 2006.
- [14] Miao, X.; Wu, Q. «High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides*,» *Journal of Biotechnology*, vol. 110, p. 85–93, 2004.
- [15] Dubois-Calero. N.; Hossman. M.; Lan. C.; Li, Y.; Wu. N. «Biofuels from microalgae,» *Biotechnology Progress*, vol. 24, n° 4, pp. 815-820, 2008.
- [16] Mata, T.; Martins, A.; Caetano, N. «Microalgae for biodiesel production and other applications: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 1, p. 217–232, 2010.
- [17] Brennan, L.; Owende, P.«Biofuels from microalgae—A review of technologies for production,processing, and extractions of biofuels and co-products,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 14, pp. 557-577, 2009.
- [18] Singh, S.; Singh, D. «Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n° 1, pp. 200-216, 2010.
- [19] Saidon, M. «Biocombustibles: Actores y Debates en America Latina,» *Redalyc*. n° 27, pp. 171-198, 2009.
- [20] Estrada, Cesar, Noguera, Y; Lopez, J. «Desarrollo tecnologico prototipo para la produccion de biodiesel a partir de microalgas en sistemas cerrados como biocombustibles de segunda generacion.,» Eighth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Arequipa, 2010.
- [21] Romero, J.; Miralles, J. «Perspectiva Ambiental: Biocombusibles,» Asociación de maestros Rosa Sensat; Fundación Tierra, Barcelona, 2002.
- [22] Schenk, Hall, Stephens, Marx, Mussgnug, Posten. «Second generation biofuels: high-efficiency

- microalgae for biodiesel production,» vol. 1, n° 1, pp 20-43, 2008.
- [23] Ahmad, M.; Yasin; Derek; Lim. «Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. vol. 15, pp 584-593, 2011.
- [24] Spolaore, P.; Joannis-Cassan, C.; Duran, E.; «Commercial Applications of Microalgae,» vol. 101, n° 2, pp 87-96, 2006.
- [25] Sheehan, Camobreco, Duffield, Graboski, Shapouri, «Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus,» National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 1998.
- [26] Li, Q.; Du, W.; Liu, D. «Perspectives of microbial oils for biodiesel production,» *Appl Microbiol Biotechnol*. vol. 80, n° 5, pp 749-756, 2008.
- [27] Kadam, K.«Environmental implications of power generation via coal microalgae cofiring,» *Energy*. vol. 27, pp. 905-922, 2002.
- [28] Morais, G. d.; Costa, V. «Isolation and selection of microalgae from coal fired thermoelectric power plant for biofixation of carbon dioxide,» *Energy conversion & management*, vol. 48, p. 2169–2173, 2007.
- [29] Reid, R.; Prausnitz, J.; Poling, B.; *The Properties of Gases and Liquids*, 4th ed., New York: McGraw Hill Book Company, 1987.
- [30] Clements, L. Davis «Biodiesel- Resources,» Biodiesel Organization, 1996. [En línea]. Available: http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/19960101_gen-277.pdf. [Último acceso: 11 08 2011].
- [31] Krisnangkura, K.; Yimsuwanb, T.; Pairintra, R. «An empirical approach in predicting biodiesel viscosity at variuos temperatures,» *Fuel*. vol. 85, pp 107- 113, 2006.
- [32] Lapuerta, M.; Rodriguez-Fernandez, J.; Font de Mora, E. «Correlation for the estimation of the cetane number of biodiesel fuels and implications implications on the iodine number,» *Chemistry and Physics of Lipids*. vol. 37, pp 4337-4344, 2009.
- [33] Cheenkachorn, K. «Predicting Properties of Biodiesels Using Statistical Models and Artificial Neural Networks,» *The Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE)* vol. 7, n° 02, pp 176-179, 2006.

- [34] Torok, A. «Theoretical estimation of the environmental impact of biofuel mixtures,» vol. 24, nº 1, pp 26-29, 2009.
- [35] Hung Chen, Y.; Yu Huang, B.; Chiang, T.-H.; Tang, T.-C. «Fuel properties of microalgae (*Chlorella protothecoides*) oil biodiesel and its blends with petroleum diesel,» *Fuel*, vol. 94, pp. 270-273, 2012.
- [36] ASTM international, «ASTM International: Standarts Wolrdwide,» ASTM Organization, 2002. [En línea]. Available: <http://www.astm.org/Standards/D6751.htm>. [Último acceso: 3 Marzo 2011].
- [37] Lin, Cunshan, Vittayapadung, Xiangqian y Mingdong, «Opportunities and challenges for biodiesel fuel,» *Applied Energy*. vol. 88, nº 1, pp 1020-1031, 2011.
- [38] Schuchardta, U.; Serchelia, R.; Vargas, R. M. «Transesterification of Vegetable Oils: a Review,» *J. Braz. Chem. Soc*, vol. 9, nº 1, pp. 199-210, 1998.
- [39] Aliseda Montero, R. «Estudio de la transesterificación de aceite vegetal con metanol,» Tesis. Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, 2002.
- [40] Cheng, J.; Timilsina, G. «Status and barriers of advanced biofuel technologies: A review,» *Renewable Energy*. vol. 36, nº 1, pp 3541-3549, 2011.
- [41] Avila, A. «Desarrollo de la cinética química de la transesterificación de la oleína de palma,» Tesis. Universidad del Norte, Barranquilla, 2006.
- [42] Tomei, J. U. P. « Argentinean soy-based biodiesel: An introduction to production and impacts,» *Energy Policy*, vol. 37, nº 10, pp. 3890-3898, 2009.
- [43] Setien, J. m.; Silva, A.; Hernandez, M. «Fabricación de Aceites y Grasas Vegetales,» [En línea]. Available: <http://www.apecsacv.com/pdf/acieteHojaTecnica.pdf>. [Último acceso: 18 Abril 2012].
- [44] Karmakar, A.; K. S. M. S. «Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production,» *Bioresource Technology*, vol. 101, nº 19, pp. 7201-7210, 2010.
- [45] Calvo, M. «Bioquímica de los Alimentos,» *Milk Science*, 2002. [En línea]. Available: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/lipidos/vegcomunes.html>. [Último acceso: 18 Abril 2012].

- [46] Canakci, M. «The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks,» *Bioresource Technology*, vol. 98, nº 1, pp. 183-190, 2007.
- [47] JATROPHA HISPANIA, S.L., «Jatropha España,» 2009. [En línea]. Available: www.jatropha.es. [Último acceso: 22 Febrero 2012].
- [48] Medina, L. A. «DICTUS, Departamento de Investigacion Cientifica y Tecnologica de la Universidad de Sonora,» 2008. [En línea]. Available: http://www.dictus.uson.mx/bio3/docs/Medina_BIO3_2008.pdf. [Último acceso: 22 Febrero 2012].
- [49] Castellanos, J. «La educacion agricola,» 14 Octubre 2007. [En línea]. Available: <http://laeducacionagricola.blogspot.com/2007/10/la-jojoba-un-cultivo-para-zonas-ridas-o.html>. [Último acceso: 22 Febrero 2012].
- [50] Miliarium Aureum, S.L. «Miliarium, Ingenieria Civily Medio Ambiente,» Julio 2004. [En línea]. Available: <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/Biodiesel.asp>. [Último acceso: 18 Enero 2012].
- [51] Wang, B.; Li, Y. Wu, N.; Lan, C. «CO2 bio-mitigation using microalgae,» *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 79, nº 5, pp. 707-718, 2008.
- [52] Raja R, Hemaiswarya S, Kumar NA, Sridhar S, Rengasamy R. «A perspective on the biotechnological potential of microalgae,» *Critical Reviews in Microbiology*, vol. 34, nº 2, pp. 77-88, 2008.
- [53] Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, Roessler P. «A look back at the U.S. Department of Energy's aquatic species program: biodiesel from algae.» National Renewable Energy Laboratory, USA, 1998.
- [54] Li Y, Wang B, Wu N, Lan CQ. « Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid production of *Neochloris oleoabundans*,» *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 81, nº 4, pp. 629-636, 2008.
- [55] Escuela Universitaria de ingeniería Técnica Agrícola de la Ciudad Real, «Hidraulica. Generalidades,» [En línea]. Available: http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema1.PDF. [Último acceso: 18 Abril 2012].
- [56] Benjumea, P.; Alvarez, A.; Alexandra, M. «Predicción del efecto de la temperatura sobre la

viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional,» *Revista Energética*, vol. 35, pp. 33-38, 2006.

- [57] Arrhenius, S. «Uber die Dissociation der in Wasser gelosten Stoffe,» vol. 1, pp. 631-648, 1887.
- [58] Bingham, E. «The viscosity of binary mixtures,», *Revista Journal of phys. chem.* vol. 18, pp. 157-165, 1914.
- [59] Kendall J, Monroe K. «The viscosity-composition curve for ideal liquid mixtures,» de *The viscosity of liquids II*, vol. 9, *Am Chem J*, 1917, p. 1787–1802.
- [60] Rackett, H. G. «Equation of state for saturated liquids,» pp. 514-517, vol. 15, 1970.
- [61] Yamada, T.; Gunn, R. «Saturated liquid molar volumes. Rackett equation,» *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 18, pp. 234-236, 1973.
- [62] Lapuerta, M.; Rodríguez-Fernández, J.; Armas, O. «Correlation for the estimation of the density of fatty acid esters fuels and its implications. A proposed Biodiesel Cetane Index,» vol. 163, pp. 720-727, 2010.
- [63] Selvig, WA., Gibson IH. «Calorific value of coal,» *Chemistry of coal utilization*, vol. 1, p. 139, 1945.
- [64] Strache, H.; Lant, R. «Entstehung und chemisches verhalten der kohlen und ihrer bestanteile, untersuchung der kohlen,» de *Kohlenchemie*, Alemania, Leipzig: Akademische Verlag , 1924, p. 476.
- [65] Streuer, W. «Brennstoff,» *Chemie*, vol. 7, pp. 344-347, 1926.
- [66] Schuster, «Glucauf,» vol. 67, pp. 232-235, 1931.
- [67] Gumz, W. «Feuerungstech,» *Chemical Abstract*, vol. 26, pp. 322-323, 1938.
- [68] IGT, Coal conversion systems technical data book, Springfield: DOE Contract EX 76-C- 01-2286, 1978.
- [69] Jenkins, B.; Ebeling, J. «Correlation of physical and chemical properties of terrestrial biomass with conversion,» de *IX Symposium energy from biomass and waste* , 1985.
- [70] Beckman, D.; Elliot, D.; Gevert, B.; Omtman, A.; Solantausta, Y.; Talenheimo, V. «Techno-

economyc assesment of selected biomass liquefaction process,» VTT, ESPOO, Finlandia, 1990.

- [71] Knothe, G.; Matheausb, A. C.; Ryan, T. W. «Cetane numbers of branched and straight-chain fatty esters determined in an ignition quality tester,» *Fuel*, vol. 82, n° 2003, p. 971–975, 2003.
- [72] Agencia de protección ambiental de los EE.UU, «Area interior de calidad EPA,» 30 Septiembre 2010. [En línea]. Available: http://www.epa.gov/iaq/co_sp.html. [Último acceso: 18 Agosto 2011].
- [73] Sistema de Informacion Ambiental de Colombia SIAC, «Sistema de Informacion Ambiental de Colombia SIAC,» AXESNET S.A.S, 1 Enero 2011. [En línea]. Available: <http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=582&conID=615>. [Último acceso: 2011 Agosto 23].
- [74] Larosa, R. «Biodiesel,» Biodiesel Revista, [En línea]. Available: <http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf>. [Último acceso: 25 Febrero 2011].
- [75] Ecologismo, «Gases de Efecto Invernadero,» Ecologismo, 13 Agosto 2008. [En línea]. Available: <http://www.ecologismo.com/2008/08/13/gases-del-efecto-invernadero-dioxido-de-carbono/>. [Último acceso: 20 Agosto 2011].
- [76] Balat, M.; Havva, B. «Progress in biodiesel processing,» , revista Applied Energy, vol. 87, n° 1, pp. 1815-1835, 2010.
- [77] Cantero, K.; Archila, J. «Simulación de un Proceso de Producción de Biodiesel por Lotes,» *Prospectiva*, vol. 8, n° 1, pp. 35-42, 2010.
- [78] European Biodiesel Board, «EBBEU European Biodiesel Board,» EBBEU, [En línea]. Available: www.ebbeu.org/stats.php. [Último acceso: 27 febrero 2011].
- [79] Tejada Benitez, L. «Bases computacionales para la estimacion de las emisiones de las propiedades de los biocombustibles y sus mezclas,» Tesis. Universidad Tecnologica de Bolivar, Cartagena, 2011.
- [80] Demirbras, A. «Biodiesel from oilgae, biofixation of carbon dioxide by microalgae: A solution to pollution problems,» *Applied Energy*, vol. 88, n° 1, pp. 3541-3547, 2011.
- [81] Ameer; Gopal; Jebaraj. «A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance,» *Revista Renewable and sustainable Energy Review*, vol. 13, n° 1, pp. 1628-1634, 2009.

- [82] Baroutian; Aroua, K.; Raman, V; Sulaiman, N. «Prediction of Palm Oil-Based Methyl Ester Biodiesel Density,» *Revista Journal of Applied Science*, vol. 8, n° 10, pp. 3005-3011, 2008.
- [83] Centeno, G.; Sanchez-Reyna, G.; Ancheyta, J.; Muñoz, J.; Cardona, N. «Testing various mixing rules for calculation of viscosity of petroleum blends,» *Revista Fuel*, pp. 3561- 3570, 2011.
- [84] McMurry, J. «Biomoléculas: Lípidos,» de *Química Orgánica*, México, Thomson, 2004, pp. 1027-1030.
- [85] Alvarez Barrera, D. «Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha* e *Higuerilla*,» Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacan, 2011.
- [86] Anand, K.; Sharma, R.; Mehta, P. S. «A comprehensive approach for estimating thermo-physical properties of biodiesel fuels,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 235-242, 2011.
- [87] Valencia, P. S. «Termodinámica,» [En línea]. Available: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090002/html/pages/cap4/c4_3.htm. [Último acceso: 21 octubre 2011].
- [88] Aca-Aca, G; Sánchez-Daza, O; López- Arenas, T; Sales-Cruz, M. «Estimación de Propiedades termodinámicas de los compuestos involucrados en la Producción de biodiesel» *Revista: Superficies y Vacío*; Vol: 22; N°: 3; pp.:15-19; 2009
- [89] Smith J.M.; Van-Ness H.C.; Abbott M.M.; «Efectos Térmicos» *Introducción a la termodinamica en la Ingeniería Química*; Mexico D.F.; Ed. Mc Graw Hill; pp.: 125-158, 2007
- [90] Sales-Cruz, M.; Aca-Aca, G.; Sánchez-Daza, O.; López-Arenas, T. «Predicting critical properties, density and viscosity of fatty acids, triacylglycerols and methyl esters by group contribution methods,» Elsevier B.V., Mexico D.F., 2010.
- [91] García, M.; Gonzalo, A.; Sánchez, J. L.; Arauzo, J.; Peña, J. Á. «Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends,» *Bioresource Technology* , vol. 101, n° 2010, p. 4431–4439, 2010.
- [92] Erwin, J «ASSAY OF DIESEL FUEL COMPONENTS PROPERTIES AND PERFORMANCE,» de *Symposium on Processing and product selectivity of synthetic fuels* , Washington DC, 1992.

- [93] AMBISOL, «AMBISOL: Normas de Calidad del Biodiesel,» Garabato Studio, 30 Octubre 2008. [En línea]. Available: <http://www.ambisol.es/index.php?Tema=detallen&id=418>. [Último acceso: 3 Marzo 2012].
- [94] UNAM, «Petroleo y Derivados,» [En línea]. Available: <http://profesores.fi-b.unam.mx/13prof/Carpeta%20energ%EDa%20y%20ambiente/Petroleo%20y%20Derivados.pdf>. [Último acceso: 3 Marzo 2012].
- [95] Demirbas, A. «A direct route to the calculation of heating values of liquid fuels by using their density and viscosity measurements,» *Energy Conversion & Management*, vol. 41, pp. 1609 - 1614, 2000.
- [96] Dzida, M.; Prusakiewicz, P. «The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel,» *Fuel*, vol. 87, p. 1941–1948, 2008 .
- [97] Serrano Juan Carlos; Carranza Sanchez, Yamid «Análisis Teórico de la combustión en quemadores de gas natural»; *Revista Scientia et Technia*; Vol:19; n°: 29; pp.139-143, 2005

ANEXOS

Anexo A. Hojas de Calculo de propiedades del biodiesel (Microsoft Excel 2010)

A.1 Densidad y Gravedad API

Calculos Tesis - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Nitro PDF Professional

Calibri 11 Fuente Alineación Número

B20 $=F13*(B16/(D13*B17*B18^(1+((1-B19)^(2/7))))$

Densidad											
Acidos Grasos	%(prueba	Puerta g/cm3	Tc [k Sales	[bar Sales	ZRA Sales	[T=288,1 5 K	Molecular Rep. Ram	pi - Ram- Verd. g/cm3	moles	Fraccion molar	
Acido Palmítico (C16:0)	0,0487	0,8505	780,38	14,18	0,2295	0,388465	270,45	0,864	0,00018	0,053	
Acido Palmítico (C16:0)	0,0051	0,875					268,43	0,876	1,9E-05	0,006	
Acido Estearico (C18:0)	0,0102	0,8496	796,65	12,44	0,2247	0,380531	298,50	0,863	3,42E-05	0,010	
Acido Oleico (C18:1)	0,3658	0,874	795,17	12,16	0,2194	0,381239	296,49	0,875	0,001234	0,362	
Acido Linoleico (C18:2)	0,2076	0,889	793,68	11,9	0,2255	0,381955	294,47	0,887	0,000705	0,207	
Acido Linolenico (C18:3)	0,3625	0,895	792,18	11,64	0,2284	0,382678	292,46	0,898	0,00124	0,363	
Total	0,9999								0,003412	1	
Total de AGS	0,0589							$\rho_l = 0,8463 + \frac{1,9}{M_l} + 0,0118 N$ Ec.13			
Total de AGI	0,941										
Temperatura	303,15	R[Pa. M3/mol.K]	83,14	M[g/mol]	293,1						
Metodo Racket	Densidad		Rango Perc	0,002			RA, RV	PromMolar	Xu	Hung Cheng	
$P_c = \sum_{i=1}^n P_{ci}^4$ Ec.10	11,96		Promedio	0,884		Densidad Relativa	0,885	0,883	0,864	0,882	
$T_c = \sum_{i=1}^n T_{ci}^4$ Ec.11	788,581518		Desv Estand	0,0012		API	28,387	28,749	32,27315	28,93084	
$Z_{RA} = \sum_{i=1}^n Z_{RAi}^4$ Ec.12	0,22329254		Mediana	0,884							
Tr	0,38016107		Media Geom	0,884							
$\rho_{mezcla} = \frac{P_c}{RT_c Z_{RA}}$ Ec.13	0,885					$API = \frac{141,5}{\rho_{mez}} - 131,5$ Ecuacion 7		Densidad del Agua		1	
Densidad Promedio	Densidad					Diesel	35,800				
$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i x_i$	0,88325					Biodiesel de	32,720				
						Biodiesel de	28,387				
Metodo de Ramirez	Densidad										
$\rho_m = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{x_i} - S_{m(2-c)}$	0,88504										
Xu	0,864		Diesel	0,846							
Hung Chen	0,882		Biodiesel de	0,862							
Rackett	0,885		Biodiesel de	0,885							
Promedio molar	0,883										
Ramirez-Verduzco	0,885										

Densidad Numero de Cetano Analisis Elemental Capacidad Calorifica Fuentes de Biodiesel Poder Cal

A.2 Análisis Elemental

Calculos Tesis - Micro

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Nitro PDF Profession

Calibri 11 Fuente Alineación Número

Portapap... Pegar Ajustar texto Combinar y centrar Número

B9 $= (E3*B3)+(E4*B4)+(E5*B5)+(E6*B6)+(E7*B7)+(E8*B8)$

	A	B	C	D	E	F	G
1	Análisis Elemental						
2	Metil Esteres	%C	%H	%O	Fracción Molar	Fracción Masica	
3	Metil Palmitato	75,495	12,673	11,832	0,053	0,049	
4	Metil Palmítoleato	76,062	12,017	11,291	0,006	0,005	
5	Metil Estereato	76,447	12,832	10,72	0,01	0,01	
6	Metil Oleato	76,967	12,24	10,793	0,361	0,365	
7	Metil Linoleato	77,494	11,639	10,867	0,207	0,208	
8	Metil Linolenato	78,028	11,03	10,942	0,363	0,363	
9	BIODIESEL	77,373	11,704	10,920	1	1	
10	% masico	77,380	11,081	10,915			
11							
12	C/H	6,611					
13							
14	Elemento	Biodiesel de microalgas chlorella nativa	Biodiesel de palma	Diesel	Desviación Est		
15	C	77,45	76,41	85,98	0,73539105		
16	H	11,716	12,31	12,97	0,42002143		
17	O	11,931	11,28	0,53	0,46032651		
18	S	0	0	0,52			
19							
20	Kg d Biodiesel	293,1877596					
21	H	34,31438461					
22	C	226,8469514					
23	O	32,01531174					
24							

Densidad Numero de Cetano **Análisis Elemental** Capacidad Calorifica Fuentes de Biodiesel

A.3 Viscosidad

Calculos Tesis - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Nitro PDF Professional

Calibri 11 A A Ajustar texto Número

Pegar Fuente Alineación Número Estilos

C25 $f_x = \text{=EXP}((B3*\text{LN}(A27))+(B4*\text{LN}(A28))+(B5*\text{LN}(A29))+(B6*\text{LN}(A30))+(B7*\text{LN}(A31))+(B8*\text{LN}(A32)))$

Calculo de Viscosidad								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Acidos Grasos	%(prueba)	visc. Cin. Knothe a 40°C	p Knothe gl/cm3	Visc. Din. Knothe a 40°C mPa.s	Peso Molecular (g/mol)	Visc. Cin. Calc. Ramirez-verd	p Ramirez-verd gl/cm3
3	Acido Palmítico (C16:0)	0,0487	4,38	0,8505	3,72519	270,4507	4,370267444	0,8644
4	Acido Palmítico (C16:1)	0,0051	3,67	0,875	3,21125	268,4348	3,812746145	0,8764
5	Acido Estearico (C18:0)	0,0102	5,85	0,8496	4,97016	298,5038	5,591018814	0,8627
6	Acido Oleico (C18:1)	0,3658	4,51	0,874	3,94174	296,4879	4,886361685	0,8746
7	Acido Linoleico (C18:2)	0,2076	3,65	0,889	3,24485	294,4721	4,270026005	0,8865
8	Acido Linolenico (C18:3)	0,3625	3,14	0,895	2,8103	292,4562	3,730991515	0,8985
9	Total	0,9999						
10	Total de AGS	0,0589						$\ln \mu_r = -12,503 + 2,496 \ln M_r - 0,1178 N$
11	Total de AGI	0,941						
12								
13								
14								
15	Modelo	Ecuacion	Viscosidad			Modelo	Visc. Dinamica Estimada	
16	Modelo Lineal	$\mu_m = \sum x_i \mu_i$ Ec. (1)	3,383			Lineal	3,383	
17	Logaritmico Arrhenius	$\log \mu_m = \sum x_i \log \mu_i$ Ec. (2)	3,344			Logaritmico Arrhenius	3,344	
18	Bingham	$\frac{1}{\mu_m} = \sum \frac{x_i}{\mu_i}$ Ec. (3)	3,306			Kendall y Monroe	3,356	
19	Kendall y Monroe	$(\mu_m)^{1/3} = \sum x_i (\mu_i)^{1/3}$ Ec. (4)	3,356			Ramirez-Verduzco	3,815	
20	Clements	$\ln \mu_m = \sum x_i \sqrt{\ln(\mu_i)}$ Ec. (5)	2,894373463	NO SE AJUSTA		Krisnangura	3,662	
21	Grungbert-nissan	$\ln \mu_m = \sum x_i \ln \mu_i + \sum \sum \frac{x_i x_j G_{ij}}{\mu_i \mu_j}$ Ec. (6)	3,343500999	NO SE AJUSTA		Hung Chen	3,907	
22	Cheenkachorn	$\ln \mu_m = \sum x_i \ln \mu_i + \sum \sum \frac{x_i x_j G_{ij}}{\mu_i \mu_j}$ Ec. (7)	3,343500999	NO SE AJUSTA				
23	Ramirez-Verduzco	$\mu_m = \sum f_i \mu_i$ Ec. (8)	3,815			Diesel	3,52	
24						Biodiesel de Palma	3,608	
25	Krisnangura		4,137	Visc. Cinematica		Biodiesel a partir de microalga	3,815	
26								
27	3,339259219	$\mu = 1,05 \times 10^{-4} M^2 - 0,024M + 2,15$						
28	3,273575194							
29	4,341883255	$\ln \mu = \sum_{i=1}^n x_i \ln \mu_i$						
30	4,264323259							
31	4,187620456							
32	4,111767236							
33								

Viscosidad Densidad Numero de Cetano Analisis Elemental Capacidad Calorifica Fuentes de Biodiesel

A.4 Poder Calorífico Superior HHV

Calculos Tesis - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Nitro PDF Professional

Calibri 11 A A Ajustar texto Número

Pegar Fuente Alineación Combinar y centrar Número Formato Dar forma condicional como tabl Estilos

B14 $f_x = 0,3383 * C9 + 1,443 * (D9 - (E9/8))$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1			% masa									
2	metil ester	formula mc	C	H	O	%total	%masa	Ramirez-Ver	Ramirez-Ver	dobles enlace		
3	acido palmitico	C16H32O2	75,495	12,673	11,832	100	0,0487	39,556628	270,4507	0		
4	acido palmitoleico	C16H30O2	76,062	12,017	11,291	99,37	0,0051	39,296813	268,4348	1		
5	acido estearico	C18H36O2	76,447	12,832	10,72	99,999	0,0102	40,180026	298,5038	0		
6	acido oleico	C18H34O2	76,967	12,24	10,793	100	0,3658	39,929163	296,4879	1		
7	acido linoleico 18:2	C18H32O2	77,494	11,639	10,867	100	0,2076	39,677742	294,4721	2		
8	acido linolenico 18:3	C18H30O2	78,028	11,03	10,942	100	0,3625	39,425748	292,4562	3		
9	Biodiesel (%MASA 2)		77,371715	11,70	10,9137							
10												
11												
12												
13	Poder Calorífico Superior (HHV)											
14	Ecuacion	% masa	[Mj/kg]				Metodo	HHV	Desv Prom	Desv Estandar		
15	Dulong's (1880)	41,091	[Mj/kg]				Dulong's (1	41,09	0,0455	0,0643467		
16	Strache & Lant (1924)	41,442	[Mj/kg]				Vondreck	42,62	0,812	1,1483414		
17	Vondreck (1924)	42,624	[Mj/kg]				IGT (1978)	40,63	0,185	0,2616295		
18	Streuer (1926)	30,576	[Mj/kg]	NO APLICA			Chaniwala	40,80	0,101	0,1428356		
19	Schuster (1931)	38,997	[Mj/kg]				Ramirez-Ver	39,67	0,664	0,9390378		
20	Gumz (1938)	39,803	[Mj/kg]				Metodo Fer	39,20	0,9025	1,2763277		
21	IGT (1978)	40,630	[Mj/kg]					Miao	41	0	0	
22	Jenkins (1985)	37,103	[Mj/kg]					Xu	41	0	0	
23	Beckman (1990)	37,135	[Mj/kg]					Promedio	40,67			
24	M. unificado Chaniwa	40,798	[Mj/kg]									
25	Ferdinand [36]	39,195	[Mj/kg]									
26	Ramirez-Verduzco	39,672	[Mj/kg]									
27	Metodo Ferdinand			HV	Hvi		Diesel	44,728		TFA	HHV	
28				Acido Palm	39,622653	1,9296232	Biodiesel d	39,4		100	39,195	
29				Biodiesel d	41,09							
30	$HHV = \frac{100(THV)}{T_{FA}}$	Ec. (18)	Ac. Palmito	39,085486	0,199336	THV						
31	$THV = \sum (HV_i)$	Ec. (19)	A. Estearico	40,279471	0,4108506	39,194566						
32	$HV_{(C_xH_yO_z)} = 34,03x + 121,64y - 12,44z$	Ec. (20)	A. Oleico	39,727164	14,532197							
33			A. Linoleico	39,166166	8,1308961							
34			A. Linolenic	38,597694	13,991664							

$HV_i = x_i HV_{(C_xH_yO_z)_i}$ Ec. (21)

$T_{FA} = \sum x_i$ Ec. (22)

Analisis Elemental Capacidad Calorifica Fuentes de Biodiesel Poder Calorifico Superior Emisiones

A.5 Número de Cetano

Calculos Tesis - Microsoft Excel

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Nitro PDF Professional

Calibri 11 Fuente Alineación Número Formato condici...

B22 $=((C3*B3)+(C4*B4)+(C5*B5)+(C6*B6)+(C7*B7)+(C8*B8))$

Numero de Cetano				
Acidos Grasos	%	Numero de Cetano-	Numero de Cetano ram-	Peso Molecular Rep. Ram Verd.
Acido Palmítico (C16:0)	0,0487	88	73,9	270,4507
Acido Palmítoleico (C16:1)	0,0051	56,59	53,3	268,4348
Acido Estearico (C18:0)	0,0102	86,9	82,3	298,5038
Acido Oleico (C18:1)	0,3658	58,9	61,8	296,4879
Acido Linoleico (C18:2)	0,2076	45,9	41,2	294,4721
Acido Linoleico (C18:3)	0,3625	37,7	20,6	292,4562
Total	0,9999			
Total de AGS	0,0589			
Total de AGI	0,941			
Metodo Cheenckachorn				
Metodo de Ramirez Verd		Ramirez - Verdu		43,337
Regla de Mezcia Ramos - ideal		Mezcia Ideal		50,201
Diesel	53,6			
Biodiesel de Palma	59			
Biodiesel de microalgas chlorella nativa	50,201			

Numero de Cetano Analisis Elemental Capacidad Calorifica Fuentes de Biodiesel Poder Calorifico Superior

A.6 Capacidad Calorífica

Calculos Tesis - Micro

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista Nitro PDF Professional

Calibri 11 Fuente Alineación Número

E10 $=E4*C4+E5*C5+E6*C6+E7*C7+E8*C8+E9*C9$

metil ester	%masa	Mi[g/mol]	Cp (Anand)	Cp Valencia
acido palmitico	0,049	270,451	2,099	1,821
acido palmítoleico	0,005	268,435	2,099	1,822
acido estearico	0,010	298,504	2,109	1,811
acido oleico	0,366	296,488	2,108	1,812
acido linoleico 18:2	0,208	294,472	2,107	1,812
acido linoleico 18:3	0,363	292,456	2,107	1,813
Biodiesel	1,000	293,188	2,107	1,813
	r	0,60		
	a	-0,057		
$C_p = -0,000001 M^2 + 0,0009M + 1,9291$ Ecuacion 28				
$C_p = rM^a$ Ecuacion 29				
$AAD = \frac{100}{NP} \sum_{i=1}^{NP} \left \frac{\varphi_{exp} - \varphi_{pr}}{\varphi_{exp}} \right $ Ecuacion 30				
Dzida & Prusakiewicz	1,971	Error	Desviacion Promedio	
Anand	2,107	6,900	0,068	
Valencia	1,813	8,016	0,079	
Tejeda	2,104			
Diesel	1,971			
Biodiesel de palma	2,104			
Biodiesel de microalgas C. Nativa	2,107			

Numero de Cetano Analisis Elemental Capacidad Calorifica Fuentes de Biodiesel Poder Cal

Anexo B. Entorno de Simulación en Scilab 5.2.1

```
final.sce - Editor de textos de Scilab
Archivo  Editar  Buscar  Ver  Documento  Ejecutar  ?
final.sce - Editor de textos de Scilab
*final.sce
1
2  //*** Datos y condiciones ***//
3  m=33.8062;
4  n=18.9143;
5  l=2;
6  fr=0.5
7  t=718
8
9  //*** inicio ciclo ***//
10 while fr<=1.51
11   if fr>=1 then
12     nc= 1.3 / ( ( n+m/2 ) + ( 3.714 * ( n + ( m/4 ) - ( l/2 ) ) ) / fr ) * ( exp ( 0.00013 * t ) ) ;
13   else
14     nc= 1.3 / ( ( m/4 ) + ( ( 4.714 * ( n + ( m/4 ) - ( l/2 ) ) ) / fr ) + ( l/2 ) ) * ( exp ( 0.00013 * t ) ) ;
15   end
16
17 //*** Ecuaciones ***//
18 y1=(m*nc/2)
19 y2=(n*nc)
20 y3=3.714* ((nc*(n+(m/4)-(l/2)))/fr)
21 y4=((l*nc)/2)+2*((nc*(n+(m/4)-(l/2)))/fr)-(n*nc)-(m*nc/4)
22 y5=0.048*(nc*(n+(m/4)-(l/2)))/fr
23
24 // *** Grafica *** //
25
26 T=(273.15:20:500);
27
28 plot(T,y1)
29 plot(T,y2)
30 plot(T,y3)
31 plot(T,y4)
32 fr=fr+0.1
33
34 end
```

```
Consola
File  Editar  Preferencias  Control  Applications  ?
Consola
-----
scilab-5.2.1
Consejo Scilab (DGITBO)
Copyright (c) 1989-2010 (INRIA)
Copyright (c) 1989-2007 (BNC)
-----

Ejecucion de inicio:
cargando entorno inicial

fr =
0.5
t =
718.

nc =
0.0045892
y1 =
0.0775719
y2 =
0.0866017
y3 =
0.8987767
y4 =
0.3629955
y5 =
0.0216159
fr =
0.6
nc =
0.0054670
y1 =
0.0000000
```