

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del Catálogo en línea del CRAI-Biblioteca y el Repositorio Institucional en la página Web de la CRAI-Biblioteca, así como en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, nunca para usos comerciales, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-Biblioteca

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

Minería de texto en el estudio de las microalgas para la producción de biocombustibles

Yoleisy Orduz Díaz

Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Ciencias y Tecnologías Ambientales

Director:

Julio R. Pinzón Joya, Químico, *PhD*

Codirector:

Martha Cervantes Díaz, Química, M.sc.

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

2017

Dedicatoria

A mi esposo y mi hijo

Gracias por apoyarme, por brindarme su amor y darme la mano en los momentos difíciles.

Ustedes son mi motivación. Ustedes son todo para mí.

Agradecimientos

A Dios por haberme permitido culminar esta etapa y llenar mi vida de bendiciones.

A mis padres que me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mi carácter, mi perseverancia y actitud para cumplir mis objetivos.

A mi hermana por su apoyo incondicional y por acompañarme siempre.

A la Universidad Santo Tomás y a la Facultad de Química Ambiental por mi formación como Magíster en Ciencias y Tecnologías Ambientales.

Al profesor Julio Pinzón de la Facultad de Química de la Universidad Industrial de Santander por la dirección en el proyecto.

A la profesora Martha Cervantes de la Facultad de Química Ambiental de la Universidad Santo Tomás por su asesoramiento en el desarrollo de mi tesis.

Tabla de contenido

	Pág.
Lista de abreviaturas y acrónimos.....	10
Glosario.....	11
Resumen.....	12
Abstract	13
Introducción	14
1. Planteamiento del problema.....	17
2. Justificación	18
3. Objetivos	20
3.1 Objetivo general.....	20
3.2 Objetivos específicos	20
4. Marco referencial	20
4.1 Marco teórico	20
4.1.1 Microalgas.	20
4.1.2 Ruta sintética de la producción de biocombustibles en microalgas.....	22
4.1.3 Sistemas de cultivo de microalgas.	25
4.1.4 Producción de biocombustibles a partir de microalgas.	26
4.1.4.1 Biohidrógeno.....	28
4.1.4.2 Biodiesel.....	28
4.1.4.3 Biopetróleo	29
4.1.4.4 Bioetanol	29

4.1.4.5 Biometano y biogás.....	30
4.2 Antecedentes	30
5. Diseño metodológico	32
5.1 Minería de texto	32
6. Resultados y discusión.....	35
6.1 Minería de Texto.....	35
6.1.1 Dinámica científica.	35
6.1.2 Áreas de aplicación.....	36
6.1.3 Revistas científicas.	37
6.1.4 Distribución por países.	38
6.1.5 Distribución por instituciones.....	39
6.1.6 Determinación de la relación de microalgas con la producción de biocombustibles. .	41
6.1.7 Capacidades nacionales en la aplicación de microalgas como fuente de biocombustibles.	53
6.1.8 Instituciones en Colombia.	54
6.1.9 Actividad Inventiva.....	55
6.1.9.1 Dinámica de la actividad Inventiva.....	56
6.1.9.2 Distribución de patentes por jurisdicción.....	57
6.1.9.3 Distribución de patentes de acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP).	58
7. Conclusiones.....	59
8. Divulgación de los resultados	61
9. Recomendaciones	61

Bibliografía	63
--------------------	----

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Composición bioquímica de algunas especies más comunes de microalgas</i>	24
Tabla 2. <i>Indicadores cienciométricos</i>	34

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Ruta sintética de producción de biocombustibles en la célula.....	23
<i>Figura 2 .</i> Procesos de conversión de biomasa microalgal en biocombustibles.....	27
<i>Figura 3.</i> Etapas del proceso metodológico llevado a cabo en el ejercicio de minería de texto. Adaptado de Unidad de Bibliometría- USTABUCA, 2016.....	34
<i>Figura 4.</i> Dinámica de la producción científica relacionada con la producción de biocombustibles a partir de microalgas.....	36
<i>Figura 5.</i> Áreas de conocimiento científico relacionado con la producción de biocombustibles a partir de microalgas.....	37
<i>Figura 6.</i> Revistas científicas relacionadas con la producción de biocombustibles a partir de microalgas	38
<i>Figura 7.</i> Distribución por países a nivel mundial de artículos científicos relacionados con la producción de biocombustibles a partir de microalgas.....	39
<i>Figura 8.</i> La distribución publicaciones por instituciones relacionadas con la producción de biocombustibles de microalgas a nivel mundial	40
<i>Figura 9.</i> La distribución de palabras clave asociadas con el término Chlorella	41
<i>Figura 10.</i> La distribución de palabras clave asociadas con métodos de obtención de biocombustibles a partir de microalgas.....	42
<i>Figura 11.</i> Relación entre las especies de microalgas del género Chlorella y los métodos de obtención de biocombustibles.....	44

<i>Figura 12.</i> Relación entre las especies de microalgas del género <i>Chlorella</i> y los diferentes tipos de biocombustibles.....	46
<i>Figura 13.</i> Distribución de artículos por año publicados en Colombia en temas relacionados en la obtención de biocombustibles a partir de microalgas	54
<i>Figura 14.</i> Instituciones que trabajan en Colombia y que publican artículos relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas	55
<i>Figura 15.</i> Distribución por años del número de patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas.....	57
<i>Figura 16.</i> Distribución de invenciones relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas por oficinas de patentes.	58
<i>Figura 17.</i> Clasificación Internacional de Patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas por oficinas de patentes.....	59

Lista de abreviaturas y acrónimos

ATP	Adenosín trifosfato
IPCC	Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático
LHC	Complejo captador de luz
NADPH	Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato
NOAA	Administración Nacional oceánica y atmosférica
TAG	Triacilglicéridos

Glosario

Biocombustibles: cualquier combustible hidrocarburo que se produce a partir de materia orgánica. (“Biofuels information,” 2010)

Cienciometría: consiste en el análisis cuantitativo de la producción científica (en especial los artículos científicos), para investigar el desarrollo, estructura, dinámica, tendencias y relaciones de la práctica científica. (Michán & Muñoz-velasco, 2013)

Fotobiorreactor: sistema cerrado alimentado con luz artificial o natural en el cual se usa para la producción de biomasa de organismos fotoautótrofos, como las microalgas. (Anderson, 2005)

Microalga: organismo fotosintético eucariota o procariota que puede crecer rápidamente y que puede vivir en condiciones extremas gracias a su estructura unicelular y/o pluricelular que presentan. Requieren principalmente luz solar y algunos nutrientes. (Mata, Martins, & Caetano, 2010)

Minería de texto: es un proceso en donde se analizan colecciones de materiales de texto con el fin de identificar los temas, conceptos clave y tendencias existentes sobre algún tema en específico de interés para la comunidad. (Bala Deshpande, 2015)

Organismo mesófilo: Organismo cuya temperatura de crecimiento óptima se encuentra entre 15 y 30°C. (Cheremisinoff, Rosenfeld, & Davletshin, 2008)

Organismo termófilo: Organismo cuya temperatura de crecimiento óptima se encuentra por encima de los 45°C. (Cheremisinoff et al., 2008)

Resumen

Se realizó un estudio de minería de texto con el fin de determinar las principales tendencias en el uso de microalgas como materia prima en la producción de biocombustibles entre 2000 y 2016. Se utilizó la base de datos de Scopus. Se encontraron un total de 2831 artículos. El número de artículos publicados sobre el uso de microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles ha aumentado a lo largo de los años, especialmente durante los últimos tantos seis años de periodo de estudio. La mayoría de publicaciones se encuentran en Estados Unidos (603), China (506), India (257), Corea del Sur (214). En cuanto a Latinoamérica, Brasil ocupa el primer lugar con 107 artículos, seguido de México con 39, Chile con 26 y Colombia con 23. Se estudiaron diferentes tipos de biocombustibles como bioetanol, biodiesel, biometano, biogás, biohidrógeno y biopetróleo, encontrándose que el más estudiado es el biodiesel. En cuanto a las diferentes especies de microalgas, se encontró que el género *Chlorella* con 376 artículos científicos, siendo la especie más estudiada *Chlorella vulgaris* con 331 artículos, seguida por *Chlorella sorokiniana* con 77, *Chlorella protothecoide* con 69 y *Chlorella pyrenoidosa* con 54.

Palabras clave: análisis cuantitativo, biocombustibles, microalgas, minería de texto.

Abstract

The present study known as text mining was conducted to determine the main trends in the use of microalgae as a raw material in the production of biofuels between 2000 and 2016. The Scopus database was used. A total of 2831 articles were found. The number of articles published on the use of microalgae as a raw material for the production of biofuels has increased over the years, especially during the last six years of study period. Most publications are in the United States (603), China (506), India (257), South Korea (214). In Latin America, Brazil ranks first with 107 articles, followed by Mexico with 39, Chile with 26 and Colombia with 23. Different types of biofuels were studied, such as bioethanol, biodiesel, biomethane, biogas, biohydrogen and bio-oil. The most studied is biodiesel. As for the different species of microalgae, the genus *Chlorella* was found with 376 scientific articles, being the most studied species *Chlorella vulgaris* with 331 articles, followed by *Chlorella sorokiniana* with 77, *Chlorella protothecoide* with 69 and *Chlorella pyrenoidosa* with 54.

Keywords: biofuels, microalge, scientometric analysis, text mining.

Introducción

Los combustibles fósiles (gas, carbón y petróleo) han sido usados por décadas para impulsar la industria global y producir energía. Pero tanto la exploración como su uso han generado consecuencias directas al medio ambiente, contribuyendo a la contaminación y al cambio climático.(Ribeiro, da Silva, Mata, & Martins, 2015; Scaife, Merckx-Jacques, Woodhall, & Armenta, 2015) En el presente año, la NASA y la Administración para el Océano y la Atmósfera de EEUU (NOAA, por sus siglas en inglés) publicaron un documento en donde se presentaba al 2015 como el año más caluroso registrado y además que las altas temperaturas continuaban durante los primeros meses del 2016.(Brown, Cabbage, & McCarthy, 2016) De ahí la importancia de sustituir los combustibles fósiles derivados del petróleo por fuentes de energía sustentables y renovables.

Los biocombustibles usan como materia prima la biomasa, un recurso renovable que tiene la ventaja de fijar dióxido de carbono (CO_2) por medio de la fotosíntesis. Las microalgas son organismos fotosintéticos que han despertado gran interés gracias a que tienen la capacidad de producir varios tipos de biocombustibles, como, biohidrógeno, biodiesel, biometano, bioetanol y biopetróleo; además requieren menos superficie de cultivo, pueden ser cultivadas en agua dulce, salada o insalubre, tienen mayores tasas de crecimiento (doblan su peso en 24 horas), no compiten con la producción alimentaria y son captadoras de CO_2 por excelencia, fijando 1,83 kg de CO_2 /kg de masa seca producida.(Orduz Díaz, 2015)

Colombia tiene enormes potenciales para producir energías limpias y posee muy buenas condiciones para el cultivo de microalgas, como lo son la luz solar, la radiación, agua tanto dulce

como salada y un clima con poca variación (dos estaciones por año), además de un clima tropical que mantiene una temperatura uniforme la mayor parte del año.

El objetivo de este trabajo consistió en realizar un estudio de minería de texto sobre el uso de las microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles, teniendo como base las publicaciones científicas indexadas en la base de datos de Scopus (Elsevier, B.V.2016), durante el periodo de 2000 a 2016 (a la fecha).

Este tipo de ejercicios pueden servir como guía para futuros proyectos y posibles aplicaciones en el país, pues permite identificar las tendencias de la investigación en esta área de interés, ahorrando recursos de tiempo y dinero, evitando presentar propuestas ya realizadas o no viables.

La minería de textos mide la actividad científica representada en artículos científicos indexados en este caso en la base de datos de Scopus (Elsevier, B.V., 2016). Se emplearon como palabras clave: “*microalgae*” y “*biofuel*”. Los resultados obtenidos de esta consulta fueron tratados con el software especializado Vantage Point, disponible en el CRAI – Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga.

Se utilizó la base de datos Scopus para recolectar la información requerida utilizando la ecuación de búsqueda (TITLE-ABS-KEY (biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil") AND TITLE-ABS-KEY (microalgae)) AND DOCTYPE (ar) AND SUBJAREA (mult OR agri OR bioc OR immu OR neur OR phar OR mult OR ceng OR chem OR comp OR eart OR ener OR engi OR envi OR mate OR math OR phys) AND PUBYEAR > 1999. Se encontraron 2831 artículos (a la fecha). El número de artículos publicados sobre el uso de microalgas como materia prima para la producción de biocombustibles ha aumentado considerablemente. La mayoría de publicaciones se encuentran en Estados Unidos (603), China (506), India (257), Corea del Sur (214). En cuanto a Latinoamérica,

Brasil ocupa el primer lugar con 107 artículos, seguido de México con 39, Chile con 26 y Colombia con 23.

1. Planteamiento del problema

Los combustibles fósiles son la mayor fuente de energía del planeta. Éstos tienen gran demanda principalmente en el sector transporte, ya que a través de los años han ayudado a la humanidad a mejorar su nivel de vida y acelerar el avance tecnológico. Según la “*Energy Information Agency*” (EIA) se estima que el mundo necesitará para el año 2030 al menos el 60% más de energía que se usa actualmente. Si esta tendencia de consumo continúa se estima que las reservas de petróleo se agoten en menos de 45 años. El agotamiento de las reservas de petróleo podría conllevar a una crisis energética mundial y el impacto ambiental que se ha generado con los años (calentamiento global, lluvia ácida, efecto invernadero, entre otros) ha incentivado la búsqueda de fuentes de energía renovables que reemplacen a los combustibles derivados del petróleo.(Lam & Lee, 2012; Orduz Díaz, 2015)

Los biocombustibles, tienen como materia prima la biomasa, la cual es un recurso renovable, abundante y que además fija CO₂ por medio de la fotosíntesis. La biomasa, desde el punto de vista energético, puede clasificarse en biomasa natural (caída de ramas u hojas de los árboles por acción natural), biomasa residual (poda, cáscaras) y biomasa de cultivos energéticos (maíz, jatropha, microalgas).(Castells, 2005) Las microalgas son microorganismos que pueden encontrarse en ecosistemas marinos y de agua dulce, a diferencia de los cultivos tradicionales terrestres, las microalgas tienen la capacidad de doblar su masa en sólo 24 horas. En un sistema de producción de microalgas se puede obtener hasta 1535 kg de biomasa/m³.(Chisti, 2007a) Al igual que el maíz, la soya, la jatrofa y todas las plantas necesitan CO₂ y agua principalmente, además de macronutrientes (N, P y K) elementos secundarios (Ca, Mg y S) y micronutrientes.(Ayhan Demirbas, 2010)

Las microalgas tienen gran aplicación en la industria ya que son fuente de compuestos naturales tales como pigmentos, ácidos grasos, antioxidantes, carotenoides, antibióticos, entre otras sustancias. De igual forma, con ellas se puede producir diferentes clases de biocombustibles como biohidrógeno, biodiesel, biometano y bioetanol.(Mata et al., 2010; Surendhiran & Vijay, 2012)

Colombia en los últimos años ha despertado el interés por la creación de nuevas políticas que impulsan el desarrollo y buscan diversificar la canasta energética de biocombustibles, con criterios de abastecimiento energético, sostenibilidad ambiental y mejoramiento de la calidad de los combustibles del país como resultado de la mezcla de combustibles de origen fósil y biocombustibles.

La finalidad de este trabajo de grado es identificar a través de la minería de texto las mejores especies de microalgas para la obtención de biocombustibles e identificar los mejores procesos tecnológicos que se puedan aplicar a nivel nacional.

2. Justificación

La necesidad de nuevas fuentes energéticas se ha acrecentado con los años. El 81% de la energía global proviene de los combustibles fósiles, siendo la mayor fuente de energía en el mundo.(IEA, 2016) Según la *International Energy Agency (IEA)* las reservas de petróleo se agotarían entre 40 y 45 años, teniendo en cuenta los niveles de consumo.(IEA, 2013) En cuanto a Colombia, según el Ministerio de Minas y Energía, teniendo en cuenta el nivel de consumo del año 2015, las reservas actuales de crudo son suficientes para apenas 5,5 años.(Tiempo, 2016) No

sólo la crisis energética que se avecina debido al agotamiento de las reservas de petróleo si no también el impacto ambiental causado por el petróleo son las mayores problemáticas de interés.

El último informe sobre cambio climático realizado por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 5° Informe, 2014)(IPCC, 2014) asegura que éste es causado por razones antropogénicas, resaltando la influencia de los combustibles fósiles en la alta producción de CO₂ hacia la atmósfera. Los biocombustibles ofrecen nuevas oportunidades en el suministro de combustibles y disminución de los gases efecto invernadero.(Ayhan Demirbas, 2010; Mata et al., 2010)

La producción de biocombustibles a partir de microalgas tiene grandes ventajas sobre otro tipo de plantas energéticas ya que son captadoras de CO₂ por excelencia, usan menos terreno de cultivo que las especies vegetales convencionales, tienen mayor eficiencia fotosintética, pueden duplicar su biomasa en 24 horas, no afectan la seguridad alimentaria y pueden ser cultivadas en aguas insalubres (presentan potencial en la biorremediación de contaminantes tóxicos como metales y minerales como nitratos y fosfatos en el agua)(Paniagua-Michel, 2015) y terrenos no destinados a la agricultura.(Ahmad, Yasin, Derek, & Lim, 2011; Rawat, Kumar, Mutanda, & Bux, 2012)

Colombia posee condiciones propicias para implementar cultivos de microalgas como lo son una alta riqueza hídrica, lumínica y condiciones climatológicas con poca variación durante todo el año, con este trabajo se espera establecer una línea base para la posible aplicación de plantas productoras de biocombustibles a partir de microalgas en nuestro país.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar un ejercicio de minería de texto basado en publicaciones científicas con el fin de determinar la viabilidad técnica de la producción de biocombustibles de microalgas en Colombia.

3.2 Objetivos específicos

- Seleccionar y clasificar información relacionada con los diferentes tipos de biocombustibles producidos por las microalgas.
- Describir las especies de microalgas, que basadas en experiencias nacionales e internacionales pueden aplicarse para la producción de biocombustibles en Colombia.
- Describir las diferentes tendencias tecnológicas para el cultivo de microalgas de las especies recomendadas, teniendo en cuenta las investigaciones referenciadas de otros autores.

4. Marco referencial

4.1 Marco teórico

4.1.1 Microalgas.

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos que pueden tener una estructura unicelular o pluricelular, con un tamaño entre 5-50 μm . Las microalgas son altamente biodiversas, se estima que existen entre 20.000 y 800.000 especies de las cuáles se conocen alrededor de 40.000 a 50.000 especies.(Cadoret, Garnier, & Saint-Jean, 2012) Tienen la capacidad de doblar su masa en 24

horas, además son altamente eficientes en la fijación de CO₂ ya que pueden fijar 1,83 kg CO₂/día/kg de biomasa seca producida. Están presentes en ambientes acuáticos, sin importar el tipo de agua (salada, dulce) y de igual forma en ambientes terrestres, incluso los más extremos. Al igual que las plantas necesitan primordialmente, agua, CO₂ y fertilizantes (N y P). Entre sus ventajas se encuentran que no compiten con tierras de cultivo, requieren menos área de cultivo, no requieren pesticidas y pueden ser cultivadas en aguas insalubres.(Huang, Chen, Wei, Zhang, & Chen, 2010; Mata et al., 2010; Rawat et al., 2012)

La productividad neta de la fotosíntesis en la biomasa terrestre depende de una combinación de factores geográficos tales como disponibilidad de agua, temperatura, características del suelo, radiación solar, y de la clase de vegetación (el tipo de planta C₃ o C₄). La eficiencia de la fotosíntesis en las plantas es baja (máximo teórico alrededor del 6%). Las microalgas presentan mayor eficiencia en la conversión de energía solar a energía química, convirtiendo cerca del 5% de la luz solar en biomasa. Gracias a este alto rendimiento en comparación con las plantas, algunos autores llaman a las microalgas como biomasa de tercera generación.(Rawat et al., 2012)

Las microalgas pueden ser usadas para la producción de diferentes tipos de biocombustibles tales como biohidrógeno, biometano, bioetanol y biodiesel y a su vez generan compuestos de gran valor comercial como lo son los carotenoides, antioxidantes, ácidos grasos, péptidos, ficobiliproteínas, entre otros que tienen aplicación en la industria de alimentos, farmacéutica, cosmética, agro y química.(Sánchez, 2012; Valverde, Romero-Campero, León, Guerrero, & Serrano, 2016)

4.1.2 Ruta sintética de la producción de biocombustibles en microalgas

La fotosíntesis es un proceso por el cual las plantas, algas y bacterias fotosintéticas que por medio de la energía solar y su conversión a energía química logran sintetizar diferentes compuestos orgánicos. En las algas verdes, las clorofilas y carotenoides funcionan como captadores de luz o LHC por sus siglas en inglés *Light Harvesting Complex* y se encargan de absorber la luz con el fin de obtener energía química en forma de ATP (Adenosín Trifosfato) y NADPH (Nicotinamida adenina dinucleótido fosfato). En la

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

6.1.2 Áreas de aplicación.

En la Figura 5, se presentan las principales áreas de aplicación de los trabajos de investigación relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas. Ingeniería química es el área de mayor interés con más artículos con 1215, seguido de Ciencias Ambientales con 1185, y Energía con 656. Se debe aclarar que estas áreas son interdisciplinarias, por lo que un trabajo puede tener varios campos de aplicación.

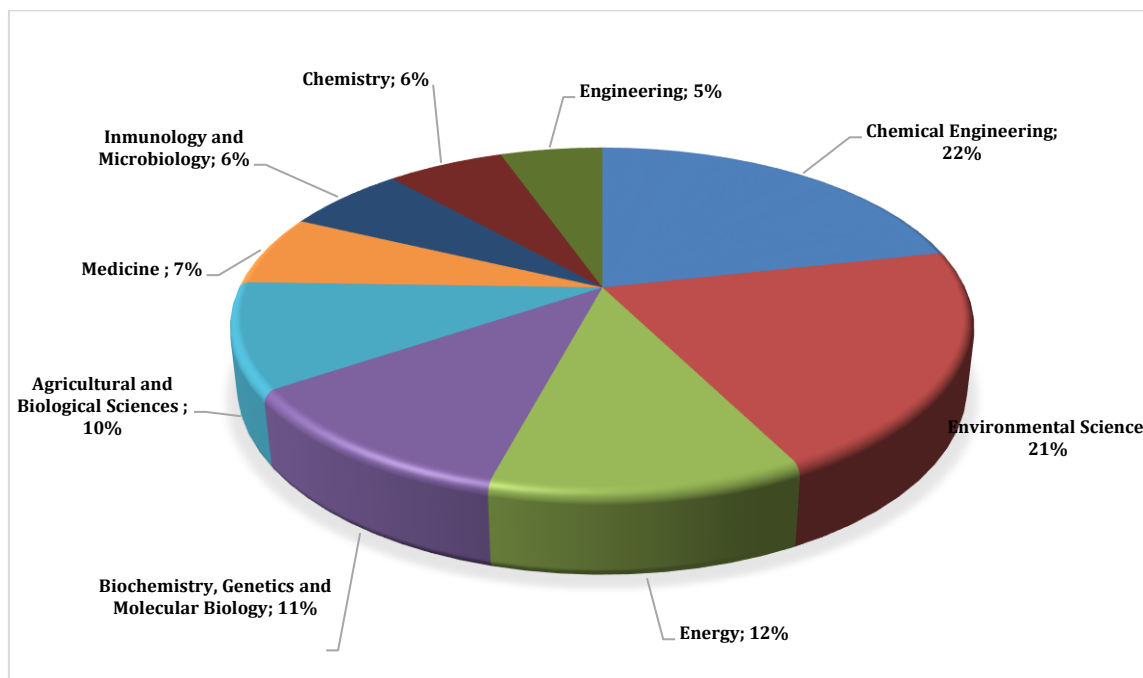


Figura 5. Áreas de conocimiento científico relacionado con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.3 Revistas científicas.

La distribución de las publicaciones en revistas científicas se presenta en la Figura 6. Las revistas más importantes en su orden son: *Bioresource Technology* con 612 artículos, *Algae Research* con 161 registros, y *Journal Applied Phycology* con 95 publicaciones, entre otras.

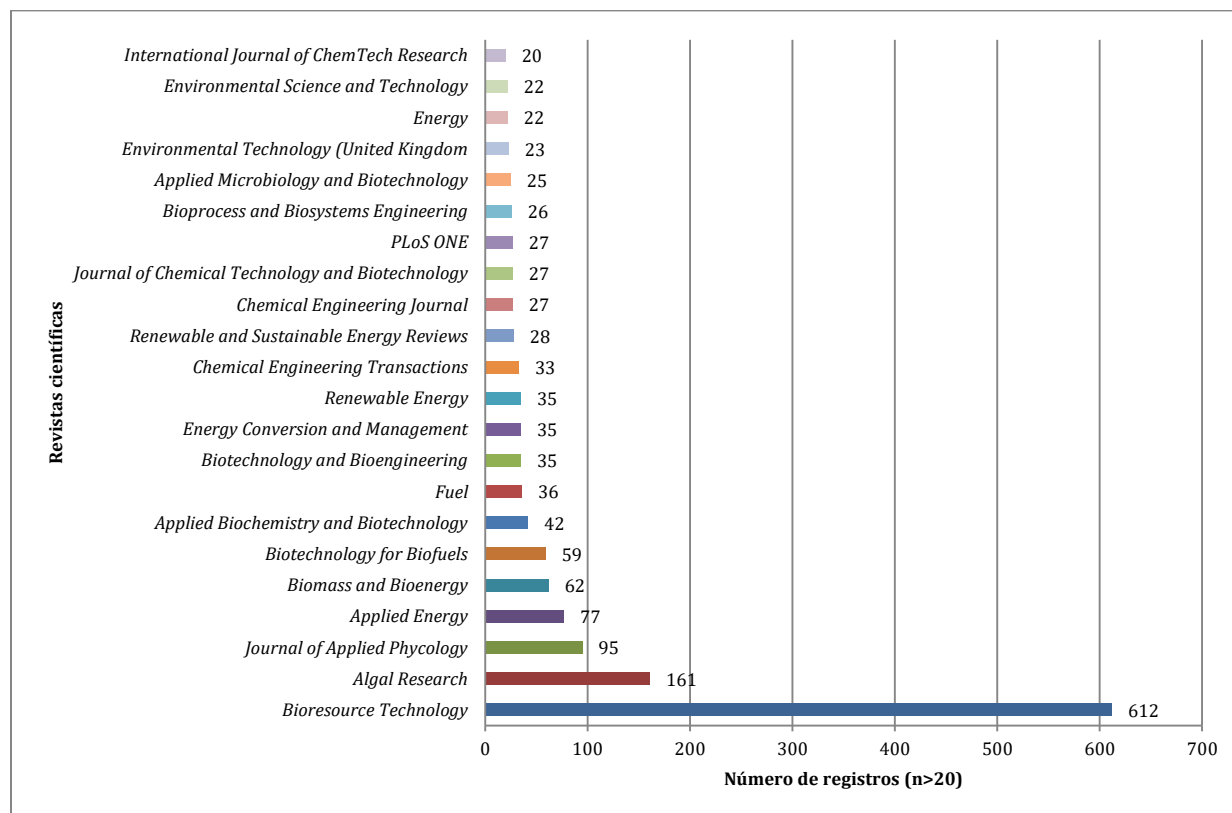


Figura 6. Revistas científicas relacionadas con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.4 Distribución por países.

A nivel mundial, los trabajos de investigación sobre la aplicación de las microalgas para la obtención de los biocombustibles, se encuentran publicados en Estados Unidos con 603 documentos, seguido de China con 506, India 257 y Corea del Sur con 214, como se observa en la Figura 7. En cuanto a Latinoamérica, Brasil es el país que realiza mayor número de publicaciones con 107, seguido de México con 39, Chile con 26 y Colombia en el 4° lugar con 23 artículos.

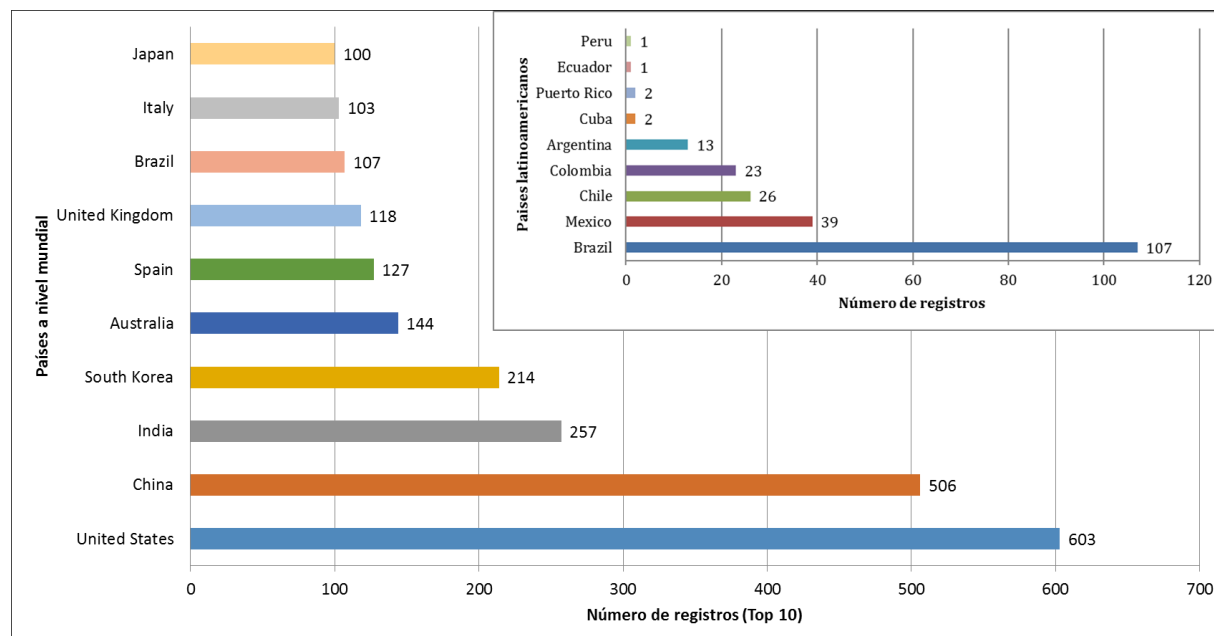


Figura 7. Distribución por países a nivel mundial de artículos científicos relacionados con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, Search Technology).

6.1.5 Distribución por instituciones.

La distribución publicaciones por instituciones relacionadas con la producción de biocombustibles de microalgas a nivel mundial se presentan en la Figura 8, y se ubican de la siguiente manera:

- Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology -KAIST (Corea): 61 publicaciones
- Department of Chemical Engineering, National Cheng Kung University (Taiwan): 54 registros.
- University of Chinese Academy of Sciences (China) 51 registros,
- CAS Key Laboratory of Biofuels, University of Chinese Academy of Sciences (China): 41 documentos

- University Center for Bioscience and Biotechnology, National Cheng Kung University (Taiwán): 41 registros.

Los resultados obtenidos sugieren que la investigación en esta área se encuentra principalmente en los institutos de educación superior públicos. Los países ubicados en el Este de Asia (Corea, Taiwán y China) se encuentran encabezando ésta lista, sugiriendo que dentro de sus políticas está la búsqueda de combustibles alternativos y el apoyo a la investigación.

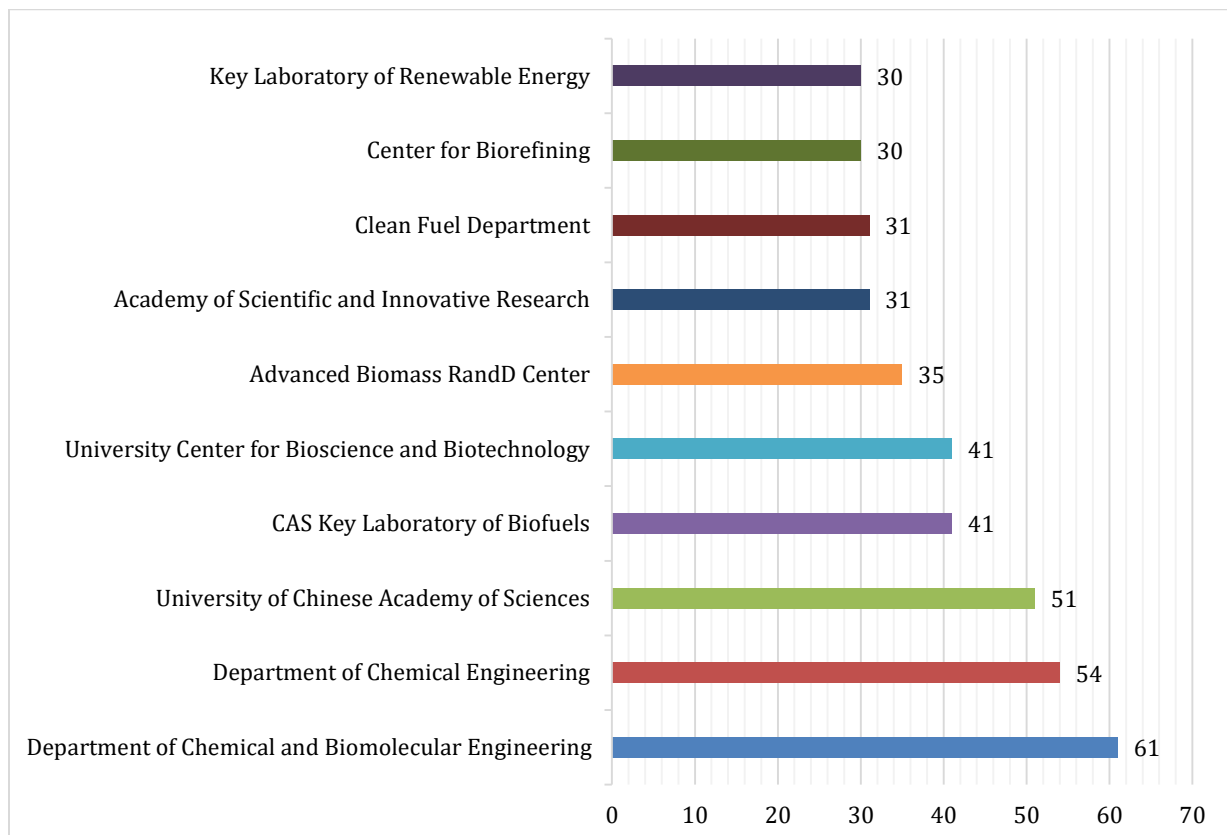


Figura 8. La distribución publicaciones por instituciones relacionadas con la producción de biocombustibles de microalgas a nivel mundial

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.6 Determinación de la relación de microalgas con la producción de biocombustibles.

Mediante el uso del programa de minería de textos *Vantage Point* (VP), la gran cantidad de datos que se obtienen durante una consulta bibliográfica, pueden agruparse por términos, empleando las palabras claves que se reportan dentro de los artículos. En este caso, se formaron grupos teniendo en cuenta las microalgas y los diferentes tipos de biocombustibles que pueden obtenerse a partir de estas. Esto con el fin de obtener las matrices que permitan determinar las relaciones existentes, por ejemplo, entre las distintas especies de microalgas, biocombustibles y métodos de obtención que se emplean en este campo. Se debe tener en cuenta, a la hora de analizar las matrices, que este ejercicio es una aproximación que tiene que ser analizada luego al detalle con revisiones específicas de artículos o reportes. En esta consulta se obtuvieron más de 10000 términos (*Keywords*) identificadas y depuradas con el software de *VantagePoint*. Se seleccionaron aquellas palabras clave que identificaron especies de microalgas, específicamente del género *Chlorella*, los diferentes tipos de biocombustibles de interés y los procesos empleados en su obtención. La distribución por palabras clave relacionadas con la microalga *Chlorella* se presenta en la *Figura 9*.

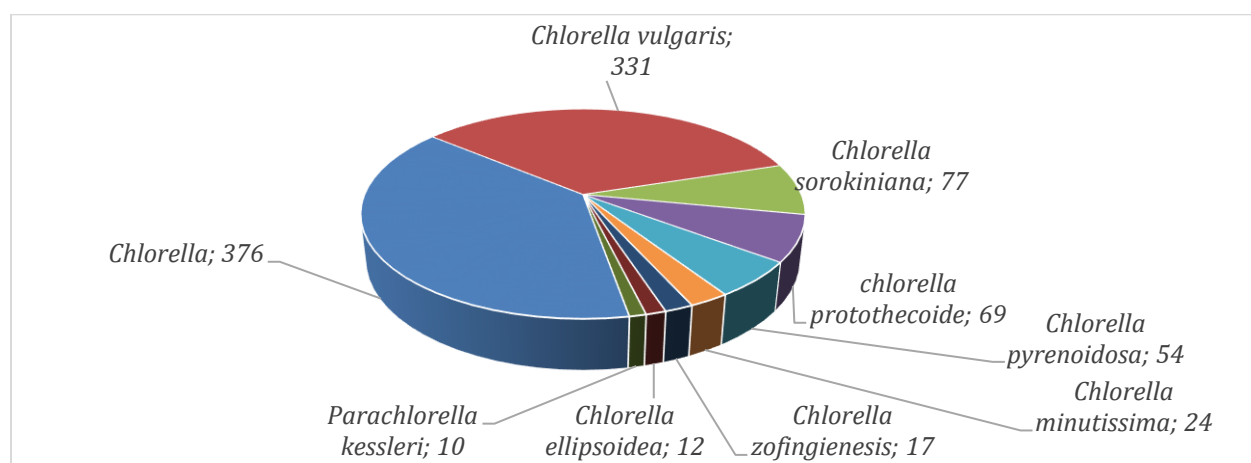


Figura 9. La distribución de palabras clave asociadas con el término *Chlorella*

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, Search Technology).

La palabra clave más empleada por los autores es *Chlorella* con 376 registros que corresponden a artículos científicos; la variedad más estudiada considerando este indicador corresponde a la *Chlorella vulgaris* con 331 registros, seguida por la *Chlorella sorokiniana*, con 77; *Chlorella protothecoide*, con 69 y *Chlorella pyrenoidosa*, con 54 entre las más importantes, de acuerdo con la ecuación de búsqueda estructurada para este trabajo (Figura 9).

En cuanto a los procedimientos para la obtención de biocombustibles se tienen que las palabras clave más empleadas por los investigadores son: trans-esterificación (189), Pirólisis (76), trans-esterificación *in situ* (28), trans-esterificación directa (24), gasificación (21), entre otros, como se observa en la Figura 10.

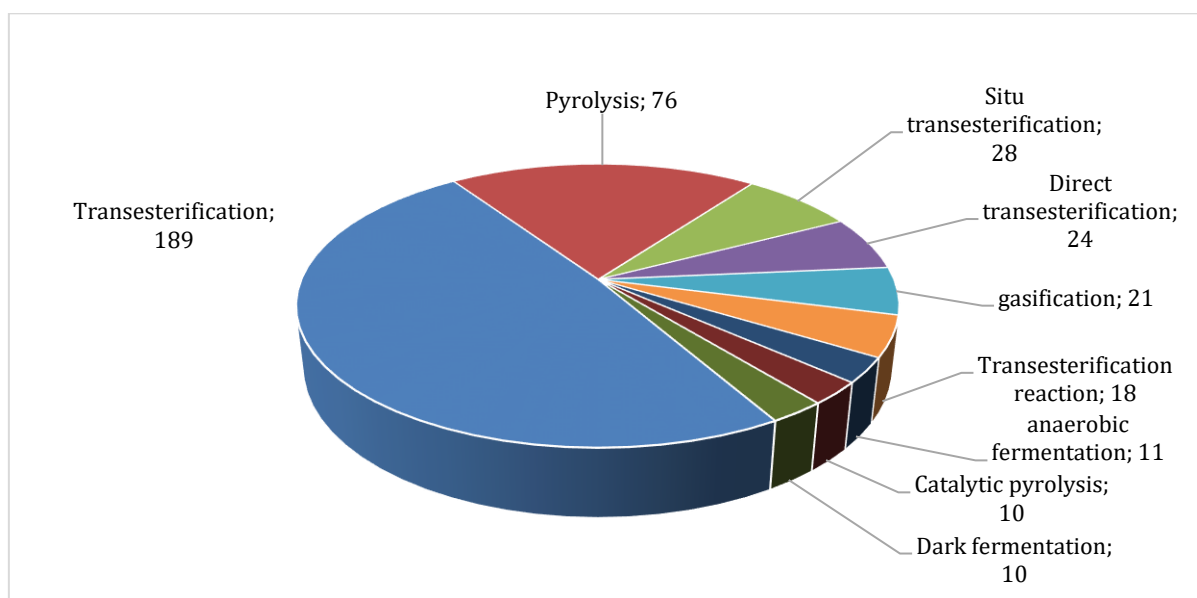


Figura 10. La distribución de palabras clave asociadas con métodos de obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

En la Figura 11 se presentan las especies de microalga del género *Chlorella* y los métodos de obtención de biocombustibles más empleados y reportados dentro de la revisión bibliográfica. La trans-esterificación y la pirólisis son los procesos más aplicados empleando como biomasa *Chlorella* y *Chlorella vulgaris*. El proceso de transesterificación, a pesar de ser muy estudiado presenta poca viabilidad a gran escala, ya que se necesita secar la biomasa y realizar un proceso de lisis para lograr la extracción del aceite, además sólo se produce un tipo de biocombustible. El secado de la biomasa (pretratamiento) aumenta los costos en la producción del biocombustible. Como solución a las problemáticas de la transesterificación, se encuentra la transesterificación directa, metanólisis o transesterificación *in situ*, un proceso que como se puede observar en la Figura 10, aún no es muy estudiado. La metanólisis consiste en juntar en un solo paso la extracción del aceite y la transesterificación, eliminando así los reactivos usados en la extracción y además, disminuyendo el tiempo y los costos de producción.

El otro proceso que más se reporta es el de la pirolisis, ya que con este se puede producir biopetróleo, biocarbón y gases. Este proceso a pesar de que es una forma eficaz en la conversión de biomasa a biocombustibles, el proceso de secado (pretratamiento) de la biomasa es un gasto innecesario de energía y no es ni ambiental ni energéticamente favorable. La licuefacción hidrotérmica es un proceso muy poco estudiado y que además es parecido a la pirolisis, con la ventaja que no se necesita secar la biomasa. La licuefacción termoquímica o hidrotérmica es la de mayor interés para la industria ya que disminuye los costes sobre el proceso de secado ya que la biomasa entra húmeda al sistema y además produce biocombustibles como el biopetróleo y otros subproductos (carbón vegetal, biogás) que son de gran utilidad en la industria y en el sector transporte.

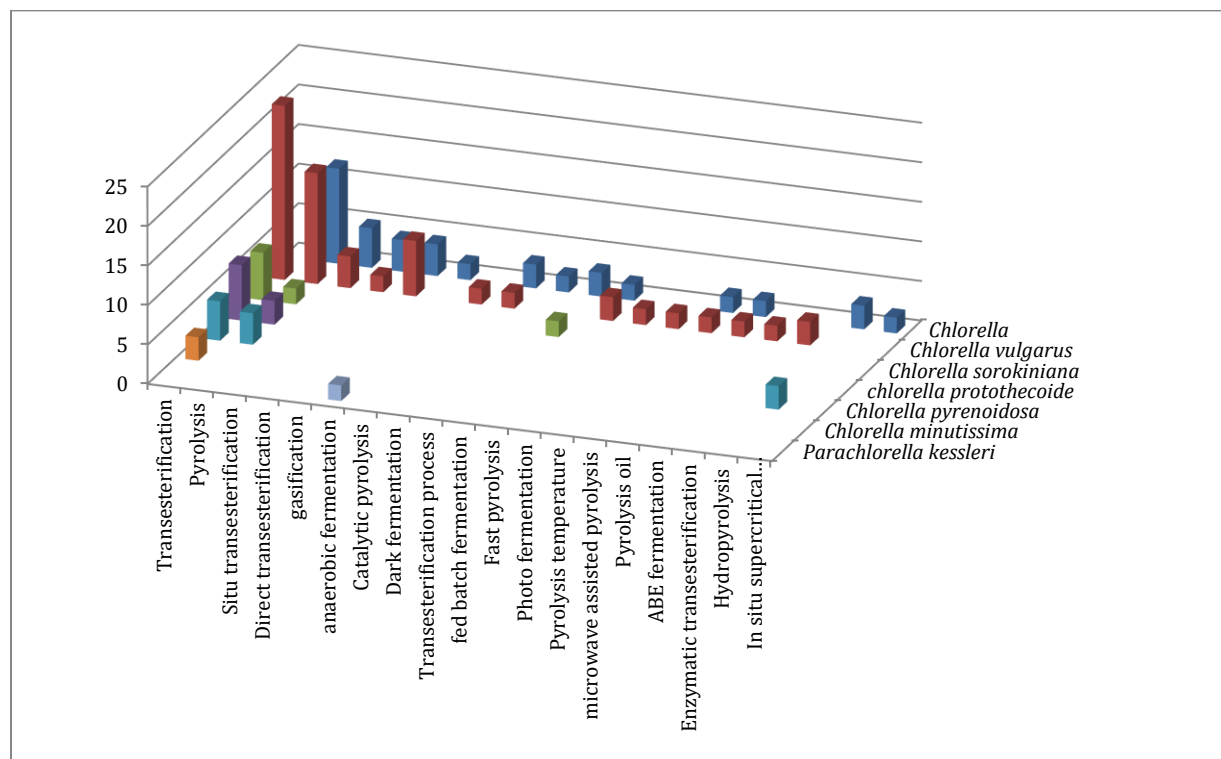


Figura 11. Relación entre las especies de microalgas del género *Chlorella* y los métodos de obtención de biocombustibles

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

Entre las diferentes microalgas, las especies de *Chlorella* son las de mayor interés debido a su alta productividad, alto contenido de lípidos y resistencia a las condiciones de luz altas típicas de los fotobiorreactores.

Chlorella vulgaris es una especie de microalga bastante estudiada debido a que puede cultivarse fácilmente con un régimen de nutrientes barato y tiene una tasa de crecimiento más rápida en comparación con los cultivos energéticos terrestres, además de una alta productividad de la biomasa. Se utilizan para fabricar complementos alimenticios, productos cosméticos, producción de biodiesel y la desintoxicación de metales pesados. (Safi, Zebib, Merah, Pontalier, & Vaca-Garcia, 2014)

Chlorella sorokiniana ha sido ampliamente estudiada, en cuanto a su fisiología, genética y su producción de ácidos grasos insaturados, omega 3, 6 y 9, empleados en la obtención de suplementos nutricionales, cosméticos, farmacéuticos y combustibles. La mayor limitante del uso industrial de esta microalga es el alto costo de su medio de cultivo, que generalmente contiene fertilizantes orgánicos derivados del petróleo.(Chisti, 2007a; Spolaore, Joannis-Cassan, Duran, & Isambert, 2006; Ugwu, Aoyagi, & Uchiyama, 2008)

Chlorella protothecoides es una microalga que se tiene un gran potencial en la producción de biocombustibles, especialmente biodiesel, ya que puede crecer autotróficamente (fotosíntesis) y heterotróficamente (fuentes de carbono extracelular, como glucosa) sin ningún inconveniente. En este proceso, cuando pasa del autotrofismo al heterotrofismo, el cloroplasto se desaparece y es remplazado por cuerpos lipídicos, lo que conduce a una acumulación de aceite.(Perez-garcia et al., 2010; Xiong, Li, Xiang, & Wu, 2008; Xu, Miao, & Wu, 2006)

Chlorella pyrenoidosa es conocida por su gran contenido de proteína, clorofila, vitaminas, minerales, fibra y ácidos nucleicos. Se usa principalmente como suplemento dietario, debido a eso hay muy poca investigación como en el área de los biocombustibles.(Nakano, Takekoshi, & Nakano, 2007)

Chlorella minutissima se conoce por su potencial como productor de biodiesel, debido a que puede producir gran cantidad de lípidos (57% en porcentaje en peso seco) y además tiene potencial en el tratamiento de aguas residuales.(Singh, Bansal, Jha, & Jain, 2013)

Parachlorella kessleri es una especie de microalga que se conoce por su alta producción de biomasa, lípidos y almidón. Se considera como una microalga ideal en la producción de biocombustibles ya que no sólo se ha logrado su alta productividad de lípidos en el laboratorio, sino también a escala semi-industrial en fotobiorreactores al aire libre.(Ota et al., 2016)

De acuerdo a la Figura 11 y la Figura 12, la microalga más estudiada tanto en la producción de diferentes biocombustibles y tecnologías es la *Chlorella vulgaris*. El biodiesel es el biocombustible más estudiado. Tanto *C. sorokiniana*, *C. protothecoides*, *C. pyrenoidosa*, *C. kessleri*, *C. minutissima* y *Parachlorella kessleri* son mayormente estudiadas para la producción de biodiesel por medio de la transesterificación y pirolisis. *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana* y *Chlorella protothecoides*, han sido estudiadas para la obtención de biogás y metanol.

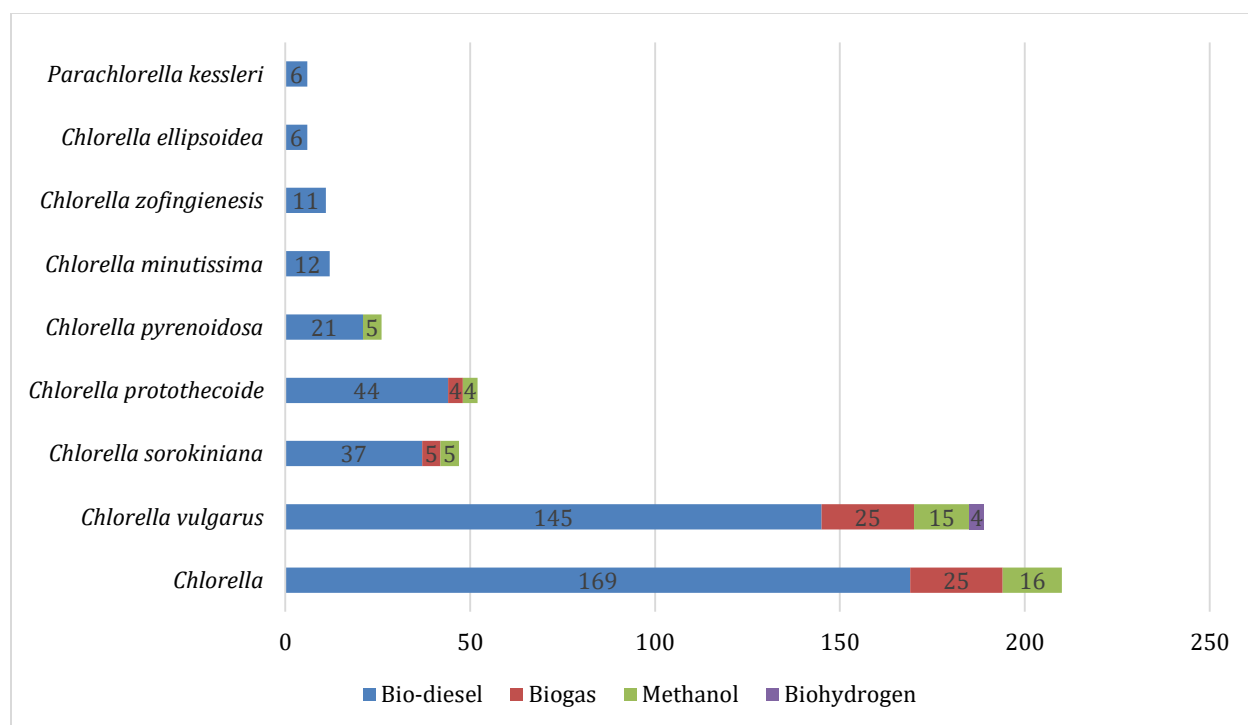


Figura 12. Relación entre las especies de microalgas del género *Chlorella* y los diferentes tipos de biocombustibles

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

Complementando este estudio de minería de texto se presentan algunos ejemplos de trabajos de investigación relacionados con la producción de biocombustibles a partir de microalgas.

La trans-esterificación es una reacción en donde los triglicéridos o ácidos grasos libres procedentes de aceites vegetales o grasas animales reaccionan con alcohol (en exceso) (con o sin

presencia de un catalizador) y producen ésteres monoalquílicos (biodiesel) y glicerol.(Ayhan. Demirbas, 2010)(Bajhaiya, Mandotra, Suseela, Toppo, & Ranade, 2010)(Mata et al., 2010) Los alcoholes que comúnmente se usan son metanol, etanol, propanol, butanol. El metanol y etanol son los más usados, pero el metanol es el que tiene ventajas químicas (alcohol de cadena corta y polar) además de un bajo costo.(Bisen, Sanodiya, Thakur, Baghel, & Prasad, 2010) La transesterificación es la manera más simple, barata y eficiente para la producción de biodiesel a gran escala. (Ordúz Díaz, 2015) El biodiesel producido tiene la característica de ser renovable, no tóxico, biodegradable y puede ser usado directamente o mezclado (con diésel) en motores diésel. (Ghaly, Dave, Brooks, & Budge, 2010)

El poder calorífico del diésel derivado de petróleo es de 42 MJ kg^{-1} . Dependiendo de la materia prima para la producción de biodiesel, varía su poder calorífico. Un biodiesel producido a partir de semillas de colza o soya tendría un poder calorífico de 39 MJ kg^{-1} y uno producido a partir de microalgas 41 MJ kg^{-1} . (Ayhan. Demirbas, 2010)

Otro método de obtención de biocombustibles es la pirólisis, la cual consiste en calentar y descomponer térmicamente la biomasa microalgal en ausencia de oxígeno. Este proceso se realiza a 1 atm y a una temperatura entre $400\text{-}600^{\circ}\text{C}$. (Bridgwater, 2007) La biomasa de microalgas tiene ciertas ventajas sobre la biomasa lignocelulósica ya que sus productos son más estables. (Suali & Sarbatly, 2012) La pirólisis produce biopetróleo, biocarbón y gases, y su proporción depende de las condiciones de funcionamiento y especie de microalgas. (Akhtar & Saidina Amin, 2012)

La pirólisis se puede clasificar en lenta, rápida, catalítica y de microondas, dependiendo de la velocidad y medio de calentamiento y la presencia de catalizadores. En el caso de la pirólisis lenta, esta se caracteriza por una baja velocidad de calentamiento ($5\text{-}10^{\circ}\text{C min}^{-1}$) y un largo tiempo en el contacto de la biomasa con el calor (10-30 s). (Liang, 2013; Suai & Sarbatly, 2012).

Un estudio realizado del proceso de pirólisis lenta con la microalga *Spirulina platensis* encontró que el rendimiento de biopetróleo era de 23-29% en peso seco y de sólidos residuales se encontraba entre 28-40% en peso seco, con un pH de 9 y 10 y un poder calorífico entre 25 y 39 MJ kg⁻¹, respectivamente. (Grierson, Strezov, Ellem, McGregor, & Herbertson, 2009; Jena, Das, & Kastner, 2011) El poder calorífico del biopetróleo producido es mucho menor que el del petróleo (43-46 MJ kg⁻¹). (Ayhan. Demirbas, 2010)

Estudios realizados sobre el análisis de ciclo de vida (LCA) en el proceso de pirólisis de biomasa de microalgas llegaron a la conclusión que a pesar de que la pirólisis es una forma eficaz en la conversión de biomasa en biocombustibles, el proceso de pretratamiento (secado) de la biomasa es un gasto innecesario de energía y no es ni ambiental ni energéticamente favorable. (Bennion, Ginosar, Moses, Agblevor, & Quinn, 2015)

Otro estudio realizado por Grierson, determinó las propiedades de biopetróleo usando como materia prima la biomasa obtenida de *Tetraselmis Chui* y se encontró que dentro de los componentes había ácidos grasos, alcanos, alquenos, amidas, aldehídos, terpenos, pirrolidinas y fenoles. Se obtuvo un biocarbón con un poder calorífico entre 14-26 MJ kg⁻¹. El gas producido (CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆) con un poder calorífico entre 1,2 y 4,8 MJ kg⁻¹. (Grierson, Strezov, & Shah, 2011) Otro estudio realizado por el mismo autor reporta el uso de seis diferentes cepas de microalgas, *Tetraselmis chuii*, *Chlorella like*, *Chlorella vulgaris*, *Chaetoceros muelleri*, *Dunaliella tertiolecta* y *Synechococcus* con alto potencial productor de biocombustibles para evaluar su comportamiento en condiciones de pirólisis lenta (710°C). Se obtuvo un biogás con diferente poder calorífico dependiendo de la especie de microalgas: *Tetraselmis chuii* (3,4 MJ kg⁻¹), *Chlorella like* (1,8 MJ kg⁻¹), *Chlorella vulgaris* (4,8 MJ kg⁻¹), *Chaetoceros muelleri* (1,2 MJ kg⁻¹), *Dunaliella tertiolecta* (2,4 MJ kg⁻¹) y *Synechococcus* (1,4 MJ kg⁻¹). (Grierson et al., 2009)

Demirbas encontró que el rendimiento de biopetróleo en la pirólisis lenta aumenta a medida que aumenta la temperatura hasta llegar a 500°C, después de eso el rendimiento comienza a disminuir. (A. Demirbas, 2006)

En el caso de la pirólisis rápida, esta se lleva a cabo a una velocidad más alta de calentamiento ($10\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$) y un tiempo corto (1-3 s), con el fin de lograr mayores rendimientos en la producción de bio-petróleo. El porcentaje de rendimiento se encuentra entre 18-72% en peso seco y el bio-crudo obtenido tiene un poder calorífico entre $24\text{-}41\text{ MJ kg}^{-1}$. (Belotti, De Caprariis, De Filippis, Scarsella, & Verdone, 2014; S. W. Kim, Koo, & Lee, 2014; K. Wang, Brown, Homsy, Martinez, & Sidhu, 2013) (Bridgwater, 2007)

A *Scenedesmus sp.* se le realizó el proceso de pirólisis rápida (480°C, 2 s) obteniéndose biopetróleo (biopetróleo) con un poder calorífico de $18,4\text{ MJ kg}^{-1}$ (Harman-Ware et al., 2013) siendo más bajo que el de la madera 21 MJ kg^{-1} y el de *Chlorella protothecoides* 30 MJ kg^{-1} (cultivo autotrófico) y 41 MJ kg^{-1} (cultivo heterotrófico). (Mohan, Pittman, & Steele, 2006)

La pirólisis catalítica se realiza normalmente a temperaturas entre 300-600°C en presencia de un catalizador (relación catalizador biomasa: 0,2-5). El rendimiento se encuentra entre 19 - 40% en peso seco. El poder calorífico del bio-petróleo producido se encuentra entre $20\text{-}33\text{ MJ kg}^{-1}$. Tiene como ventaja que los catalizadores utilizados pueden ser recirculados en el reactor. Los catalizadores más comunes que se utilizan en el proceso incluye zeolitas a base de ZSM-5 (Zeolita Socony Mobil-5) y Na_2CO_3 , como H-ZSM-5, Fe-ZSM-5, Cu-ZSM-5 y Ni-ZSM-5 (Babich et al., 2011; P. Pan et al., 2010)

Un estudio sobre la producción de bio-petróleo producido por la pirólisis catalítica de *Nannochloropsis sp.*, encontró que los residuos tenían un menor contenido de O (19,5% en peso seco) y un poder calorífico más alto ($32,7\text{ MJ kg}^{-1}$) que el residuo producido de la pirólisis directa

de la misma cepa (contenido de O: 30,1% en peso seco; poder calorífico: 24,6 MJ kg⁻¹). (P. Pan et al., 2010)

Otro estudio realizado con la cepa *Chlorella* teniendo en cuenta la presencia y ausencia del catalizador (Na₂CO₃), se encontró que el rendimiento del gas producido es mayor con la presencia del catalizador y el combustible líquido disminuye con la presencia del catalizador. (Babich et al., 2011)

Campanella y Harold (2012), reportan la influencia de cinco catalizadores derivados de ZSM-5 (H-, Fe-, Cu-, Ni-, y ZSM-5) en la producción de biocombustibles por medio de pirólisis catalítica usando como materia prima biomasa de *Chlorella sp.* Encontraron que el rendimiento en general estuvo entre 43-51% en peso seco. El catalizador H-ZSM-5 obtuvo el mayor rendimiento de biopetróleo y aumentó la fracción de hidrocarburos en la fase orgánica de 21% a 43% en peso seco y disminuyó la cantidad de coque producido (1,3% en peso seco), mientras que el catalizador Fe-ZSM-5 produjo mayor cantidad de coque (2,2% en peso seco). (Campanella & Harold, 2012)

La pirólisis asistida por microondas emplea temperaturas entre 500-800°C, con potencias entre 500 y 2250 W. El rendimiento del bio-petróleo producido se encuentra entre 18-59% en peso seco y su poder calorífico es de 42 MJ kg⁻¹. (Borges et al., 2014; Z. Hu, Ma, & Chen, 2012) Entre las ventajas de la pirólisis asistida con microondas se encuentran el rápido calentamiento y el calentamiento interno uniforme de la biomasa. (Borges et al., 2014) Normalmente se le adiciona a la biomasa microalgal carbón activado, óxidos metálicos, líquidos iónicos, ácido sulfúrico o carburo de silicio con el fin de mejorar la calidad o el rendimiento de los biocombustibles producidos. (Salema & Ani, 2012)

Se realizaron investigaciones sobre la producción de biocombustibles a partir de *Chlorella vulgaris* por medio de pirólisis asistida con microondas usando diferentes potencias en el

microondas (750, 1500 y 2250 W), diferentes catalizadores (CaO, SiC y residuos sólidos) y variación en la cantidad de catalizador (5, 10, 20, 30% en peso seco). Con potencias de 1500 y 2250 W (temperaturas de 650 y 800°C, respectivamente) se obtuvo el máximo rendimiento de biopetróleo (39% en peso seco) y mayor rendimiento de gas (52% en peso). A medida que aumenta la potencia en el microondas, aumenta la temperatura en el proceso. El carbón activado al 5% fue el mejor catalizador con un rendimiento de biocombustible de 87,47% en peso seco. (Z. Hu et al., 2012)

Borges reporta la producción de biocombustibles por medio de pirólisis asistida con microondas usando como materia prima *Chlorella sp.* y *Nannochloropsis sp.*. Se usó como absorbente SiC y se evaluó con y sin la presencia del catalizador H-ZSM-5. El catalizador tiende a formar agua en el biopetróleo lo que hace que se reduzca su poder calorífico. Como resultado encontraron que para *Chlorella sp.* el rendimiento de producción de biopetróleo fue de 57% en peso seco y para *Nannochloropsis sp.*, el rendimiento fue de 59% en peso seco. La temperatura óptima para la producción de combustible líquido en *Chlorella sp.* estuvo entre 500-560°C y para *Nannochloropsis sp.* estuvo entre de 480-530°C sin la presencia de catalizador. A temperaturas más bajas se produce mayor cantidad de carbón y a medida que aumenta se produce mayor cantidad de combustible líquido, a altas temperaturas aumenta la producción de gas. (Borges et al., 2014)

La metanólisis directa corresponde a la transesterificación in situ, transesterificación directa, que consiste en un proceso donde los triglicéridos y ácidos grasos libres reaccionan con alcoholes de cadena corta (metanol) para formar alquil ésteres (biodiesel) y glicerol en un solo paso. En este proceso la extracción y la transesterificación se juntan en un solo paso evitando la extracción, purificación, y posterior transesterificación del aceite. (Georgogianni, Kontominas, Pomonis,

Avlonitis, & Gergis, 2008) y así eliminar los reactivos usados en la extracción, disminuir el tiempo y los costos de producción. (Haas & Wagner, 2011)(Yoo, Park, & Yang, 2015)

Un estudio realizado sobre la producción de biodiesel por medio de transesterificación directa con biomasa de *Chlorella pyrenoidosa* arrojó que el rendimiento de la reacción fue de 83% usando una proporción de 220:1 metanol/ácidos grasos, a 65°C durante 2h. (Haas & Wagner, 2011). Otro estudio realizado con macroalgas marinas de la especie *Enteromorpha compressa* señaló que el rendimiento de la producción de biodiesel por medio de transesterificación in situ fue de 98.89%. (Suganya, Kasirajan, & Renganathan, 2014)

Otro método es la gasificación, que se describe como el proceso químico por el cual la biomasa se convierte a una mezcla de gases como CO, CO₂, H₂, CH₄ y N₂ o gas de síntesis (*Syngas*), dependiendo de la proporción de los componentes gaseosos. Consiste en la oxidación parcial de la biomasa en presencia de aire, oxígeno y/o vapor a altas temperaturas, normalmente en el rango de 800-1000°C para producir syngas. (Arshadi & Sellstedt, 2008) (Ayhan Demirbas, 2001).

El syngas puede ser producido a partir de biomasa por dos rutas: gasificación no catalítica y catalítica. El proceso no catalítico requiere una alta temperatura para su operación, alrededor de 1300°C, mientras que los procesos catalíticos pueden operar a temperaturas más bajas, más o menos 900°C. (Arshadi & Sellstedt, 2008).

La fermentación alcohólica es el proceso en el cual la biomasa con alto contenido de azúcar, almidón o celulosa mediante procesos metabólicos y actividad enzimática es convertido en alcohol (etanol) y CO₂. La fermentación puede realizarse de forma anaerobia y aerobia. La biomasa microalgal es molida, y el almidón (necesita tratamiento previo) es convertido en azúcares. Una vez molida se mezcla con agua y microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae*) para darle inicio al proceso de fermentación. El etanol producido se drena desde el tanque fermentador a una unidad

de destilación. En el proceso de destilación se elimina el agua e impurezas que se encuentren en el producto (10-15% etanol). El alcohol concentrado, se condensa y puede ser mezclado con gasolina o usado directamente como combustible. El residuo sólido producido puede ser usado en procesos de gasificación o como alimento para animales. (Bridgwater, 2007; Ayhan Demirbas, 2001)

Estudios realizados con *Chlorella vulgaris* encontraron que cuando las cepas se someten a limitaciones de fósforo, nitrógeno y azufre aumenta el porcentaje de acumulación de almidón en la microalga (~60% en porcentaje seco), 50% más alto que la limitación únicamente de azufre. (Brányiková et al., 2011) Este tipo de estrategias (limitación de nutrientes) tiene la desventaja que disminuye la producción de biomasa en la microalga aunque se obtengan altas concentraciones de carbohidratos. Otros estudios realizados con *Spirulina* concluyeron que la producción de etanol a partir de esta cepa no es económicamente viable. Su porcentaje de etanol estuvo entre 0,85 -1,0 %. (Hossain, Basu, & Mamun, 2015)

6.1.7 Capacidades nacionales en la aplicación de microalgas como fuente de biocombustibles.

En la Figura 13 se muestra la distribución de artículos por año publicados en Colombia en temas relacionados en la obtención de biocombustibles a partir de microalgas. En total se registraron 23 artículos. El año 2014 fue el que presentó mayor número de publicaciones con 6.

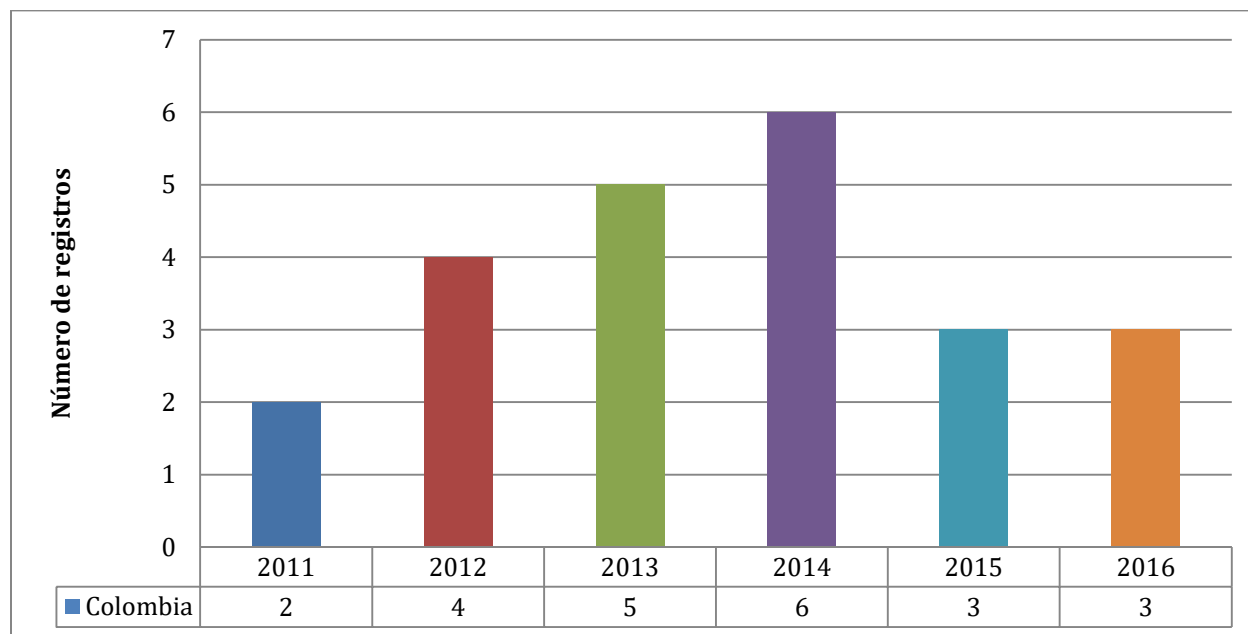


Figura 13. Distribución de artículos por año publicados en Colombia en temas relacionados en la obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.8 Instituciones en Colombia.

En la Figura 14 se muestran las instituciones que trabajan en Colombia y que publican artículos relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas. Se encontró que en el primer lugar se encuentra la Universidad Industrial de Santander con 9 publicaciones, ubicado en Bucaramanga. Seguido se encuentran el Instituto de Biotecnología y Agroindustria (Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Manizales), el Grupo de Investigación *Research Center for Sustainable Development in Industry and Energy* –CIDES- (Universidad Industrial de Santander) y la Universidad de San Buenaventura (Cartagena) con 5 publicaciones. Luego se encuentran el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas -CIEMAT- (Madrid, España), el Instituto Colombiano de Petróleo –ICP- (Bucaramanga) y el Grupo Ambiental de Investigación Aplicada –GAIA- (Universidad de Santander, Bucaramanga)

con 2 publicaciones. Cabe resaltar que la mayoría de la investigación en nuestro país se realiza en instituciones de carácter público, exceptuando a la Universidad San Buenaventura y la Universidad de Santander que son de carácter privado.

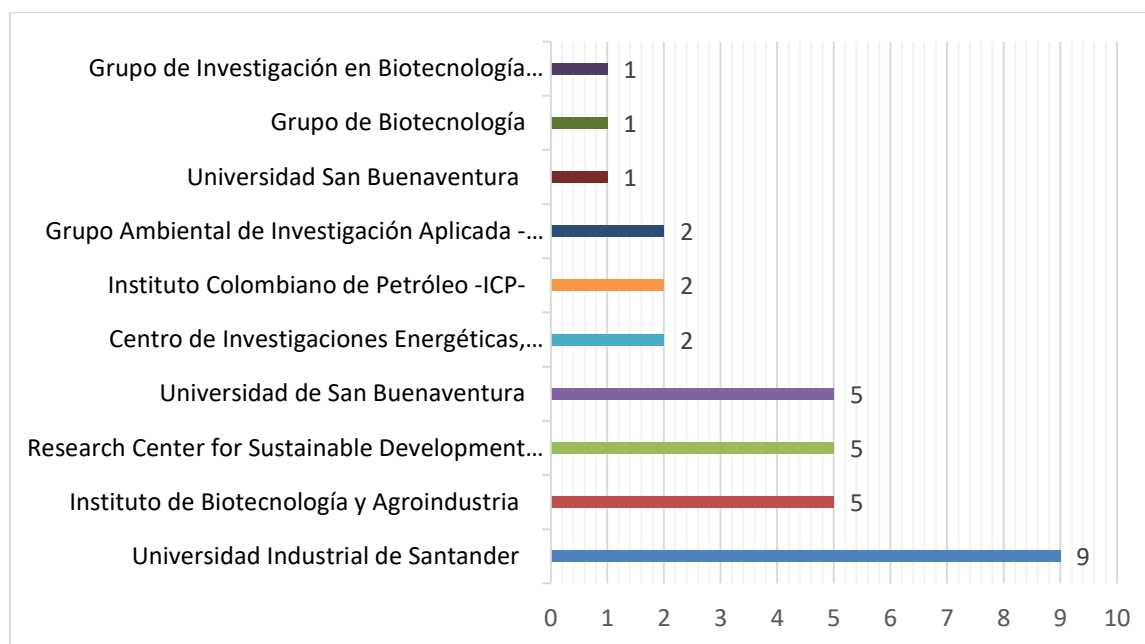


Figura 14. Instituciones que trabajan en Colombia y que publican artículos relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.9 Actividad Inventiva

Con el fin de establecer la dinámica inventiva en el tema de la obtención de biocombustibles a partir de microalgas, se consultó la base de datos de acceso libre Lens Patent (<https://www.lens.org/lens/>), la cual fue desarrollada por CAMBIA, una organización internacional independiente, sin ánimo de lucro. Esta base de datos permite la consulta gratuita de más de 10 millones de documentos tipo patente y aplicaciones que incluyen las bases de datos de Estados Unidos, Australia, Europa.

Se estructuró la siguiente ecuación de búsqueda: *(title:(biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil") || abstract:(biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil") || claims:(biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil")) && (title:microalgae || abstract:microalgae || claims:microalgae)*, y se obtuvieron 913 registros de los cuales 416 corresponden a familias de patentes.

6.1.9.1 Dinámica de la actividad Inventiva

Como se puede observar en la Figura 15, el interés por proteger las invenciones relacionadas con la obtención de biocombustibles empleando microalgas comienza de manera incipiente a partir del 2002. A partir del 2008 se aprecia una tendencia creciente, que llega a su punto máximo en el 2014 con 144 patentes. En lo corrido del 2017 se registran tan solo 17 documentos. Este comportamiento es muy similar al de la actividad científica medida por la publicación de artículos científicos.

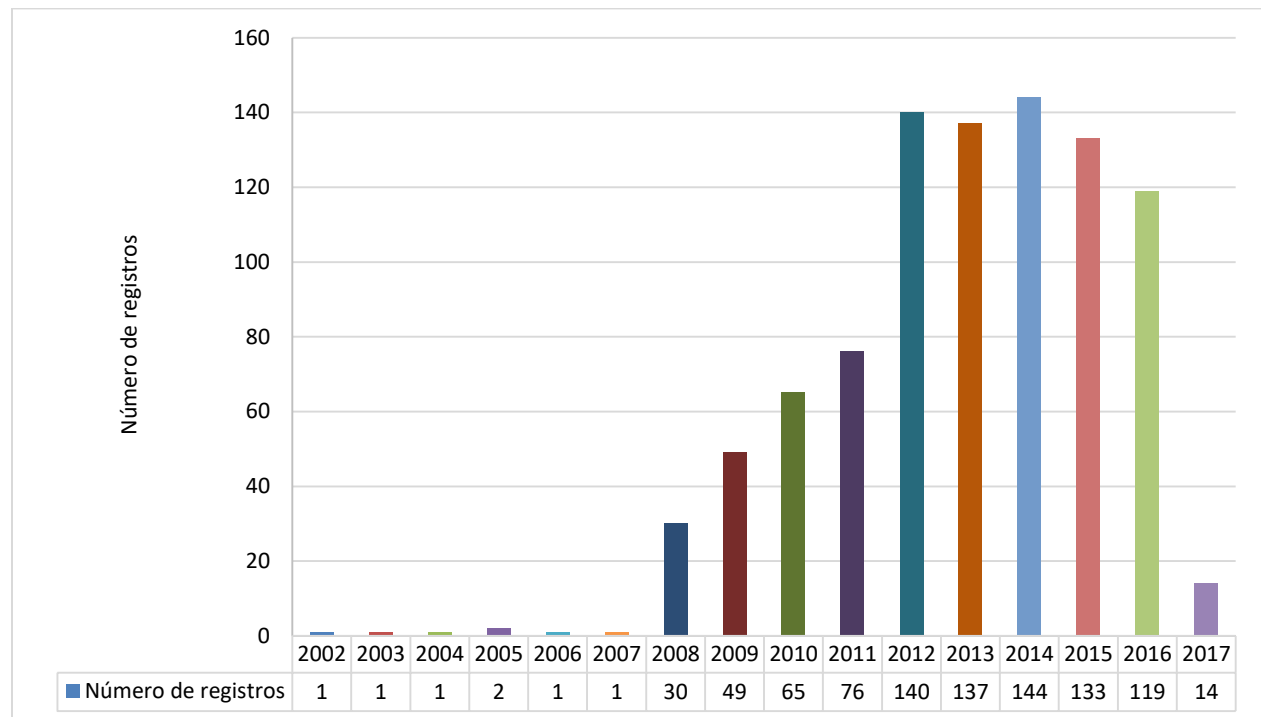


Figura 15. Distribución por años del número de patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Lens* (<https://www.lens.org/lens/>), procesados con Microsoft Excel (2016),

6.1.9.2 Distribución de patentes por jurisdicción.

Como se puede observar en la *Figura 16*, la distribución de patentes por oficinas de patentes nos indica cuales son los países en los cuales se protegen las invenciones relacionadas con el tema de este proyecto. China registra 244 documentos, seguido por Estados Unidos con 227, la OMPI 169 y Corea del Sur 124, entre otros.

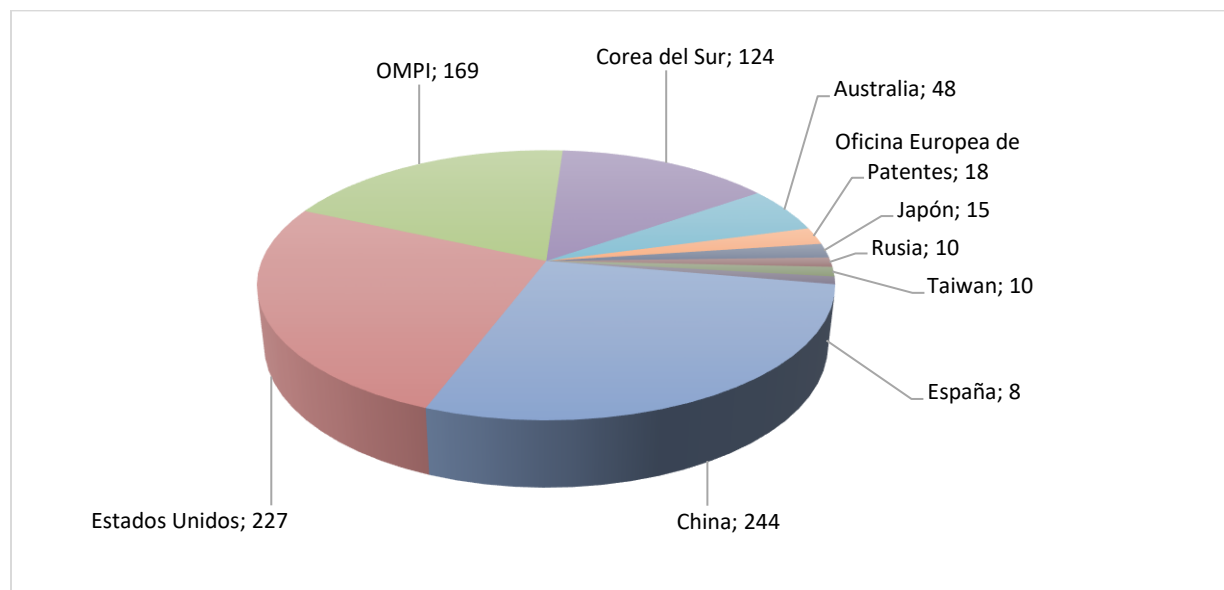


Figura 16. Distribución de invenciones relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas por oficinas de patentes.

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Lens* (<https://www.lens.org/lens/>), procesados con Microsoft Excel (2016).

6.1.9.3 Distribución de patentes de acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP).

En cuanto a la aplicación de las patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas, se encuentran ubicadas en la sección C de la Clasificación Internacional de Patentes de la WIPO, que corresponde a Química y Metalúrgica y sus aplicaciones para la obtención de compuestos tales como: vidrio, cerámicos, fertilizantes, plásticos, pinturas, productos de la industria del petróleo, entre otros. La distribución de las patentes de acuerdo con la CIP se presenta en la Figura 17.

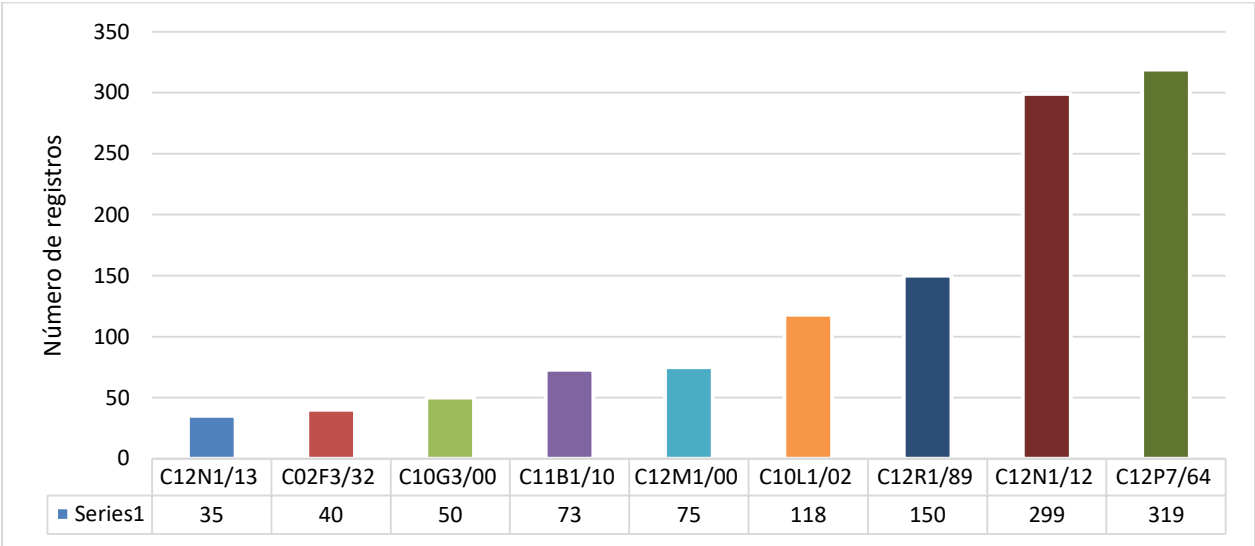


Figura 17. Clasificación Internacional de Patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas por oficinas de patentes se presenta el esquema de síntesis de biocombustibles en la célula.

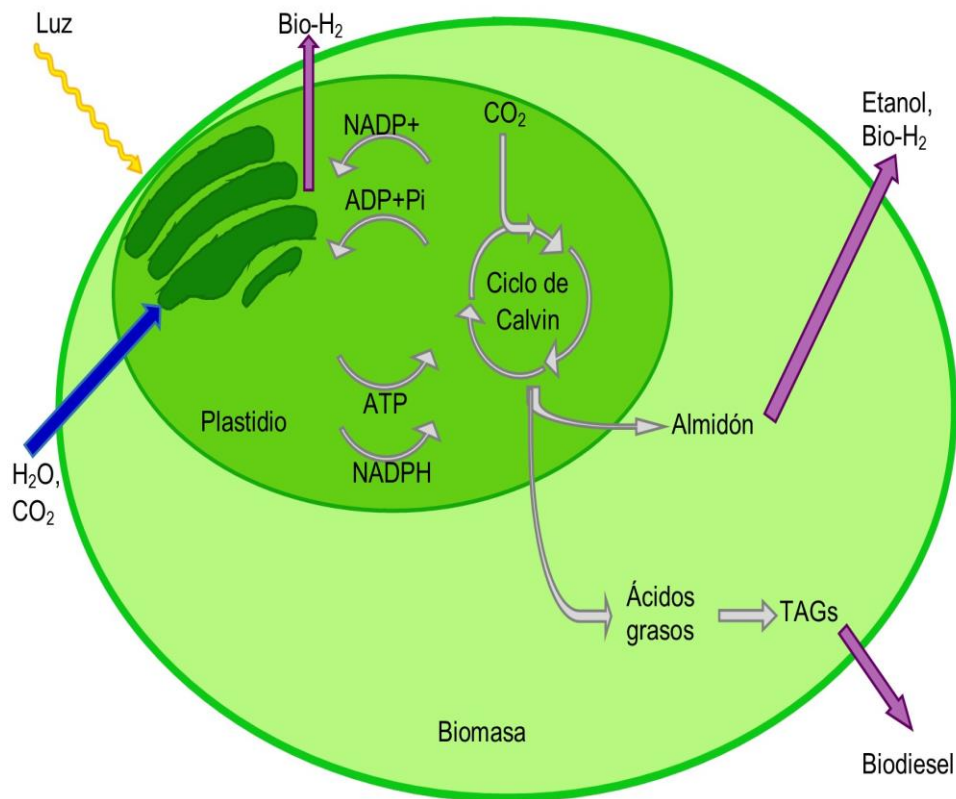


Figura 1. Ruta sintética de producción de biocombustibles en la célula

Las microalgas se encuentran compuestas principalmente de carbohidratos, proteínas y lípidos, y varían de una a otra dependiendo de la especie. (

Tabla 1).

Tabla 1. Composición bioquímica de algunas especies más comunes de microalgas

Microalga	%Lípidos	%Proteína	%Carbohidratos
<i>Arthrospira máxima</i>	6-7	60-71	13-16
<i>Botryococcus braunii</i>	86	4	20
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2	57	26
<i>Chlorella vulgaris</i>	14-22	51-58	12-17
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	11	29	14
<i>Dunaliella salina</i>	6	57	32
<i>Euglena gracilis</i>	14-20	39-61	14-18
<i>Scenedesmus obliquus</i>	12-14	50-56	10-17
<i>Scenedesmus</i> <i>dimorphus</i>	37	35	60
<i>Spirulina platensis</i>	4-9	46-63	8-14
<i>Tetraselmis maculata</i>	3	52	15
<i>Nannochloropsis</i> sp.	18	29	36
<i>Nannochloropsis</i> <i>oculata</i>	28-31	19-22	18-20
<i>Haematococcus</i> <i>pluvialis</i>	15	48	27

Basado en: (Becker, 2007; Campaña-Torres, Martínez-Córdova, Martínez-Porchas, López-Elías, & Porchas-Cornejo, 2012; Chacón-Lee & González-Mariño, 2010; Sydney et al., 2010; Tanaka, Muto, Liang, Yoshino, & Matsunaga, 2015; L. Wang, Li, Sommerfeld, & Hu, 2013)

La composición bioquímica de las microalgas puede verse influenciada por las condiciones de cultivo. Si la intensidad de luz es alta se disminuye el contenido de lípidos polares (fosfolípidos,

glicolípidos) y aumenta el contenido de lípidos neutros (triglicéridos, esteroides, ácidos grasos libres). El aumento de la temperatura incide de manera directa sobre la producción de biomasa (óptima para cada especie, varía entre 28-35°C), así como también, sobre el grado de saturación de los ácidos grasos (Hernández-Pérez & Labbé, 2014), un ejemplo se presenta en las especies de microalgas *Nannochloropsis salina* y *Ochromonas dánica*, en las cuales el contenido de lípidos aumenta al incrementar el valor de la temperatura. (Q. Hu et al., 2008)

La restricción de nitrógeno, fósforo o azufre se aumenta la producción de almidón en la célula de la microalga. (Vitova, Bisova, Kawano, & Zachleder, 2014) La restricción únicamente del nitrógeno favorece la producción de lípidos pero restringe la producción de proteínas en la célula, (Bernard, 2011; Markou, Angelidaki, & Georgakakis, 2012) mientras que la limitación únicamente de azufre inhibe la división celular y en altas concentraciones bloquea a la célula en la asimilación de carbohidratos. (Markou et al., 2012) En microalgas de la especie *Scenedesmus obliquus* a medida que se aumenta la intensidad de luz (antes de que se presente el fenómeno de la fotoinhibición) se incrementa la acumulación de carbohidratos. Igualmente, si esta especie es sometida a limitaciones de nitrógeno la cantidad de lípidos y carbohidratos aumenta. (Ho, Chen, & Chang, 2012)

4.1.3 Sistemas de cultivo de microalgas.

Para la producción de biomasa microalgal, los métodos actualmente más viables a gran escala son los estanques “Raceway” y los fotobiorreactores tubulares. Los estanques tipo “Raceway” pueden contener grandes cantidades de biomasa, pero tienen como desventajas que al estar en un ambiente al aire libre, pueden contaminarse por otros microorganismos y debido a la evaporación se puede llegar a perder una cantidad de agua considerable. En el caso de los fotobiorreactores

tubulares, la especie de microalga se mantiene sin ninguna contaminación, pero necesita energía para mantener un flujo turbulento (realizado por una bomba mecánica).(Chisti, 2007a; Ayhan Demirbas, 2010; Perez-garcia, Escalante, Luz, & Bashan, 2010)

Igualmente, pueden cultivarse en condiciones autótrofas y heterótrofas. En condiciones requieren principalmente una fuente de carbono como CO₂ y luz, y de manera heterótrofa usando sustratos de carbono disueltos en el medio de cultivo como fuente de carbono (glucosa, acetato) y en ausencia de luz. Los cultivos heterótrofos en comparación con los autótrofos presentan un mayor crecimiento, generan menos costos y un mayor control de la contaminación. Por ejemplo, *Chlorella sp.* en cultivo heterótrofo produce en promedio entre (4–20) g/L mientras que un cultivo autótrofo entre (60–100) mg/L (estanque abierto) y 360 mg/L (fotobiorreactor). En un cultivo heterótrofo de *Chlorella protothecoides* se producen 55,20% de lípidos, mientras que en un cultivo autótrofo aproximadamente 15%.(Perez-garcia et al., 2010; Tabernero, Martín del Valle, & Galán, 2012)

4.1.4 Producción de biocombustibles a partir de microalgas.

Desde la década de los setentas (70's) las microalgas se consideran como un posible sustituto de los combustibles fósiles, pero debido a los costos de producción y limitaciones de la época esta idea fracasó. Luego, en la década de los ochentas (80's) se retomaron los estudios e investigaciones que han ido aumentando hasta la fecha. A pesar de las desventajas que su cultivo presenta, gracias a su enorme potencial como materia prima para los biocombustibles, no hay duda que con el tiempo se convertirá en una de las fuentes de energía más importantes.(Horsman, Wu, Lan, & Dubois-calero, 2008)

Las microalgas tienen la capacidad de producir varios tipos de biocombustibles. El hidrógeno (H_2) se puede producir por biofotólisis directa e indirecta, el biodiesel por medio de la transesterificación de los triglicéridos, el biometano por digestión anaerobia, el bioetanol por fermentación, el biopetróleo por conversión termoquímica y el diesel y gasolina verde por medio de licuefacción hidrotérmica catalítica directa. (Bahadar & Khan, 2013) En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los procesos de conversión las respectivas tecnologías y los biocombustibles que se pueden producir.

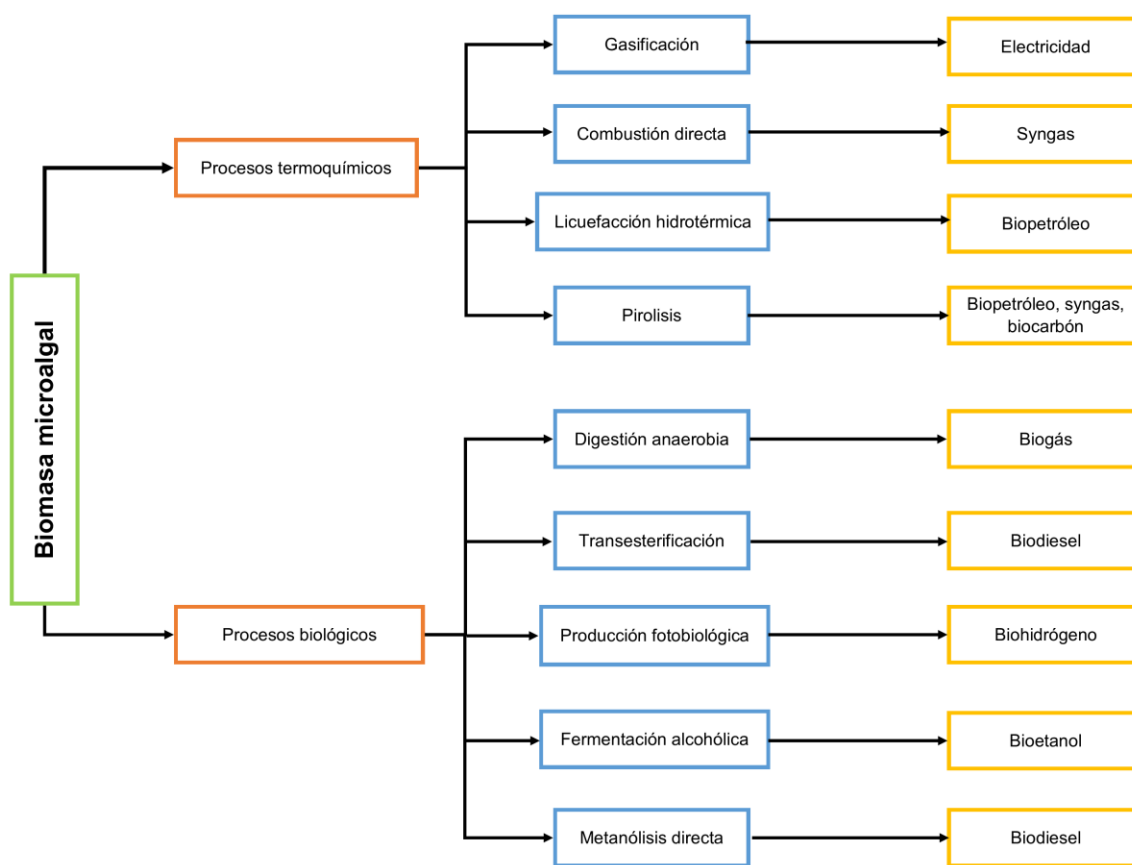


Figura 2 . Procesos de conversión de biomasa microalgal en biocombustibles

4.1.4.1 Biohidrógeno.

El hidrógeno es considerado como uno de los mejores combustibles alternativos que tiene aplicación en licuefacción del carbón, baterías y la mejora de crudos pesados. Puede ser producido mediante dos rutas diferentes, una por fotofermentación y otra por fermentación oscura. (Chong, Sabaratnam, Shirai, & Ali, 2009; Horsman et al., 2008; Kongjan, O-thong, Kotay, Min, & Angelidaki, 2010) En la primera el rendimiento depende de factores tales como, el tipo de microorganismo (un solo tipo a la vez de microorganismo), el pH de la reacción, la temperatura y la composición de la materia prima (que puede ser ajustada mediante la adición de nutrientes).(Ginkel, Oh, & Logan, 2005; C. M. Pan & Fan, 2008; Skonieczny & Yargeau, 2009) La fermentación oscura puede realizarse utilizando diversos grupos de microorganismos que poseen sistemas multi-enzimáticos, individualmente o a través de cultivos mixtos. El biohidrógeno puede ser producido por microorganismos mesófilos (*Chlamydomonas reinhardtii*) o termófilos (*Thermoanaerobacterium* sp).(Kongjan et al., 2010; Roy, Kumar, Ghosh, & Das, 2014) En este proceso hay que tener en cuenta factores como el tipo de inóculo, el pH, la temperatura, la presión parcial de hidrógeno, la composición de la materia prima y el tiempo de residencia del reactor. (Khanal, 2008)

4.1.4.2 Biodiesel

El biodiesel es producido por la transesterificación de los triglicéridos producidos por las microalgas. El biodiesel producido a partir de microalgas tiene propiedades similares a las del diesel convencional, tales como, densidad, viscosidad, punto de ignición y capacidad calorífica. Las microalgas que se utilizan en la producción de biodiesel son generalmente algas verdes. Este tipo de microalgas, se caracterizan por que pueden acumular cantidades considerables de lípidos,

obteniéndose un alto rendimiento de aceite. El contenido de lípidos puede variar entre el (1–70)% en peso seco, aunque algunas especies en ciertas condiciones pueden llegar a alcanzar el 90% de aceite en peso seco.

4.1.4.3 Biopetróleo

La biomasa de microalgas recolectada normalmente queda con gran cantidad de agua, lo que hace que se deba hacer un secado previo antes de realizar algún posterior tratamiento. Este secado consume gran cantidad de energía, haciendo que el proceso a largo plazo sea insustentable. Tanto los procesos termoquímicos tradicionales como la pirólisis y la gasificación, requieren un proceso de secado previo, que no los hace económicamente viables, mientras que, los procesos termoquímicos para biomasa húmeda, como la gasificación hidrotérmica y licuefacción hidrotérmica pueden ser una alternativa para la producción de biopetróleo a partir de microalgas a través de un método de conversión acuosa evitando el proceso de secado. De este proceso principalmente se obtiene un líquido (biopetróleo), junto a un biocombustible gaseoso y un sólido (carbón verde).(Lam & Lee, 2012)

4.1.4.4 Bioetanol

El bioetanol es producido mediante la fermentación de carbohidratos que se encuentran en las células. En un primer paso los carbohidratos se hidrolizan a azúcares fermentables (glucosa) para la posterior producción de bioetanol mediante la fermentación. Los carbohidratos se pueden acumular en la capa exterior de la pared celular (pectinas, alginato, agar), en la capa interna de la pared celular (celulosa, hemicelulosa) o dentro de la célula (almidón). Algunas especies de microalgas pueden acumular grandes cantidades de carbohidratos, por ejemplo, *Porphyridium*

cruentum (40%), *Prymnesium parvum* (25-33%), *Scenedesmus abundans* (41%), *Scenedesmus dimorphus* (21-52%), *Scenedesmus obliquus* (15-51.8%), *Spirogyra* sp. (33-64%), *Tetraselmis suecica* (15-50%) (% peso seco).(Lam & Lee, 2015)

4.1.4.5 Biometano y biogás

El proceso de producción de biogás y biometano consiste principalmente en una hidrólisis, posteriormente una ácidogénesis, seguido de una acetogénesis/ deshidrogenación y finalmente una metanización.(Tabatabaei, Sulaiman, Nikbakht, Yusof, & Najafpour, 2011; Weiland, 2010)

En la primera etapa los microorganismos anaerobios (*Bacterioides*, *Clostridia*, *Bifidobacteria*) atacan los sustratos y comienzan a romperlos. El tiempo de reacción en la hidrólisis depende del tipo de sustrato que se tenga, por ejemplo los carbohidratos demoran unas horas, las proteínas y lípidos varios días y la lignocelulosa varias semanas. En esta etapa se producen acetato e hidrógeno, además de ácidos grasos volátiles.(Deublein & Steinhauser, 2008; Weiland, 2010)

En la segunda etapa, otro tipo de bacterias actúan para convertir los compuestos producidos en el anterior paso en ácidos orgánicos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno y CO₂. En la tercera etapa, los productos de la fase anterior son transformados por bacterias acetogénicas para producir hidrógeno y ácido acético. Finalmente, en la última fase actúan bacterias metanogénicas que realizan el proceso de metanación.(Deublein & Steinhauser, 2008)

4.2 Antecedentes

Las microalgas se han cultivado durante décadas para la industria farmacéutica y para consumo humano, pero fue hasta 1970, durante la primera crisis del petróleo que se comenzó a desarrollar la idea de implementarlas como cultivo energético para la producción de

biocombustibles.(Farooq, Suh, Park, & Yang, 2014) He de ahí la evolución de la investigación en el tema de microalgas y los biocombustibles en relación a la implementación de distintos métodos de cultivo con el fin de producir mayores cantidades de biomasa y además optimizar sus condiciones de cultivo, extracción y rendimiento en producción de biocombustibles.

Con el fin de identificar tendencias y nuevas tecnologías sobre la producción de biocombustibles a partir de microalgas se han realizado diferentes estudios cuantitativos. (Silveira, Gonçalves, Andrade, & Souza, 2014) realizaron un análisis bibliométrico con el fin de determinar las principales tendencias y lagunas en los estudios de macroalgas para la producción de biocombustibles dentro de los años 1945 y 2013, basados en 160 trabajos publicados en 78 revistas. Usaron las bases de datos de Thomson Institute for Scientific Information. Encontraron que la comunidad científica se encontraba interesada en el uso de biomasa de macroalgas de las especies *Laminaria* spp., *Ulva* spp. y *Saccharina* spp. para la obtención de biocombustibles, principalmente bioetanol, biogás, bio-petróleo, biodiesel, biometano, biohidrógeno, *biochar* e *hydrochar* especialmente durante el periodo comprendido entre 2010 a 2013. El bioetanol fue el biocombustible más estudiado. Igualmente, el estudio arrojó que la investigación sobre este tema se concentraba en países como Corea del Sur, China y el Reino Unido. Finalmente concluyen que la producción a gran escala de macroalgas debe ser más productiva y de bajo costo para ser ambiental y económicamente factible, además de que se necesitan más estudios sobre la mejora de cada etapa en la conversión de la biomasa a biocombustible con el fin de reducir los costos.

(Konur, 2011) realizó un estudio cuantitativo de algas (microalgas, macroalgas) y bioenergía en el caso de las nuevas tecnologías emergentes y procesos de nanociencia y nanotecnología basado en publicaciones desde 1980 a 2010, basados en 717 documentos. Usaron las bases de datos de Science Citation Index-Expanded (SCIE) y Social Sciences Citation Index (SSCI). Los

resultados de esta investigación revelan que Estados Unidos, China, Alemania y el Reino Unido son los países que más contribuyen en la publicación de literatura sobre el tema. La institución que realiza el mayor número de publicaciones es *The Chinese Academy* con el 2.6% de los documentos. La revista que realiza más publicaciones *Bioresource Technology* (24 artículos), seguido por *Journal of Applied Phycology* (17 artículos) y *Biotechnology and Bioengineering* (15 artículos). Adicionalmente, expone una lista de los autores más citados en el tema, arrojando que Chisti (2007)(Chisti, 2007b) es el autor que tiene el mayor impacto en la literatura con 320 citas, seguido por Lewis y Nocera (2006)(Lewis & Nocera, 2006) con 296 citas y Demirbas (2001)(Ayhan Demirbas, 2001) con 187.

5. Diseño metodológico

5.1 Minería de texto

La selección y clasificación de las referencias bibliográficas se llevaron a cabo empleando la minería de texto, la cual permitió identificar las principales tendencias en investigación en el área de las microalgas como fuente de biocombustibles.

La minería de texto es una herramienta de análisis que permite la captación, análisis de la información estructurada en bases de datos de artículos o patentes, con el fin de dar valor agregado, identificando los principales campos de la investigación en el área de interés. Esto permite a las organizaciones o a los investigadores formular estrategias para anticipar oportunidades o riesgos en la formulación de sus proyectos de investigación. La realización de este ejercicio tuvo el acompañamiento de la Unidad de Bibliometría de la Universidad Santo Tomás.

La metodología empleada contempló las etapas de planeación, búsqueda, captación, análisis y organización de la información con el fin de identificar los aspectos científicos y técnicos en la producción de biocombustibles a partir de microalgas, identificando las diferentes especies empleadas para este fin y los procesos técnicos, además de los indicadores cienciométricos del caso.

El desarrollo del trabajo contempla las siguientes actividades:

- Definición del tema
- Identificación de descriptores, definición de las ecuaciones de búsqueda, tipo de documentos a analizar (artículos).
- Análisis de datos mediante un programa de minería de textos (*Vantage Point*) y hoja de cálculo de Excel. Indicadores cienciométricos.
- Elaboración del informe final, con retroalimentación y validación de los investigadores expertos que acompañan el desarrollo del ejercicio.

Se consultó la base de datos referencial *Scopus* (Elsevier, B.V. 2016) para determinar la actividad científica relacionada con los términos: “microalgae” and “biofuel” or “bioethanol” or “biodiesel” or “biomethane” or “biogas” or “biohydrogen” or “bio-oil” and “technology”, con los cuales se estructuró una ecuación de búsqueda. Los registros obtenidos de la base de datos consultada, se analizaron mediante el programa especializado de minería de texto *Vantage Point* (Licencia académica 9.0, *Search Technology, Inc*), disponible para la unidad de Bibliometría del CRAI - Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga. Las etapas del proceso de minería realizado durante este proyecto se presentan en la Figura 3. En la Tabla 2, se presentan los indicadores cienciométricos que se identifican durante la realización de un ejercicio de minería de texto.

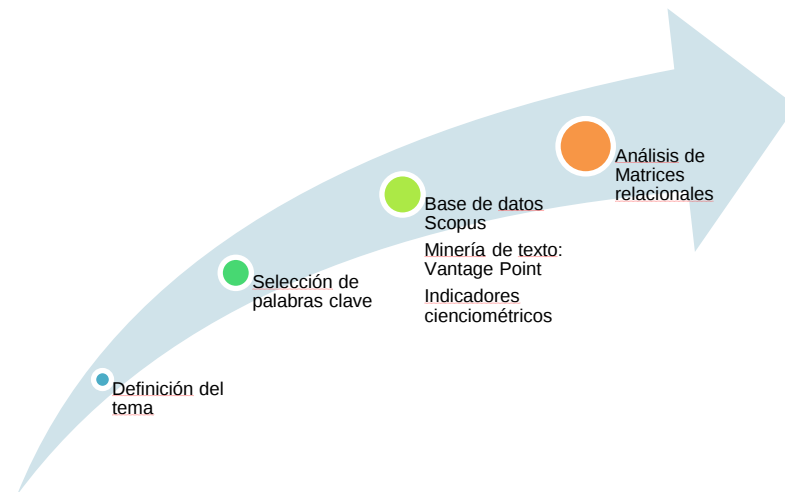


Figura 3. Etapas del proceso metodológico llevado a cabo en el ejercicio de minería de texto. Adaptado de Unidad de Bibliometría- USTABUCA, 2016

Tabla 2. *Indicadores cienciométricos*

Tipo de documento	Artículos científicos
Bases de datos	Bases de datos tipo referenciales y de texto
Estructurar la ecuación de búsqueda	Palabras clave, buscar en los <i>keywords</i> , título y <i>abstract</i> del artículo, período de consulta
Número de documentos	Número de artículos
Dinámica de publicaciones	Número de artículos por años
Autores	Investigadores más importantes en el tema
Afiliación por país	Países donde trabajan los investigadores
Afiliaciones por institución	Organizaciones de tipo académico, privadas, gubernamentales, públicas
En qué tema	Área de conocimiento en la cual tiene su aplicación el trabajo de investigación.
Dónde se publica	Revistas científicas

6. Resultados y discusión

6.1 Minería de Texto

Con el fin de identificar los indicadores cuantitativos relacionados con la obtención de biocombustibles empleando microalgas, se estructuró la siguiente ecuación de búsqueda en la base de datos de Scopus (Elsevier, B.V., 2016) (TITLE-ABS-KEY (biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil") AND TITLE-ABS-KEY (microalgae)) AND DOCTYPE (ar) AND SUBJAREA (mult OR agri OR bioc OR immu OR neur OR phar OR mult OR ceng OR chem OR comp OR eart OR ener OR engi OR envi OR mate OR math OR phys) AND PUBYEAR > 1999

A continuación, se presentan los principales indicadores cuantitativos obtenidos mediante la minería de texto con el software de *Vantage Point*.

6.1.1 Dinámica científica.

Con la ecuación de búsqueda propuesta se obtuvieron 2831 registros correspondientes a artículos científicos indexados durante el período 2000 – 2016. En la Figura 4 se puede observar la distribución de los artículos por año. El interés por el estudio de biocombustibles a partir de microalgas presenta una tendencia creciente a partir del año 2007, incrementándose fuertemente a partir del 2011. El año de mayor actividad fue el 2015 con 608 publicaciones en el tema. En lo corrido del 2016 se registraron 506 documentos. Utilizando la Ley de Solla Price¹ (De Solla Price,

¹ La ley de Price resulta de la observación del crecimiento del volumen de publicaciones científicas. Según se ha observado –con registros fiables desde el siglo XVIII- que las publicaciones científicas tienen una tasa de crecimiento más o menos constante, valiendo ya sea para el conjunto de las publicaciones en todas las disciplinas consideradas como un todo, como para el análisis del crecimiento de cada campo por separado.

1963), se calculó la tasa de crecimiento anual de los trabajos que relacionan las microalgas con los biocombustibles.

$$\text{Ley de Price: } R = 100(e^b - 1)$$

El crecimiento del número de publicaciones durante el periodo 2000 - 2016 fue del 74,92% con un factor de correlación de datos de 0.9612.

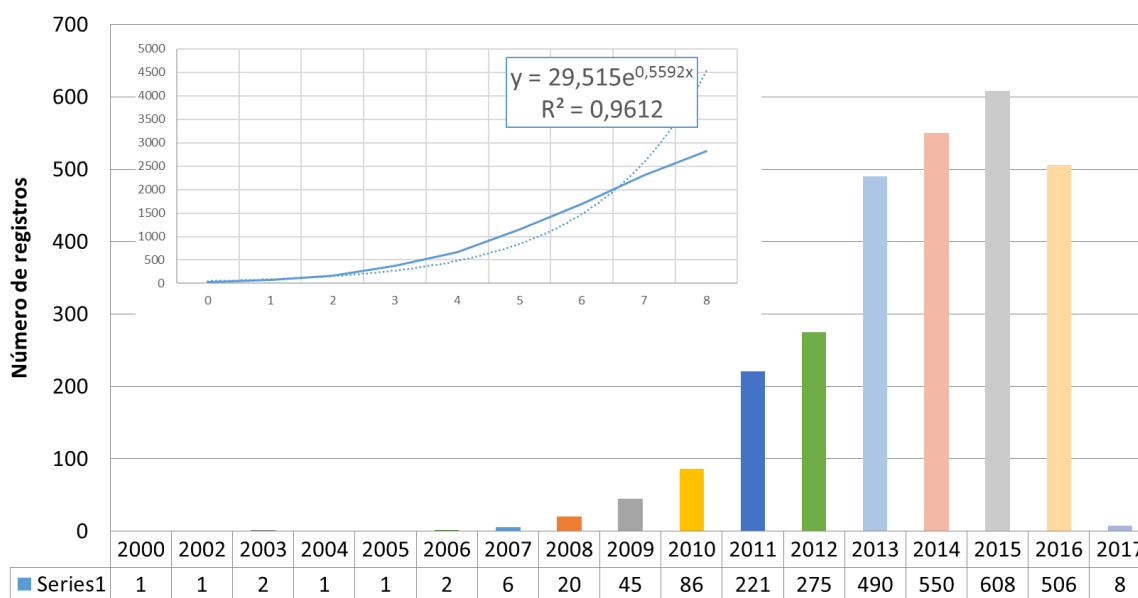


Figura 4. Dinámica de la producción científica relacionada con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

6.1.2 Áreas de aplicación.

En la Figura 5, se presentan las principales áreas de aplicación de los trabajos de investigación relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas. Ingeniería química es el área de mayor interés con más artículos con 1215, seguido de Ciencias Ambientales con 1185, y Energía con 656. Se debe aclarar que estas áreas son interdisciplinarias, por lo que un trabajo puede tener varios campos de aplicación.

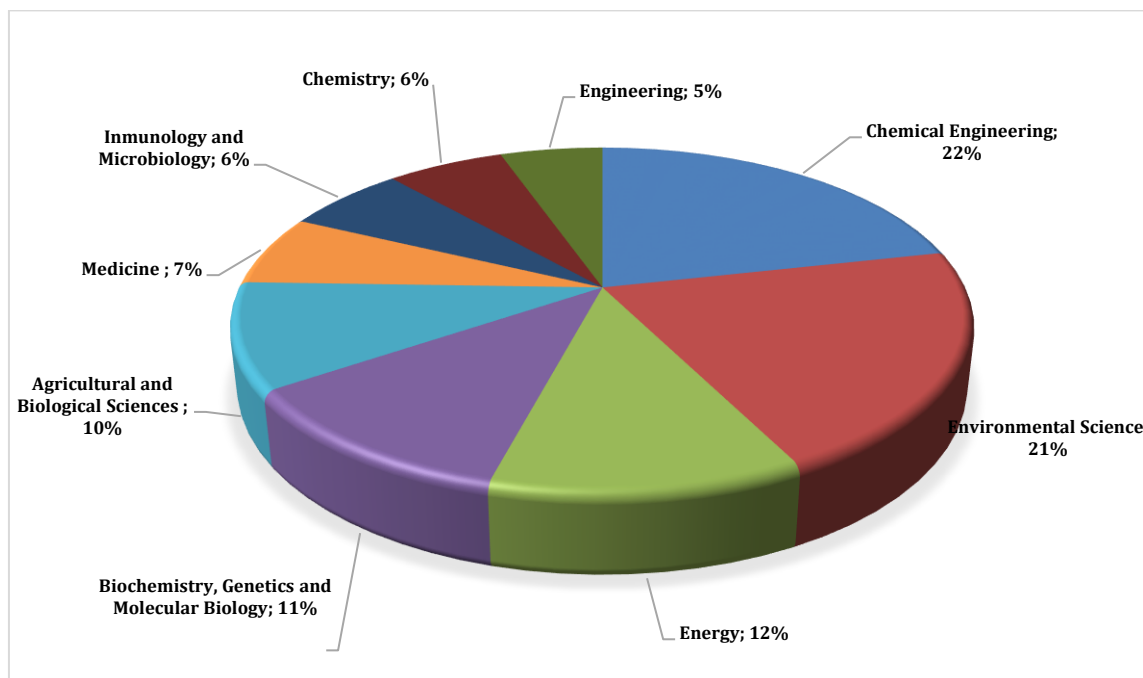


Figura 5. Áreas de conocimiento científico relacionado con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.3 Revistas científicas.

La distribución de las publicaciones en revistas científicas se presenta en la Figura 6. Las revistas más importantes en su orden son: *Bioresource Technology* con 612 artículos, *Algae Research* con 161 registros, y *Journal Applied Phycology* con 95 publicaciones, entre otras.

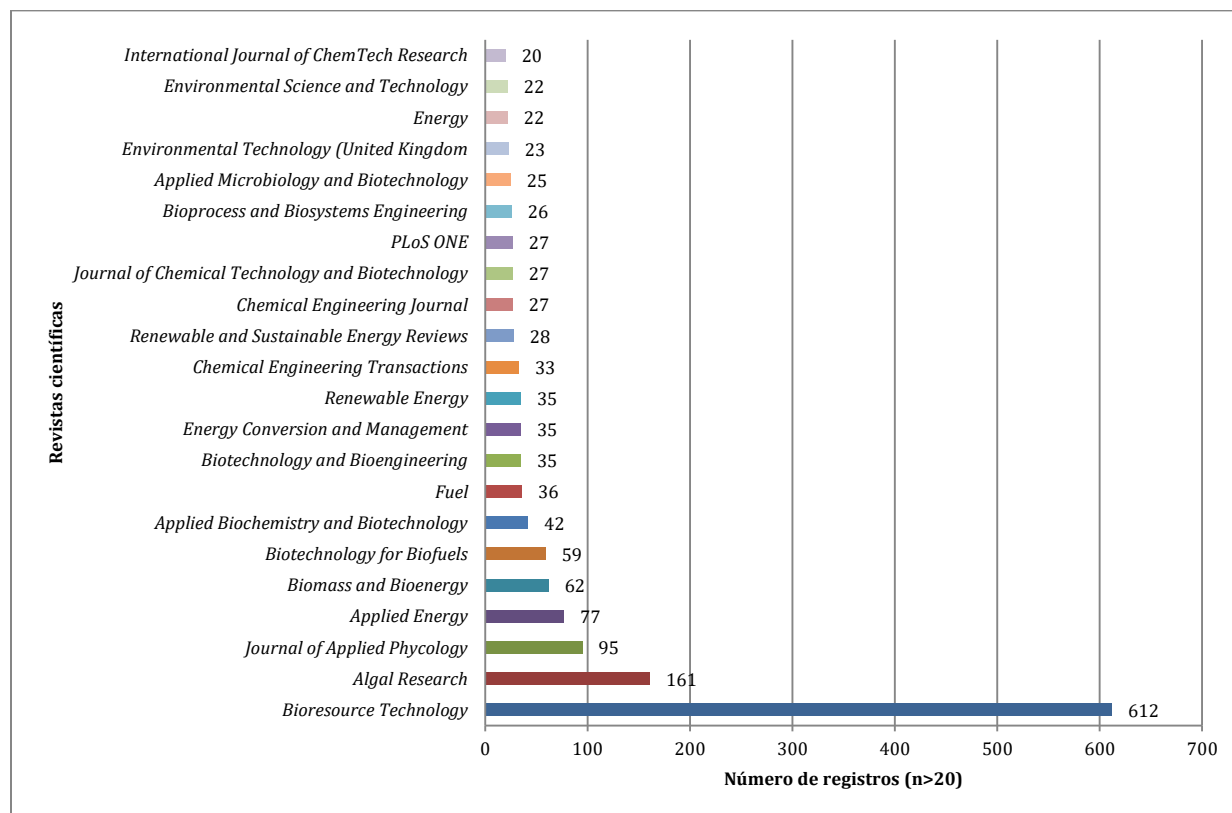


Figura 6. Revistas científicas relacionadas con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.4 Distribución por países.

A nivel mundial, los trabajos de investigación sobre la aplicación de las microalgas para la obtención de los biocombustibles, se encuentran publicados en Estados Unidos con 603 documentos, seguido de China con 506, India 257 y Corea del Sur con 214, como se observa en la Figura 7. En cuanto a Latinoamérica, Brasil es el país que realiza mayor número de publicaciones con 107, seguido de México con 39, Chile con 26 y Colombia en el 4° lugar con 23 artículos.

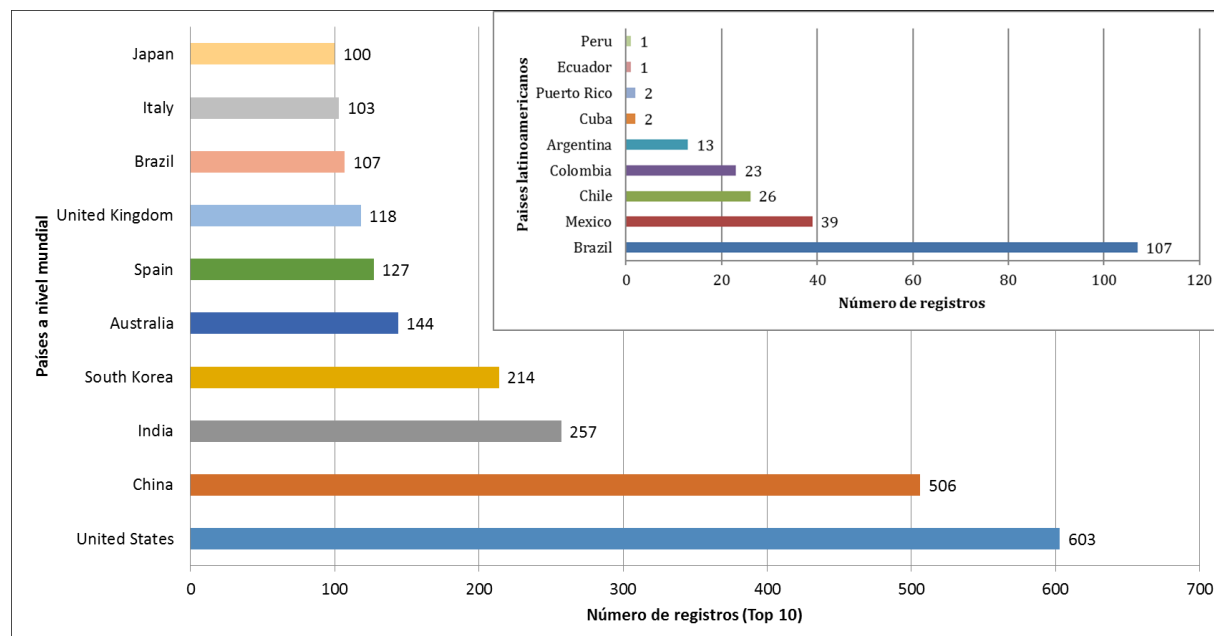


Figura 7. Distribución por países a nivel mundial de artículos científicos relacionados con la producción de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, Search Technology).

6.1.5 Distribución por instituciones.

La distribución publicaciones por instituciones relacionadas con la producción de biocombustibles de microalgas a nivel mundial se presentan en la Figura 8, y se ubican de la siguiente manera:

- Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology -KAIST (Corea): 61 publicaciones
- Department of Chemical Engineering, National Cheng Kung University (Taiwan): 54 registros.
- University of Chinese Academy of Sciences (China) 51 registros,
- CAS Key Laboratory of Biofuels, University of Chinese Academy of Sciences (China): 41 documentos

- University Center for Bioscience and Biotechnology, National Cheng Kung University (Taiwán): 41 registros.

Los resultados obtenidos sugieren que la investigación en esta área se encuentra principalmente en los institutos de educación superior públicos. Los países ubicados en el Este de Asia (Corea, Taiwán y China) se encuentran encabezando ésta lista, sugiriendo que dentro de sus políticas está la búsqueda de combustibles alternativos y el apoyo a la investigación.

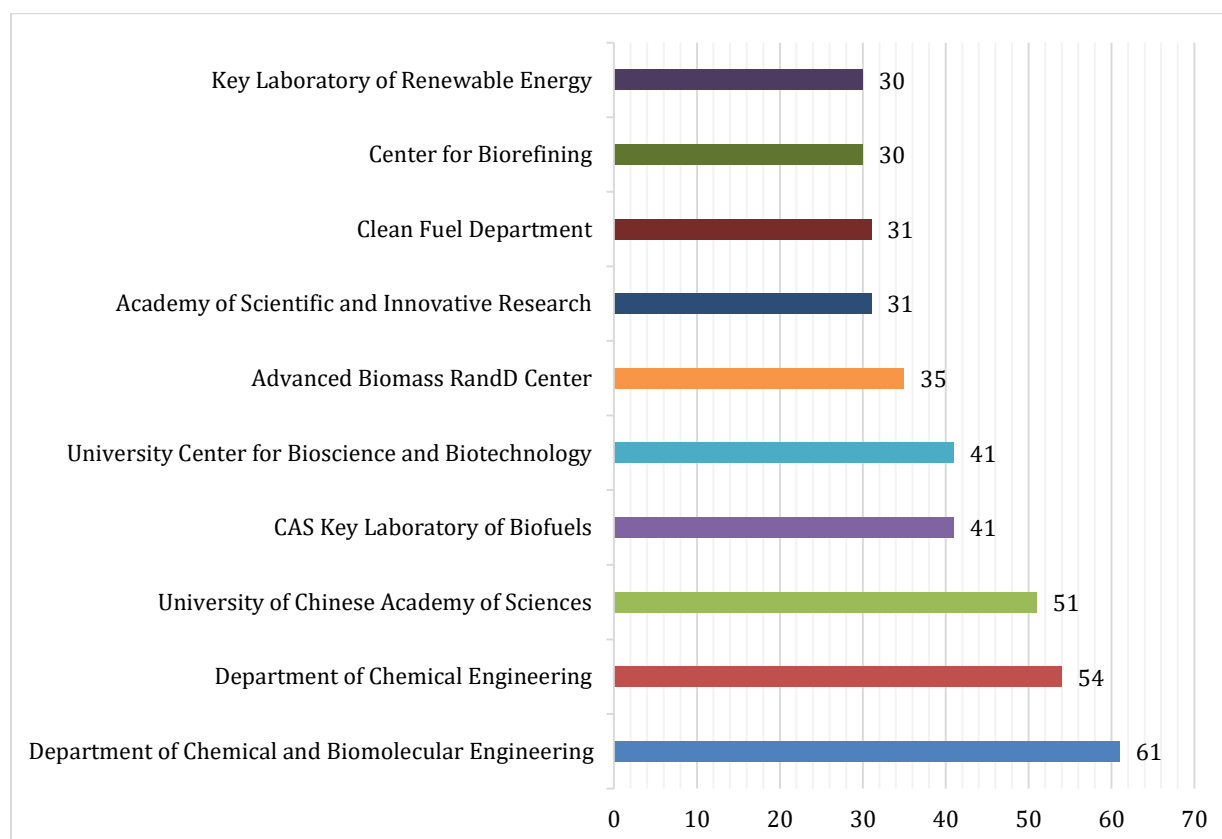


Figura 8. La distribución publicaciones por instituciones relacionadas con la producción de biocombustibles de microalgas a nivel mundial

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.6 Determinación de la relación de microalgas con la producción de biocombustibles.

Mediante el uso del programa de minería de textos *Vantage Point* (VP), la gran cantidad de datos que se obtienen durante una consulta bibliográfica, pueden agruparse por términos, empleando las palabras claves que se reportan dentro de los artículos. En este caso, se formaron grupos teniendo en cuenta las microalgas y los diferentes tipos de biocombustibles que pueden obtenerse a partir de estas. Esto con el fin de obtener las matrices que permitan determinar las relaciones existentes, por ejemplo, entre las distintas especies de microalgas, biocombustibles y métodos de obtención que se emplean en este campo. Se debe tener en cuenta, a la hora de analizar las matrices, que este ejercicio es una aproximación que tiene que ser analizada luego al detalle con revisiones específicas de artículos o reportes. En esta consulta se obtuvieron más de 10000 términos (*Keywords*) identificadas y depuradas con el software de *VantagePoint*. Se seleccionaron aquellas palabras clave que identificaron especies de microalgas, específicamente del género *Chlorella*, los diferentes tipos de biocombustibles de interés y los procesos empleados en su obtención. La distribución por palabras clave relacionadas con la microalga *Chlorella* se presenta en la *Figura 9*.

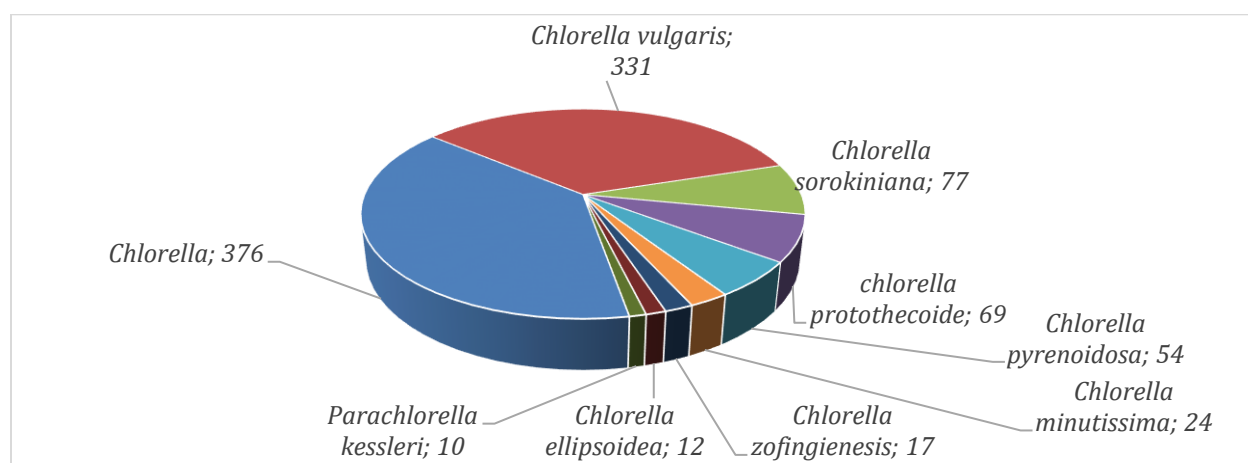


Figura 9. La distribución de palabras clave asociadas con el término *Chlorella*

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

La palabra clave más empleada por los autores es *Chlorella* con 376 registros que corresponden a artículos científicos; la variedad más estudiada considerando este indicador corresponde a la *Chlorella vulgaris* con 331 registros, seguida por la *Chlorella sorokiniana*, con 77; *Chlorella protothecoide*, con 69 y *Chlorella pyrenoidosa*, con 54 entre las más importantes, de acuerdo con la ecuación de búsqueda estructurada para este trabajo (Figura 9).

En cuanto a los procedimientos para la obtención de biocombustibles se tienen que las palabras clave más empleadas por los investigadores son: trans-esterificación (189), Pirólisis (76), trans-esterificación *in situ* (28), trans-esterificación directa (24), gasificación (21), entre otros, como se observa en la Figura 10.

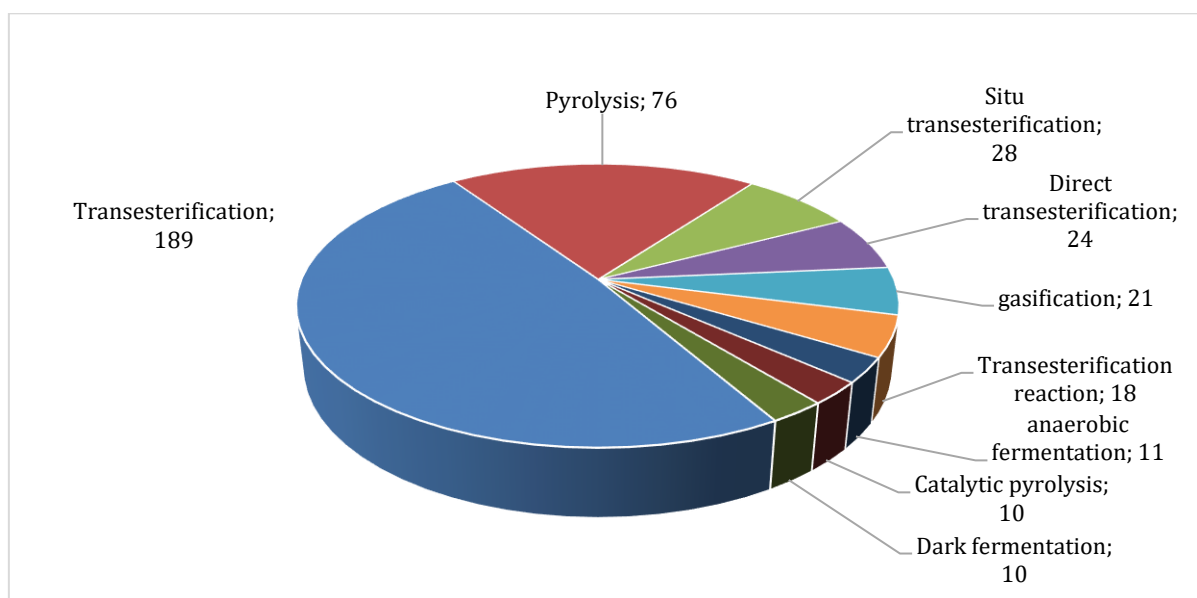


Figura 10. La distribución de palabras clave asociadas con métodos de obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

En la Figura 11 se presentan las especies de microalga del género *Chlorella* y los métodos de obtención de biocombustibles más empleados y reportados dentro de la revisión bibliográfica. La trans-esterificación y la pirólisis son los procesos más aplicados empleando como biomasa *Chlorella* y *Chlorella vulgaris*. El proceso de transesterificación, a pesar de ser muy estudiado presenta poca viabilidad a gran escala, ya que se necesita secar la biomasa y realizar un proceso de lisis para lograr la extracción del aceite, además sólo se produce un tipo de biocombustible. El secado de la biomasa (pretratamiento) aumenta los costos en la producción del biocombustible. Como solución a las problemáticas de la transesterificación, se encuentra la transesterificación directa, metanólisis o transesterificación *in situ*, un proceso que como se puede observar en la Figura 10, aún no es muy estudiado. La metanólisis consiste en juntar en un solo paso la extracción del aceite y la transesterificación, eliminando así los reactivos usados en la extracción y además, disminuyendo el tiempo y los costos de producción.

El otro proceso que más se reporta es el de la pirolisis, ya que con este se puede producir biopetróleo, biocarbón y gases. Este proceso a pesar de que es una forma eficaz en la conversión de biomasa a biocombustibles, el proceso de secado (pretratamiento) de la biomasa es un gasto innecesario de energía y no es ni ambiental ni energéticamente favorable. La licuefacción hidrotérmica es un proceso muy poco estudiado y que además es parecido a la pirolisis, con la ventaja que no se necesita secar la biomasa. La licuefacción termoquímica o hidrotérmica es la de mayor interés para la industria ya que disminuye los costes sobre el proceso de secado ya que la biomasa entra húmeda al sistema y además produce biocombustibles como el biopetróleo y otros subproductos (carbón vegetal, biogás) que son de gran utilidad en la industria y en el sector transporte.

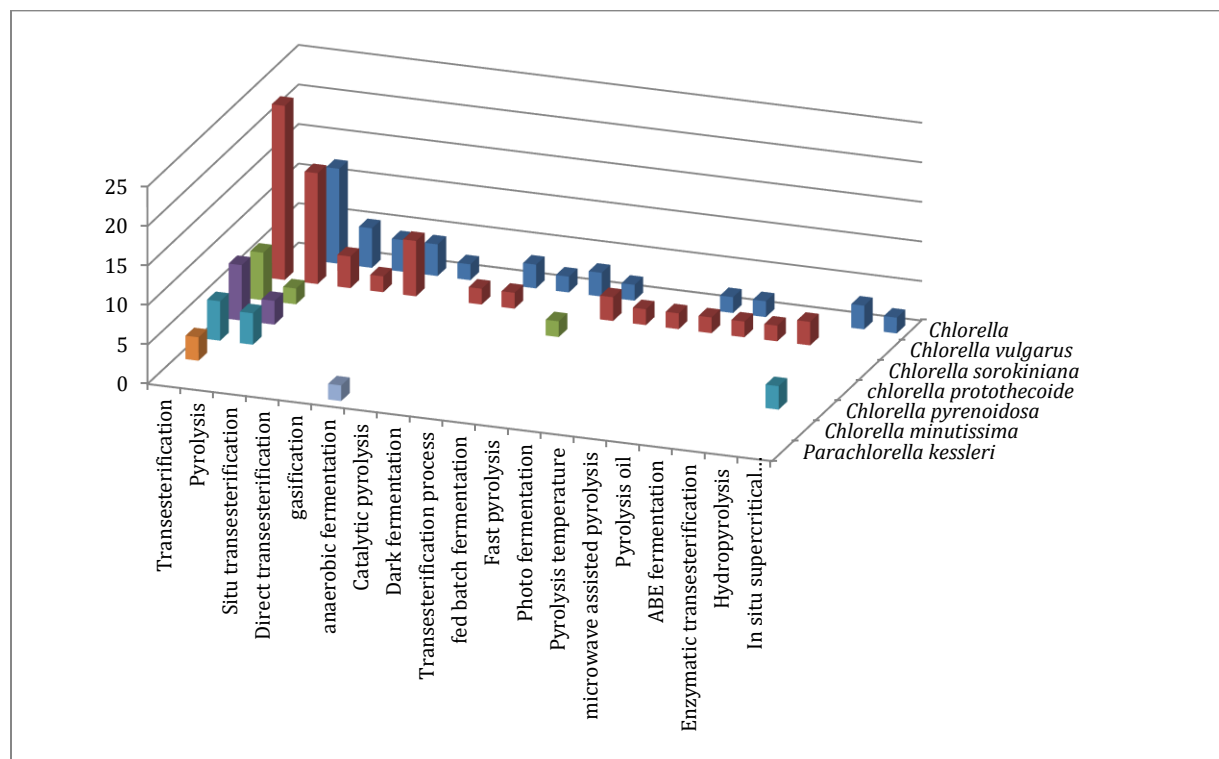


Figura 11. Relación entre las especies de microalgas del género *Chlorella* y los métodos de obtención de biocombustibles

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

Entre las diferentes microalgas, las especies de *Chlorella* son las de mayor interés debido a su alta productividad, alto contenido de lípidos y resistencia a las condiciones de luz altas típicas de los fotobiorreactores.

Chlorella vulgaris es una especie de microalga bastante estudiada debido a que puede cultivarse fácilmente con un régimen de nutrientes barato y tiene una tasa de crecimiento más rápida en comparación con los cultivos energéticos terrestres, además de una alta productividad de la biomasa. Se utilizan para fabricar complementos alimenticios, productos cosméticos, producción de biodiesel y la desintoxicación de metales pesados. (Safi, Zebib, Merah, Pontalier, & Vaca-Garcia, 2014)

Chlorella sorokiniana ha sido ampliamente estudiada, en cuanto a su fisiología, genética y su producción de ácidos grasos insaturados, omega 3, 6 y 9, empleados en la obtención de suplementos nutricionales, cosméticos, farmacéuticos y combustibles. La mayor limitante del uso industrial de esta microalga es el alto costo de su medio de cultivo, que generalmente contiene fertilizantes orgánicos derivados del petróleo.(Chisti, 2007a; Spolaore, Joannis-Cassan, Duran, & Isambert, 2006; Ugwu, Aoyagi, & Uchiyama, 2008)

Chlorella protothecoides es una microalga que se tiene un gran potencial en la producción de biocombustibles, especialmente biodiesel, ya que puede crecer autotróficamente (fotosíntesis) y heterotróficamente (fuentes de carbono extracelular, como glucosa) sin ningún inconveniente. En este proceso, cuando pasa del autotrofismo al heterotrofismo, el cloroplasto se desaparece y es remplazado por cuerpos lipídicos, lo que conduce a una acumulación de aceite.(Perez-garcia et al., 2010; Xiong, Li, Xiang, & Wu, 2008; Xu, Miao, & Wu, 2006)

Chlorella pyrenoidosa es conocida por su gran contenido de proteína, clorofila, vitaminas, minerales, fibra y ácidos nucleicos. Se usa principalmente como suplemento dietario, debido a eso hay muy poca investigación como en el área de los biocombustibles.(Nakano, Takekoshi, & Nakano, 2007)

Chlorella minutissima se conoce por su potencial como productor de biodiesel, debido a que puede producir gran cantidad de lípidos (57% en porcentaje en peso seco) y además tiene potencial en el tratamiento de aguas residuales.(Singh, Bansal, Jha, & Jain, 2013)

Parachlorella kessleri es una especie de microalga que se conoce por su alta producción de biomasa, lípidos y almidón. Se considera como una microalga ideal en la producción de biocombustibles ya que no sólo se ha logrado su alta productividad de lípidos en el laboratorio, sino también a escala semi-industrial en fotobiorreactores al aire libre.(Ota et al., 2016)

De acuerdo a la Figura 11 y la Figura 12, la microalga más estudiada tanto en la producción de diferentes biocombustibles y tecnologías es la *Chlorella vulgaris*. El biodiesel es el biocombustible más estudiado. Tanto *C. sorokiniana*, *C. protothecoides*, *C. pyrenoidosa*, *C. kessleri*, *C. minutissima* y *Parachlorella kessleri* son mayormente estudiadas para la producción de biodiesel por medio de la transesterificación y pirolisis. *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana* y *Chlorella protothecoides*, han sido estudiadas para la obtención de biogás y metanol.

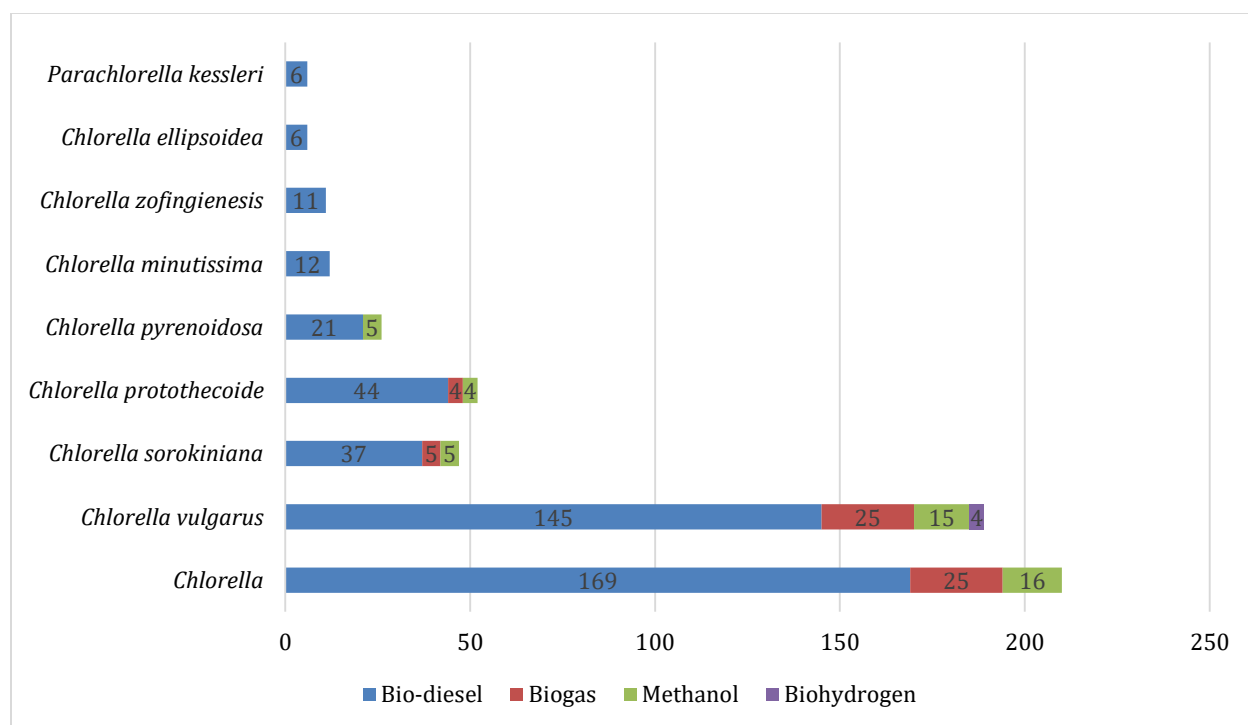


Figura 12. Relación entre las especies de microalgas del género *Chlorella* y los diferentes tipos de biocombustibles

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

Complementando este estudio de minería de texto se presentan algunos ejemplos de trabajos de investigación relacionados con la producción de biocombustibles a partir de microalgas.

La trans-esterificación es una reacción en donde los triglicéridos o ácidos grasos libres procedentes de aceites vegetales o grasas animales reaccionan con alcohol (en exceso) (con o sin

presencia de un catalizador) y producen ésteres monoalquílicos (biodiesel) y glicerol.(Ayhan. Demirbas, 2010)(Bajhaiya, Mandotra, Suseela, Toppo, & Ranade, 2010)(Mata et al., 2010) Los alcoholes que comúnmente se usan son metanol, etanol, propanol, butanol. El metanol y etanol son los más usados, pero el metanol es el que tiene ventajas químicas (alcohol de cadena corta y polar) además de un bajo costo.(Bisen, Sanodiya, Thakur, Baghel, & Prasad, 2010) La transesterificación es la manera más simple, barata y eficiente para la producción de biodiesel a gran escala. (Ordúz Díaz, 2015) El biodiesel producido tiene la característica de ser renovable, no tóxico, biodegradable y puede ser usado directamente o mezclado (con diésel) en motores diésel. (Ghaly, Dave, Brooks, & Budge, 2010)

El poder calorífico del diésel derivado de petróleo es de 42 MJ kg^{-1} . Dependiendo de la materia prima para la producción de biodiesel, varía su poder calorífico. Un biodiesel producido a partir de semillas de colza o soya tendría un poder calorífico de 39 MJ kg^{-1} y uno producido a partir de microalgas 41 MJ kg^{-1} . (Ayhan. Demirbas, 2010)

Otro método de obtención de biocombustibles es la pirólisis, la cual consiste en calentar y descomponer térmicamente la biomasa microalgal en ausencia de oxígeno. Este proceso se realiza a 1 atm y a una temperatura entre $400\text{-}600^{\circ}\text{C}$. (Bridgwater, 2007) La biomasa de microalgas tiene ciertas ventajas sobre la biomasa lignocelulósica ya que sus productos son más estables. (Suali & Sarbatly, 2012) La pirólisis produce biopetróleo, biocarbón y gases, y su proporción depende de las condiciones de funcionamiento y especie de microalgas. (Akhtar & Saidina Amin, 2012)

La pirólisis se puede clasificar en lenta, rápida, catalítica y de microondas, dependiendo de la velocidad y medio de calentamiento y la presencia de catalizadores. En el caso de la pirólisis lenta, esta se caracteriza por una baja velocidad de calentamiento ($5\text{-}10^{\circ}\text{C min}^{-1}$) y un largo tiempo en el contacto de la biomasa con el calor (10-30 s). (Liang, 2013; Suai & Sarbatly, 2012).

Un estudio realizado del proceso de pirólisis lenta con la microalga *Spirulina platensis* encontró que el rendimiento de biopetróleo era de 23-29% en peso seco y de sólidos residuales se encontraba entre 28-40% en peso seco, con un pH de 9 y 10 y un poder calorífico entre 25 y 39 MJ kg⁻¹, respectivamente. (Grierson, Strezov, Ellem, McGregor, & Herbertson, 2009; Jena, Das, & Kastner, 2011) El poder calorífico del biopetróleo producido es mucho menor que el del petróleo (43-46 MJ kg⁻¹). (Ayhan. Demirbas, 2010)

Estudios realizados sobre el análisis de ciclo de vida (LCA) en el proceso de pirólisis de biomasa de microalgas llegaron a la conclusión que a pesar de que la pirólisis es una forma eficaz en la conversión de biomasa en biocombustibles, el proceso de pretratamiento (secado) de la biomasa es un gasto innecesario de energía y no es ni ambiental ni energéticamente favorable. (Bennion, Ginosar, Moses, Agblevor, & Quinn, 2015)

Otro estudio realizado por Grierson, determinó las propiedades de biopetróleo usando como materia prima la biomasa obtenida de *Tetraselmis Chui* y se encontró que dentro de los componentes había ácidos grasos, alcanos, alquenos, amidas, aldehídos, terpenos, pirrolidinas y fenoles. Se obtuvo un biocarbón con un poder calorífico entre 14-26 MJ kg⁻¹. El gas producido (CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆) con un poder calorífico entre 1,2 y 4,8 MJ kg⁻¹. (Grierson, Strezov, & Shah, 2011) Otro estudio realizado por el mismo autor reporta el uso de seis diferentes cepas de microalgas, *Tetraselmis chuii*, *Chlorella like*, *Chlorella vulgaris*, *Chaetoceros muelleri*, *Dunaliella tertiolecta* y *Synechococcus* con alto potencial productor de biocombustibles para evaluar su comportamiento en condiciones de pirólisis lenta (710°C). Se obtuvo un biogás con diferente poder calorífico dependiendo de la especie de microalgas: *Tetraselmis chuii* (3,4 MJ kg⁻¹), *Chlorella like* (1,8 MJ kg⁻¹), *Chlorella vulgaris* (4,8 MJ kg⁻¹), *Chaetoceros muelleri* (1,2 MJ kg⁻¹), *Dunaliella tertiolecta* (2,4 MJ kg⁻¹) y *Synechococcus* (1,4 MJ kg⁻¹). (Grierson et al., 2009)

Demirbas encontró que el rendimiento de biopetróleo en la pirólisis lenta aumenta a medida que aumenta la temperatura hasta llegar a 500°C, después de eso el rendimiento comienza a disminuir. (A. Demirbas, 2006)

En el caso de la pirólisis rápida, esta se lleva a cabo a una velocidad más alta de calentamiento ($10\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C s}^{-1}$) y un tiempo corto (1-3 s), con el fin de lograr mayores rendimientos en la producción de bio-petróleo. El porcentaje de rendimiento se encuentra entre 18-72% en peso seco y el bio-crudo obtenido tiene un poder calorífico entre 24-41 MJ kg⁻¹. (Belotti, De Caprariis, De Filippis, Scarsella, & Verdone, 2014; S. W. Kim, Koo, & Lee, 2014; K. Wang, Brown, Homsy, Martinez, & Sidhu, 2013) (Bridgwater, 2007)

A *Scenedesmus sp.* se le realizó el proceso de pirólisis rápida (480°C, 2 s) obteniéndose biopetróleo (biopetróleo) con un poder calorífico de 18,4 MJ kg⁻¹ (Harman-Ware et al., 2013) siendo más bajo que el de la madera 21 MJ kg⁻¹ y el de *Chlorella protothecoides* 30 MJ kg⁻¹ (cultivo autotrófico) y 41 MJ kg⁻¹ (cultivo heterotrófico). (Mohan, Pittman, & Steele, 2006)

La pirólisis catalítica se realiza normalmente a temperaturas entre 300-600°C en presencia de un catalizador (relación catalizador biomasa: 0,2-5). El rendimiento se encuentra entre 19 - 40% en peso seco. El poder calorífico del bio-petróleo producido se encuentra entre 20-33 MJ kg⁻¹. Tiene como ventaja que los catalizadores utilizados pueden ser recirculados en el reactor. Los catalizadores más comunes que se utilizan en el proceso incluye zeolitas a base de ZSM-5 (Zeolita Socony Mobil-5) y Na₂CO₃, como H-ZSM-5, Fe-ZSM-5, Cu-ZSM-5 y Ni-ZSM-5 (Babich et al., 2011; P. Pan et al., 2010)

Un estudio sobre la producción de bio-petróleo producido por la pirólisis catalítica de *Nannochloropsis sp.*, encontró que los residuos tenían un menor contenido de O (19,5% en peso seco) y un poder calorífico más alto (32,7 MJ kg⁻¹) que el residuo producido de la pirólisis directa

de la misma cepa (contenido de O: 30,1% en peso seco; poder calorífico: 24,6 MJ kg⁻¹). (P. Pan et al., 2010)

Otro estudio realizado con la cepa *Chlorella* teniendo en cuenta la presencia y ausencia del catalizador (Na₂CO₃), se encontró que el rendimiento del gas producido es mayor con la presencia del catalizador y el combustible líquido disminuye con la presencia del catalizador. (Babich et al., 2011)

Campanella y Harold (2012), reportan la influencia de cinco catalizadores derivados de ZSM-5 (H-, Fe-, Cu-, Ni-, y ZSM-5) en la producción de biocombustibles por medio de pirólisis catalítica usando como materia prima biomasa de *Chlorella sp.* Encontraron que el rendimiento en general estuvo entre 43-51% en peso seco. El catalizador H-ZSM-5 obtuvo el mayor rendimiento de biopetróleo y aumentó la fracción de hidrocarburos en la fase orgánica de 21% a 43% en peso seco y disminuyó la cantidad de coque producido (1,3% en peso seco), mientras que el catalizador Fe-ZSM-5 produjo mayor cantidad de coque (2,2% en peso seco). (Campanella & Harold, 2012)

La pirólisis asistida por microondas emplea temperaturas entre 500-800°C, con potencias entre 500 y 2250 W. El rendimiento del bio-petróleo producido se encuentra entre 18-59% en peso seco y su poder calorífico es de 42 MJ kg⁻¹. (Borges et al., 2014; Z. Hu, Ma, & Chen, 2012) Entre las ventajas de la pirólisis asistida con microondas se encuentran el rápido calentamiento y el calentamiento interno uniforme de la biomasa. (Borges et al., 2014) Normalmente se le adiciona a la biomasa microalgal carbón activado, óxidos metálicos, líquidos iónicos, ácido sulfúrico o carburo de silicio con el fin de mejorar la calidad o el rendimiento de los biocombustibles producidos. (Salema & Ani, 2012)

Se realizaron investigaciones sobre la producción de biocombustibles a partir de *Chlorella vulgaris* por medio de pirólisis asistida con microondas usando diferentes potencias en el

microondas (750, 1500 y 2250 W), diferentes catalizadores (CaO, SiC y residuos sólidos) y variación en la cantidad de catalizador (5, 10, 20, 30% en peso seco). Con potencias de 1500 y 2250 W (temperaturas de 650 y 800°C, respectivamente) se obtuvo el máximo rendimiento de biopetróleo (39% en peso seco) y mayor rendimiento de gas (52% en peso). A medida que aumenta la potencia en el microondas, aumenta la temperatura en el proceso. El carbón activado al 5% fue el mejor catalizador con un rendimiento de biocombustible de 87,47% en peso seco. (Z. Hu et al., 2012)

Borges reporta la producción de biocombustibles por medio de pirólisis asistida con microondas usando como materia prima *Chlorella sp.* y *Nannochloropsis sp.*. Se usó como absorbente SiC y se evaluó con y sin la presencia del catalizador H-ZSM-5. El catalizador tiende a formar agua en el biopetróleo lo que hace que se reduzca su poder calorífico. Como resultado encontraron que para *Chlorella sp.* el rendimiento de producción de biopetróleo fue de 57% en peso seco y para *Nannochloropsis sp.*, el rendimiento fue de 59% en peso seco. La temperatura óptima para la producción de combustible líquido en *Chlorella sp.* estuvo entre 500-560°C y para *Nannochloropsis sp.* estuvo entre de 480-530°C sin la presencia de catalizador. A temperaturas más bajas se produce mayor cantidad de carbón y a medida que aumenta se produce mayor cantidad de combustible líquido, a altas temperaturas aumenta la producción de gas. (Borges et al., 2014)

La metanólisis directa corresponde a la transesterificación in situ, transesterificación directa, que consiste en un proceso donde los triglicéridos y ácidos grasos libres reaccionan con alcoholes de cadena corta (metanol) para formar alquil ésteres (biodiesel) y glicerol en un solo paso. En este proceso la extracción y la transesterificación se juntan en un solo paso evitando la extracción, purificación, y posterior transesterificación del aceite. (Georgogianni, Kontominas, Pomonis,

Avlonitis, & Gergis, 2008) y así eliminar los reactivos usados en la extracción, disminuir el tiempo y los costos de producción. (Haas & Wagner, 2011)(Yoo, Park, & Yang, 2015)

Un estudio realizado sobre la producción de biodiesel por medio de transesterificación directa con biomasa de *Chlorella pyrenoidosa* arrojó que el rendimiento de la reacción fue de 83% usando una proporción de 220:1 metanol/ácidos grasos, a 65°C durante 2h. (Haas & Wagner, 2011). Otro estudio realizado con macroalgas marinas de la especie *Enteromorpha compressa* señaló que el rendimiento de la producción de biodiesel por medio de transesterificación in situ fue de 98.89%. (Suganya, Kasirajan, & Renganathan, 2014)

Otro método es la gasificación, que se describe como el proceso químico por el cual la biomasa se convierte a una mezcla de gases como CO, CO₂, H₂, CH₄ y N₂ o gas de síntesis (*Syngas*), dependiendo de la proporción de los componentes gaseosos. Consiste en la oxidación parcial de la biomasa en presencia de aire, oxígeno y/o vapor a altas temperaturas, normalmente en el rango de 800-1000°C para producir syngas. (Arshadi & Sellstedt, 2008) (Ayhan Demirbas, 2001).

El syngas puede ser producido a partir de biomasa por dos rutas: gasificación no catalítica y catalítica. El proceso no catalítico requiere una alta temperatura para su operación, alrededor de 1300°C, mientras que los procesos catalíticos pueden operar a temperaturas más bajas, más o menos 900°C. (Arshadi & Sellstedt, 2008).

La fermentación alcohólica es el proceso en el cual la biomasa con alto contenido de azúcar, almidón o celulosa mediante procesos metabólicos y actividad enzimática es convertido en alcohol (etanol) y CO₂. La fermentación puede realizarse de forma anaerobia y aerobia. La biomasa microalgal es molida, y el almidón (necesita tratamiento previo) es convertido en azúcares. Una vez molida se mezcla con agua y microorganismos (*Saccharomyces cerevisiae*) para darle inicio al proceso de fermentación. El etanol producido se drena desde el tanque fermentador a una unidad

de destilación. En el proceso de destilación se elimina el agua e impurezas que se encuentren en el producto (10-15% etanol). El alcohol concentrado, se condensa y puede ser mezclado con gasolina o usado directamente como combustible. El residuo sólido producido puede ser usado en procesos de gasificación o como alimento para animales. (Bridgwater, 2007; Ayhan Demirbas, 2001)

Estudios realizados con *Chlorella vulgaris* encontraron que cuando las cepas se someten a limitaciones de fósforo, nitrógeno y azufre aumenta el porcentaje de acumulación de almidón en la microalga (~60% en porcentaje seco), 50% más alto que la limitación únicamente de azufre. (Brányiková et al., 2011) Este tipo de estrategias (limitación de nutrientes) tiene la desventaja que disminuye la producción de biomasa en la microalga aunque se obtengan altas concentraciones de carbohidratos. Otros estudios realizados con *Spirulina* concluyeron que la producción de etanol a partir de esta cepa no es económicamente viable. Su porcentaje de etanol estuvo entre 0,85 -1,0 %. (Hossain, Basu, & Mamun, 2015)

6.1.7 Capacidades nacionales en la aplicación de microalgas como fuente de biocombustibles.

En la Figura 13 se muestra la distribución de artículos por año publicados en Colombia en temas relacionados en la obtención de biocombustibles a partir de microalgas. En total se registraron 23 artículos. El año 2014 fue el que presentó mayor número de publicaciones con 6.

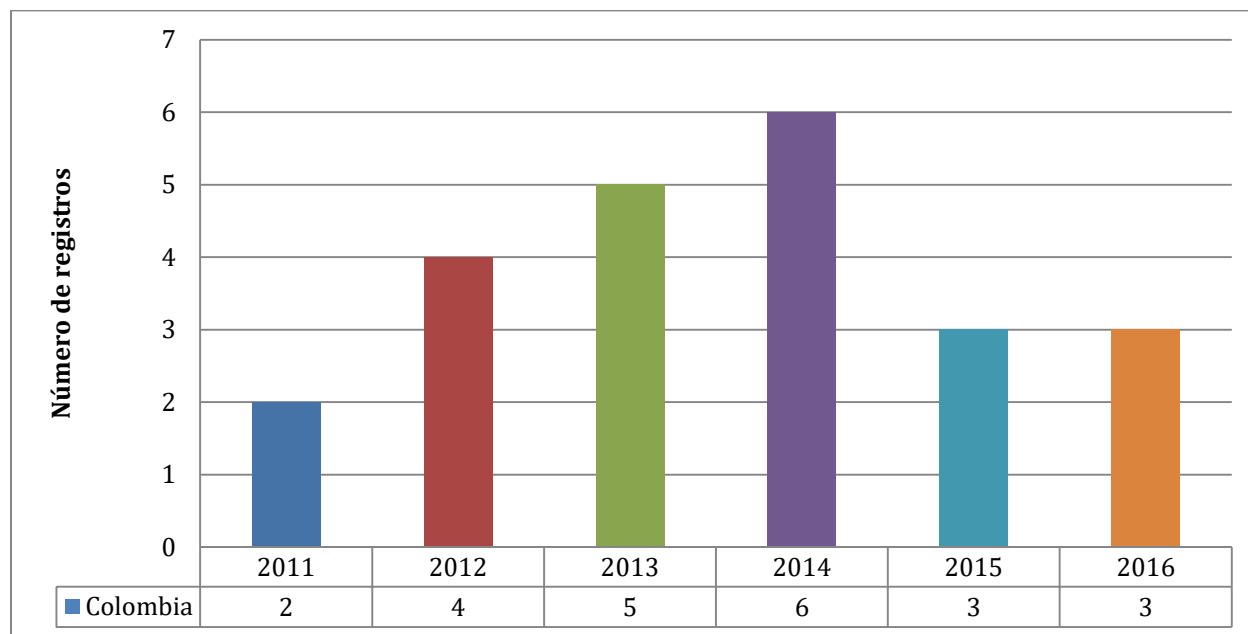


Figura 13. Distribución de artículos por año publicados en Colombia en temas relacionados en la obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.8 Instituciones en Colombia.

En la Figura 14 se muestran las instituciones que trabajan en Colombia y que publican artículos relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas. Se encontró que en el primer lugar se encuentra la Universidad Industrial de Santander con 9 publicaciones, ubicado en Bucaramanga. Seguido se encuentran el Instituto de Biotecnología y Agroindustria (Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, Manizales), el Grupo de Investigación *Research Center for Sustainable Development in Industry and Energy* –CIDES- (Universidad Industrial de Santander) y la Universidad de San Buenaventura (Cartagena) con 5 publicaciones. Luego se encuentran el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas -CIEMAT- (Madrid, España), el Instituto Colombiano de Petróleo –ICP- (Bucaramanga) y el Grupo Ambiental de Investigación Aplicada –GAIA- (Universidad de Santander, Bucaramanga)

con 2 publicaciones. Cabe resaltar que la mayoría de la investigación en nuestro país se realiza en instituciones de carácter público, exceptuando a la Universidad San Buenaventura y la Universidad de Santander que son de carácter privado.

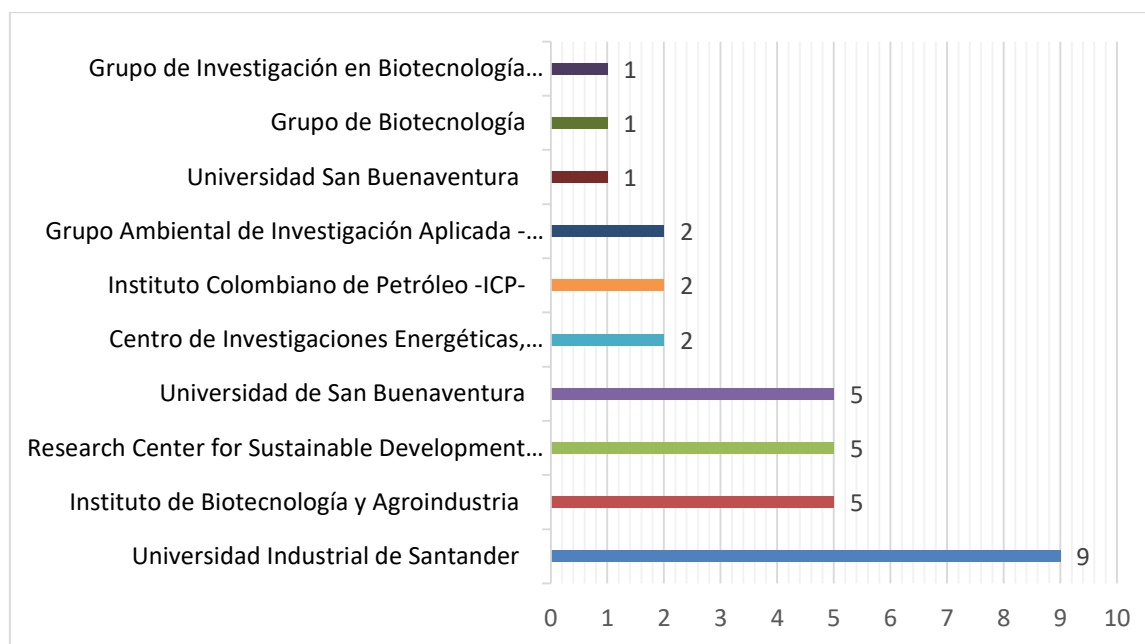


Figura 14. Instituciones que trabajan en Colombia y que publican artículos relacionados con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Scopus* (Elsevier, 2016), procesados con *VantagePoint* (Versión 9.0, *Search Technology*).

6.1.9 Actividad Inventiva

Con el fin de establecer la dinámica inventiva en el tema de la obtención de biocombustibles a partir de microalgas, se consultó la base de datos de acceso libre Lens Patent (<https://www.lens.org/lens/>), la cual fue desarrollada por CAMBIA, una organización internacional independiente, sin ánimo de lucro. Esta base de datos permite la consulta gratuita de más de 10 millones de documentos tipo patente y aplicaciones que incluyen las bases de datos de Estados Unidos, Australia, Europa.

Se estructuró la siguiente ecuación de búsqueda: *(title:(biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil") || abstract:(biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil") || claims:(biofuel OR bioethanol OR biodiesel OR biomethan OR biogas OR biohydrogen OR "bi-oil")) && (title:microalgae || abstract:microalgae || claims:microalgae)*, y se obtuvieron 913 registros de los cuales 416 corresponden a familias de patentes.

6.1.9.1 Dinámica de la actividad Inventiva

Como se puede observar en la Figura 15, el interés por proteger las invenciones relacionadas con la obtención de biocombustibles empleando microalgas comienza de manera incipiente a partir del 2002. A partir del 2008 se aprecia una tendencia creciente, que llega a su punto máximo en el 2014 con 144 patentes. En lo corrido del 2017 se registran tan solo 17 documentos. Este comportamiento es muy similar al de la actividad científica medida por la publicación de artículos científicos.

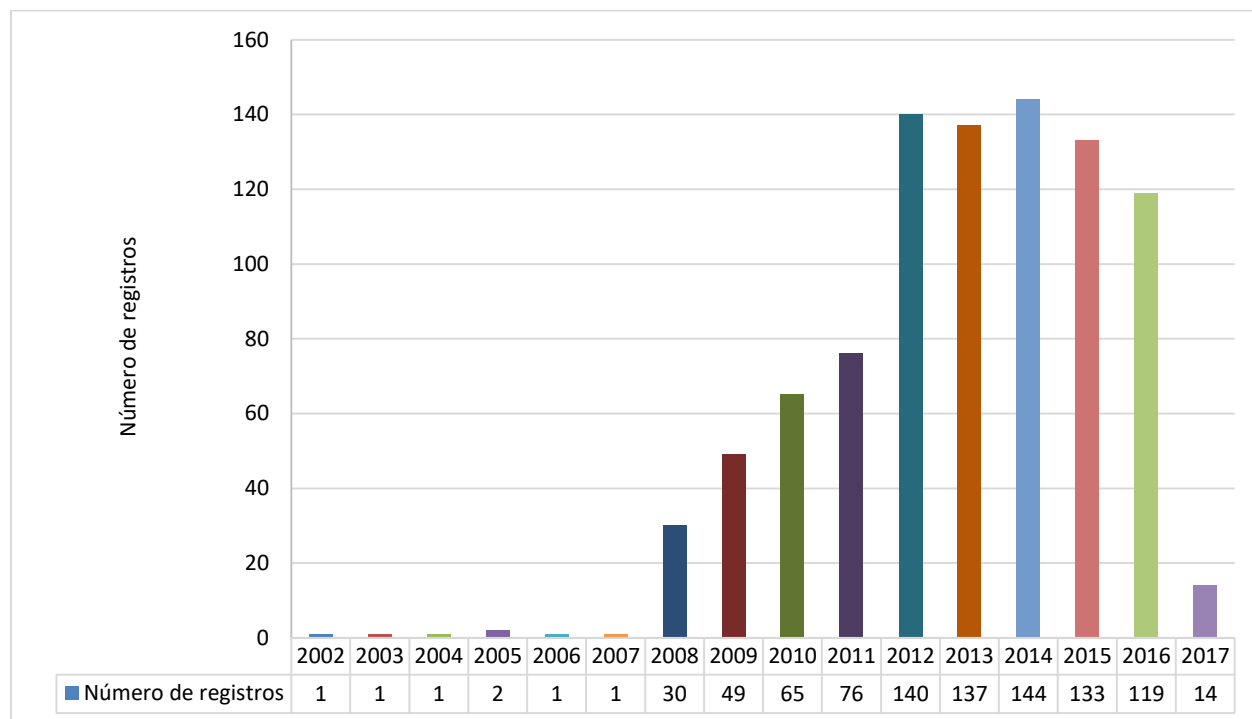


Figura 15. Distribución por años del número de patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Lens* (<https://www.lens.org/lens/>), procesados con Microsoft Excel (2016),

6.1.9.2 Distribución de patentes por jurisdicción.

Como se puede observar en la *Figura 16*, la distribución de patentes por oficinas de patentes nos indica cuales son los países en los cuales se protegen las invenciones relacionadas con el tema de este proyecto. China registra 244 documentos, seguido por Estados Unidos con 227, la OMPI 169 y Corea del Sur 124, entre otros.

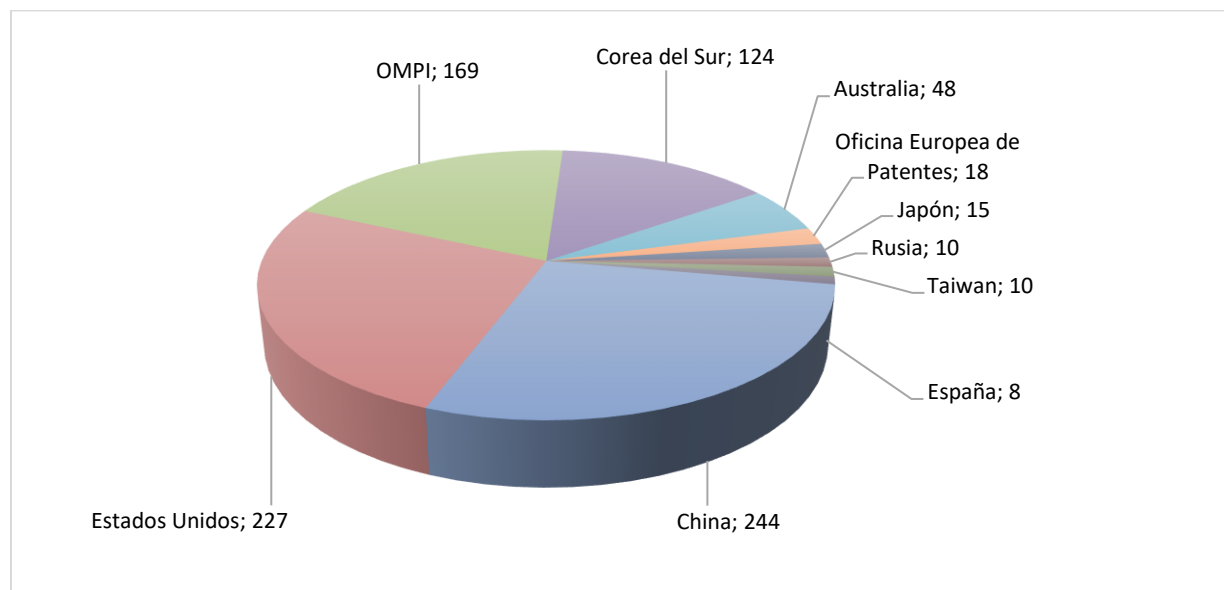


Figura 16. Distribución de invenciones relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas por oficinas de patentes.

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Lens* (<https://www.lens.org/lens/>), procesados con Microsoft Excel (2016).

6.1.9.3 Distribución de patentes de acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP).

En cuanto a la aplicación de las patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas, se encuentran ubicadas en la sección C de la Clasificación Internacional de Patentes de la WIPO, que corresponde a Química y Metalúrgica y sus aplicaciones para la obtención de compuestos tales como: vidrio, cerámicos, fertilizantes, plásticos, pinturas, productos de la industria del petróleo, entre otros. La distribución de las patentes de acuerdo con la CIP se presenta en la Figura 17.

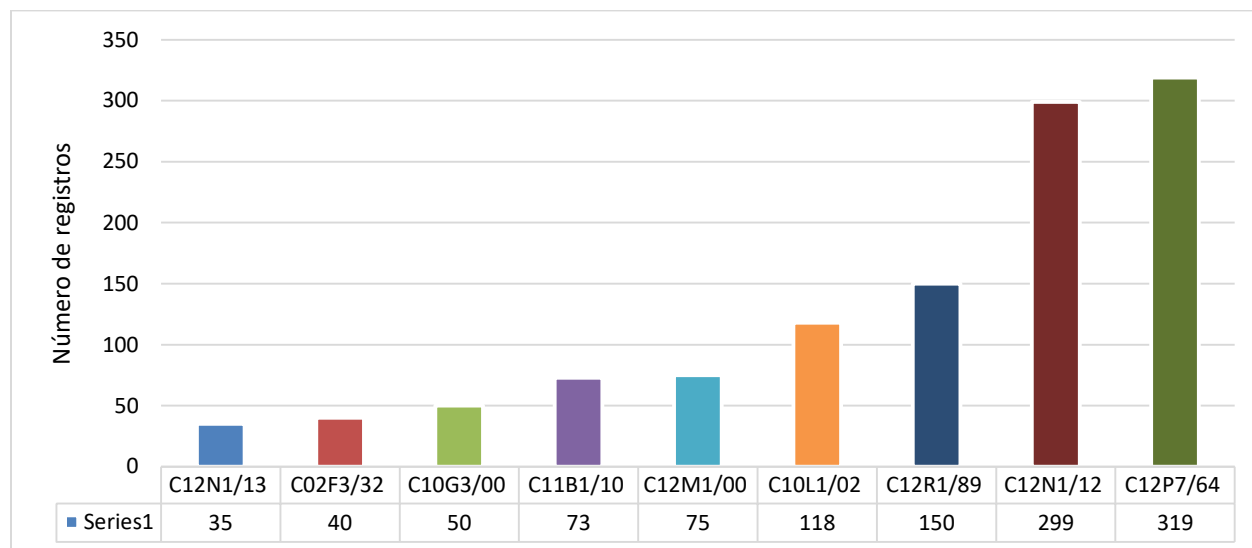


Figura 17. Clasificación Internacional de Patentes relacionadas con la obtención de biocombustibles a partir de microalgas por oficinas de patentes

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI-Biblioteca, Universidad Santo Tomás, seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de *Lens* (<https://www.lens.org/lens/>), procesados con Microsoft Excel (2016).

7. Conclusiones

Se encontraron 2831 registros correspondientes a artículos científicos indexados durante el período 2000–2016 sobre el tema en estudio. Se encontró que la investigación acerca de las microalgas como materia prima en la producción de biocombustibles creció exponencialmente durante los últimos cinco años, posiblemente por el aumento de los precios de petróleo en el año 2011 (31% más que en 2010) y el temor de una posible crisis debido a la “primavera árabe”. (El Universal, 2011)

El estudio de minería de texto mostró el creciente interés en el uso de microalgas del género de *Chlorella*, especialmente las especies *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella protothecoide* y *Chlorella pyrenoidosa* para su uso en la producción de biocombustibles tales como biopetróleo, biodiesel, biogás y biohidrógeno. El biodiesel fue el biocombustible más estudiado.

Igualmente se encontró que la investigación relacionada con la producción de biocombustibles a partir de microalgas se encuentra altamente concentrada en Estados Unidos, China, India y Corea del Sur, mientras que en zonas climáticas que favorecen el cultivo de microalgas tales como África y América del Sur la investigación es muy pobre. En cuanto a Latinoamérica, Brasil es el país que realiza mayor número de publicaciones, seguido de México, Chile y Colombia.

En cuanto a la viabilidad de los cultivos de microalgas para la producción de biocombustibles y productos de interés, nuestro país ofrece condiciones óptimas para su desarrollo. Colombia tiene ventajas sobre otros países que lo hace muy llamativo para explotar este tipo de fuente de energía renovable como lo son la luz solar, la radiación, disponibilidad de agua y espacio y un clima con poca variación. Además de convertirse en una potencial fuente de energía se contrarrestaría la escasez de crudo (junto con toda la crisis que conlleva) y se mitigarían los efectos ambientales causados por los combustibles fósiles. La zona del departamento de La Guajira presenta condiciones medioambientales y geográficas aptas para desarrollar este tipo de cultivos, además que se incrementarían las ofertas de empleo para la población que en su mayoría es indígena.

Chlorella vulgaris es la especie de microalga más prometedora para utilizar en nuestro país en la producción de biocombustibles, ya que tiene una tasa de crecimiento bastante alta, su régimen de nutrientes es barato y su gran adaptación a diferentes ecosistemas, hace plantear la posibilidad de implementar cultivos a gran escala que sustituyan con el tiempo los cultivos agroindustriales usados en la producción de biodiesel y bioetanol. Sin embargo, se necesita realizar más estudios con el fin de lograr llevar a cabo el proceso a escala industrial, variando las condiciones que favorezcan su crecimiento y posterior recolección de la biomasa, haciendo así más competitivo el proceso.

En cuanto a las tecnologías en producción de biocombustibles a partir de microalgas cabe resaltar dos tipos de tecnologías: la licuefacción hidrotérmica y la pirólisis. A pesar de los pocos estudios que se encontraron en cuanto a la licuefacción hidrotérmica, este tipo de tecnología es la de mayor interés para la industria ya que disminuye los costes sobre el proceso de secado ya que la biomasa entra húmeda al sistema y además produce biocombustibles como el biopetróleo y otros subproductos (carbón vegetal, biogás) que son de gran utilidad en la industria y en el sector transporte. Cabe resaltar que la tendencia de los cultivos de microalgas va encaminado al uso del concepto de biorefinería, ya que este tipo de plataforma industrial podría integrar diferentes procesos de conversión de biomasa y producir biocombustibles, energía y productos de valor agregado, además los residuos del proceso podrían retroalimentar el sistema y aumentar la rentabilidad económica de las microalgas.

8. Divulgación de los resultados

Se escribió un artículo para publicación en la revista *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. (Elsevier, ISSN: 1364-0321)

9. Recomendaciones

Teniendo en cuenta el trabajo realizado de minería de texto en la producción de biocombustibles a partir de microalgas, se recomienda el uso de *Chlorella vulgaris* para su uso en nuestro país, pero se debería estudiar cepas nativas haciendo énfasis en la adaptación a los diferentes ecosistemas de nuestro país.

Se recomienda igualmente evaluar el uso de microalgas en la producción de otro tipo de biocombustibles, como biogás y biohidrógeno, que son muy poco estudiados.

Por último, se sugiere evaluar el concepto de biorefinería y estudiar las diferentes condiciones de temperatura y tiempo de reacción para obtener mayor cantidad de biocombustibles.

Bibliografía

- Ahmad, a. L., Yasin, N. H. M., Derek, C. J. C., & Lim, J. K. (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 584–593.
- Akhtar, J., & Saidina Amin, N. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5101–5109.
- Anderson, R. (2005). *Algal Culturing Techniques*. (Elsevier, Ed.).
- Arshadi, M., & Sellstedt, A. (2008). Production of Energy from Biomass. In J. Clark & F. Deswarte (Eds.), *Introduction to Chemicals from Biomass* (pp. 143–178).
- Babich, I. V., van der Hulst, M., Lefferts, L., Moulijn, J. a., O'Connor, P., & Seshan, K. (2011). Catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality liquid bio-fuels. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 3199–3207.
- Bahadar, A., & Khan, M. B. (2013). Progress in energy from microalgae : A review, 27, 128–148.
- Bajhaiya, A., Mandotra, S., Suseela, M., Toppo, K., & Ranade, S. (2010). Algal biodiesel: the next generation biofuel for India. *Asian Journal of Experimental Biological Sciences*, 1(4), 728–739.
- Bala Deshpande, V. K. (2015). Text Mining. In *Predictive Analytics and Data Mining* (pp. 275–303). <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-801460-8.00009-4>
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207–210.
- Beer, L. L., Boyd, E. S., Peters, J. W., & Posewitz, M. C. (2009). Engineering algae for biohydrogen and biofuel production. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(3), 264–271.
- Belotti, G., De Caprariis, B., De Filippis, P., Scarsella, M., & Verdone, N. (2014). Effect of *Chlorella vulgaris* growing conditions on bio-oil production via fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 61, 187–195.
- Bennion, E. P., Ginosar, D. M., Moses, J., Agblevor, F., & Quinn, J. C. (2015). Lifecycle assessment of microalgae to biofuel: Comparison of thermochemical processing pathways. *Applied Energy*, 154, 1062–1071.

- Bernard, O. (2011). Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO₂ mitigation and biofuel production. *Journal of Process Control*, 21(10), 1378–1389.
- Biofuels information. (2010). Retrieved from <http://biofuel.org.uk/>
- Bisen, P. S., Sanodiya, B. S., Thakur, G. S., Baghel, R. K., & Prasad, G. B. K. S. (2010). Biodiesel production with special emphasis on lipase-catalyzed transesterification. *Biotechnology Letters*, 32(8), 1019–1030.
- Borges, F. C., Xie, Q., Min, M., Muniz, L. A. R., Farenzena, M., Trierweiler, J. O., ... Ruan, R. (2014). Fast microwave-assisted pyrolysis of microalgae using microwave absorbent and HZSM-5 catalyst. *Bioresource Technology*, 166, 518–526.
- Brányiková, I., Maršálková, B., Doucha, J., Brányik, T., Bišová, K., Zachleder, V., & Vítová, M. (2011). Microalgae-novel highly efficient starch producers. *Biotechnology and Bioengineering*, 108(4), 766–776.
- Bridgwater, T. (2007). *Biomass Pyrolysis*. Birmingham: IEA Bioenergy.
- Brown, D., Cabbage, M., & McCarthy, L. (2016). NASA, NOAA Analyses Reveal Record Shattering Global Warm Temperatures in 2015. Retrieved from www.nasa.gov.
- Cadoret, J. P., Garnier, M., & Saint-Jean, B. (2012). Microalgae, Functional Genomics and Biotechnology. In *Advances in Botanical Research* (Vol. 64, pp. 285–341). Elsevier.
- Campanella, A., & Harold, M. P. (2012). Fast pyrolysis of microalgae in a falling solids reactor: Effects of process variables and zeolite catalysts. *Biomass and Bioenergy*, 46, 218–232.
- Campaña-Torres, A., Martínez-Córdova, L., Martínez-Porchas, M., López-Elías, J., & Porchas-Cornejo, M. (2012). Productive response of *Nannochloropsis oculata*, cultured in different media and their efficiency as food for the rotifer *Brachionus rotundiformis* Respuesta productiva de *Nannochloropsis oculata*, cultivada en diferentes medios y su eficiencia. *International Journal of Experimental Botany*, 9457(81), 45–50.
- Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. España: Ediciones Díaz de Santos.
- Chacón-Lee, T. L., & González-Mariño, G. E. (2010). Microalgae for “Healthy” Foods- Possibilities and Challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(6), 655–675.
- Cheremisinoff, N., Rosenfeld, P., & Davletshin, A. (2008). The Food and Dairy Industry. In *Responsible Care: A New Strategy for Pollution Prevention and Waste Reduction Through Environment Management* (pp. 383–434). <http://doi.org/10.1016/B978-1-933762-16-6.50010-4>

- Chisti, Y. (2007a). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
- Chisti, Y. (2007b). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
<http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Chong, M., Sabaratnam, V., Shirai, Y., & Ali, M. (2009). Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3277–3287. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.010>
- Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378.
[http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Demirbas, A. (2006). Oily products from mosses and algae via pyrolysis. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 28(October 2013), 933–940.
<http://doi.org/10.1080/15567030802464388>
- Demirbas, A. (2010). *Algae Energy*.
- Demirbas, A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2738–2749. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.010>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2008). *Biogas from waste and renewable Resources*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- El Universal. (2011, October 26). FMI : La “primavera árabe” frenó la actividad económica en varios países, p. 1. Cartagena. Retrieved from
<http://www.eluniversal.com.co/cartagena/economica/fmi-la-primavera-arabe-freno-la-actividad-economica-en-varios-paises-50403>
- Farooq, W., Suh, W. I., Park, M. S., & Yang, J. (2014). Bioresource Technology Water use and its recycling in microalgae cultivation for biofuel application. *BIORESOURCE TECHNOLOGY*. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.140>
- Georgogianni, K. G., Kontominas, M. G., Pomonis, P. J., Avlonitis, D., & Gergis, V. (2008). Conventional and in situ transesterification of sunflower seed oil for the production of biodiesel. *Fuel Processing Technology*, 89(5), 503–509.
<http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.10.004>
- Ghaly, a. E., Dave, D., Brooks, M. S., & Budge, S. (2010). Production of biodiesel by enzymatic transesterification: Review. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 6(2), 54–76. <http://doi.org/10.3844/ajbbbsp.2010.54.76>
- Ginkel, S. W. Van, Oh, S., & Logan, B. E. (2005). Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewaters, 30, 1535–1542.
<http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.09.017>

- Grierson, S., Strezov, V., Ellem, G., McGregor, R., & Herbertson, J. (2009). Thermal characterisation of microalgae under slow pyrolysis conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1-2), 118–123.
- Grierson, S., Strezov, V., & Shah, P. (2011). Properties of oil and char derived from slow pyrolysis of *Tetraselmis chui*. *Bioresource Technology*, 102(17), 8232–8240.
- Haas, M. J., & Wagner, K. (2011). Simplifying biodiesel production: The direct or in situ transesterification of algal biomass. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113(10), 1219–1229. <http://doi.org/10.1002/ejlt.201100106>
- Harman-Ware, A. E., Morgan, T., Wilson, M., Crocker, M., Zhang, J., Liu, K., ... Debolt, S. (2013). Microalgae as a renewable fuel source: Fast pyrolysis of *Scenedesmus*. *Renewable Energy*, 60, 625–632.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina Y Oceanografía*, 49, 157–173. <http://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Ho, S. H., Chen, C. Y., & Chang, J. S. (2012). Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO₂ fixation and lipid/carbohydrate production of an indigenous microalga *Scenedesmus obliquus* CNW-N. *Bioresource Technology*, 113, 244–252. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.133>
- Horsman, M., Wu, N., Lan, C. Q., & Dubois-calero, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnology Progress*, (1), 815–820. <http://doi.org/10.1021/bp.070371k>
- Hossain, M. N. Bin, Basu, J. K., & Mamun, M. (2015). The Production of Ethanol from Micro-Algae *Spirulina*. *Procedia Engineering*, 105, 733–738. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.064>
- Hu, Q., Sommerfeld, M., Jarvis, E., Ghirardi, M., Posewitz, M., Seibert, M., & Darzins, A. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal : For Cell and Molecular Biology*, 54(4), 621–639.
- Hu, Z., Ma, X., & Chen, C. (2012). A study on experimental characteristic of microwave-assisted pyrolysis of microalgae. *Bioresource Technology*, 107, 487–493.
- Huang, G., Chen, F., Wei, D., Zhang, X., & Chen, G. (2010). Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Applied Energy*, 87(1), 38–46. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.016>
- IEA. (2013). *Resources to reserves 2013*. París.
- IEA. (2016). *World Energy Outlook 2016*. París.

- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Nueva York.
- Jena, U., Das, K. C., & Kastner, J. R. (2011). Effect of operating conditions of thermochemical liquefaction on biocrude production from *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*, 102(10), 6221–6229.
- Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production*. Iowa: John Wiley & Sons.
- Kim, S. W., Koo, B. S., & Lee, D. H. (2014). A comparative study of bio-oils from pyrolysis of microalgae and oil seed waste in a fluidized bed. *Bioresource Technology*, 162, 96–102. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.136>
- Kim, T.-H., Lee, Y., Han, S.-H., & Hwang, S.-J. (2013). The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using *Scenedesmus* sp. for wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 130, 75–80.
- Kongjan, P., O-thong, S., Kotay, M., Min, B., & Angelidaki, I. (2010). Biohydrogen Production From Wheat Straw Hydrolysate by Dark Fermentation Using Extreme Thermophilic Mixed Culture, 105(5), 899–908. <http://doi.org/10.1002/bit.22616>
- Konur, O. (2011). The scientometric evaluation of the research on the algae and bio-energy. *Applied Energy*, 88(10), 3532–3540. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.059>
- Lam, M. K., & Lee, K. T. (2012). Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology Advances*, 30(3), 673–690.
- Lam, M. K., & Lee, K. T. (2015). *Bioethanol Production from Microalgae. Handbook of Marine Microalgae*. Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00012-1>
- Lewis, N. S., & Nocera, D. G. (2006). Powering the planet : Chemical challenges in solar energy utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(43), 15729–15736.
- Liang, Y. (2013). Producing liquid transportation fuels from heterotrophic microalgae. *Applied Energy*, 104, 860–868.
- Markou, G., Angelidaki, I., & Georgakakis, D. (2012). Microalgal carbohydrates: An overview of the factors influencing carbohydrates production, and of main bioconversion technologies for production of biofuels. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96(3), 631–645. <http://doi.org/10.1007/s00253-012-4398-0>
- Mata, T. M., Martins, A. a., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232.
- Michán, L., & Muñoz-velasco, I. (2013). Cienciometría para ciencias médicas : definiciones , aplicaciones y perspectivas. *Investigación En Educación Médica*, 2(6), 100–106.

- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 20(3), 848–889. <http://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Nakano, S., Takekoshi, H., & Nakano, M. (2007). Immunoglobulin A Concentrations in Breast Milk. *Journal of Medicinal Food*, 10(1), 134–142. <http://doi.org/10.1089/jmf.2006.023>
- Orduz Díaz, Y. (2015). *Uso de la fluoresceína como pigmento fotosintético auxiliar en el cultivo de microalgas de la especie Chlorella vulgaris*.
- Ota, S., Oshima, K., Yamazaki, T., Kim, S., Yu, Z., Yoshihara, M., ... Hattori, M. (2016). Biotechnology for Biofuels Highly efficient lipid production in the green alga *Parachlorella kessleri* : draft genome and transcriptome endorsed by whole - cell 3D ultrastructure. *Biotechnology for Biofuels*, 9, 1–10. <http://doi.org/10.1186/s13068-016-0424-2>
- Pan, C. M., & Fan, Y. T. (2008). Statistical optimization of process parameters on biohydrogen production from glucose by *Clostridium* sp . Fanp2. *Bioresource Technology*, 99, 3146–3154.
- Pan, P., Hu, C., Yang, W., Li, Y., Dong, L., Zhu, L., ... Fan, Y. (2010). The direct pyrolysis and catalytic pyrolysis of *Nannochloropsis* sp. residue for renewable bio-oils. *Bioresource Technology*, 101(12), 4593–4599.
- Paniagua-Michel, J. (2015). Bioremediation with Microalgae : Toward Sustainable Production of Biofuels. In *Handbook of Marine Microalgae* (pp. 471–481). Elsevier Inc. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00031-5>
- Perez-garcia, O., Escalante, F. M. E., Luz, E., & Bashan, Y. (2010). Heterotrophic cultures of microalgae : Metabolism and potential products. *Water Research*, 45(1), 11–36. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.037>
- Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., & Bux, F. (2012). Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, 103, 1–24.
- Ribeiro, L. a., da Silva, P. P., Mata, T. M., & Martins, A. a. (2015). Prospects of using microalgae for biofuels production: Results of a Delphi study. *Renewable Energy*, 75, 799–804. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.065>
- Roy, S., Kumar, K., Ghosh, S., & Das, D. (2014). Thermophilic biohydrogen production using pre-treated algal biomass as substrate. *Biomass and Bioenergy*, 61, 157–166. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.006>
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.-Y., & Vaca-Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 265–278. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>

- Salema, A. A., & Ani, F. N. (2012). Microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell biomass using an overhead stirrer. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 96, 162–172. <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.018>
- Sánchez, E. (2012). *Desarrollo de un proceso para el aprovechamiento integral de microalgas para la obtención de biocombustibles*. Universidad Industrial de Santander.
- Scaife, M. a., Merckx-Jacques, A., Woodhall, D. L., & Armenta, R. E. (2015). Algal biofuels in Canada: Status and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 620–642. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.024>
- Silveira, M., Gonçalves, F., Andrade, R., & Souza, Z. De. (2014). The scientometric research on macroalgal biomass as a source of biofuel feedstock. *ALGAL*, 6, 132–138. <http://doi.org/10.1016/j.algal.2014.11.001>
- Singh, S. K., Bansal, A., Jha, M. K., & Jain, R. (2013). Production of biodiesel from wastewater grown *Chlorella minutissima*. *Indian Journal of Chemical Technology*, 20, 341–345.
- Skonieczny, M. T., & Yargeau, V. (2009). Biohydrogen production from wastewater by *Clostridium beijerinckii* : Effect of pH and substrate concentration. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3288–3294. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.01.044>
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96.
- Suali, E., & Sarbatly, R. (2012). Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4316–4342. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.047>
- Suganya, T., Kasirajan, R., & Renganathan, S. (2014). Ultrasound-enhanced rapid in situ transesterification of marine macroalgae *Enteromorpha compressa* for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 156, 283–290.
- Surendhiran, D., & Vijay, M. (2012). Microalgal Biodiesel - A Comprehensive Review on the Potential and Alternative Biofuel. *Journal of Chemical Sciences*, 2(11), 71–82.
- Sydney, E. B., Sturm, W., de Carvalho, J. C., Thomaz-Soccol, V., Larroche, C., Pandey, A., & Soccol, C. R. (2010). Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresource Technology*, 101(15), 5892–5896.
- Tabatabaei, M., Sulaiman, A., Nikbakht, A., Yusof, N., & Najafpour, G. (2011). Influential Parameters on Biomethane Generation in Anaerobic Wastewater Treatment Plants. In M. ;anzanera (Ed.), *Alternative Fuel* (pp. 227–263). InTech.
- Tabernero, A., Martín del Valle, E. M., & Galán, M. a. (2012). Evaluating the industrial potential of biodiesel from a microalgae heterotrophic culture: Scale-up and economics. *Biochemical Engineering Journal*, 63, 104–115. <http://doi.org/10.1016/j.bej.2011.11.006>

- Tanaka, T., Muto, M., Liang, Y., Yoshino, T., & Matsunaga, T. (2015). Marine Microalgae. In S.-K. Kim (Ed.), *Handbook of Marine Microalgae Biotechnology* (pp. 51–63). Springer. http://doi.org/10.2115/fiber.46.7_P280
- Tiempo, E. (2016, May 24). Reservas de crudo están en el nivel de hace 5 años, p. 1.
- Ugwu, C. U., Aoyagi, H., & Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*, 99(10), 4021–4028. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.046>
- Valverde, F., Romero-Campero, F. J., León, R., Guerrero, M. G., & Serrano, A. (2016). New challenges in microalgae biotechnology. *European Journal of Protistology*.
- Vitova, M., Bisova, K., Kawano, S., & Zachleder, V. (2014). Accumulation of energy reserves in algae: From cell cycles to biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, 33(6), 1204–1218. <http://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.04.012>
- Wang, K., Brown, R. C., Homsy, S., Martinez, L., & Sidhu, S. S. (2013). Fast pyrolysis of microalgae remnants in a fluidized bed reactor for bio-oil and biochar production. *Bioresource Technology*, 127, 494–499.
- Wang, L., Li, Y., Sommerfeld, M., & Hu, Q. (2013). A flexible culture process for production of the green microalga *Scenedesmus dimorphus* rich in protein, carbohydrate or lipid. *Bioresource Technology*, 129, 289–295.
- Weiland, P. (2010). Biogas production : current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849–860. <http://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>
- Xiong, W., Li, X., Xiang, J., & Wu, Q. (2008). High-density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 78, 29–36. <http://doi.org/10.1007/s00253-007-1285-1>
- Xu, H., Miao, X., & Wu, Q. (2006). High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology*, 126, 499–507. <http://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2006.05.002>
- Yoo, G., Park, M. S., & Yang, J. W. (2015). Chemical Pretreatment of Algal Biomass. In A. Pandey, S. Negi, P. Binod, & C. Larroche (Eds.), *Pretreatment of Biomass: Processes and Technologies* (pp. 227–258). Elsevier B.V.