



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Análisis de la sostenibilidad de la cadena productiva de biodiesel en el departamento del Meta**

## **Sustainability Analysis of the biodiesel production chain in the department of Meta**

**Andrés Felipe Plaza Sánchez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales  
Bogotá, Colombia

2016



# **Análisis de la sostenibilidad de la cadena productiva de biodiesel en el departamento del Meta**

**Andrés Felipe Plaza Sánchez**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Medio Ambiente y Desarrollo**

Director (a):

Doctora Carmenza Castiblanco Rozo

Línea de Investigación:

Economía, Ambiente y Desarrollo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Económicas, Instituto de Estudios Ambientales

Bogotá, Colombia

2016

*El futuro corre a toda velocidad hacía nosotros;  
estamos en una carrera para encontrarnos.*

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia por brindarme el espacio para aprender y crecer como persona, rodeado de un mar de conocimiento del cual pude extraer algunas gotas.

A la Facultad de Ciencias Económicas y al Instituto de Estudios Ambientales por su entrega en la construcción de un programa de posgrado en Medio Ambiente y Desarrollo que aporta y comprende las necesidades del país.

.

A mi directora Carmenza Castiblanco por su paciencia y entrega hacía el deber de enseñar y guiar, y sobre todo por la calidad de persona que fue a lo largo de mi viaje en esta travesía educativa.

A mis compañeros y amigos de la maestría, los cuales me mostraron la cantidad de esfuerzos que se realizan para mejorar el país desde todas las disciplinas y me motivaron a trabajar por hacer de este un país mejor.

A mis padres y familiares, por el apoyo brindado estos años; la motivación brindada fue mi combustible principal.

A Diana, por haber estado siempre conmigo.

## Resumen

En este documento se propone un índice multidimensional para evaluar el nivel de sostenibilidad de la cadena de producción de biodiesel en el departamento del Meta. En función de esto se expone el contexto productivo del sector palmero y de biodiesel bajando desde la escala mundial hasta la departamental, se caracteriza la producción de aceite de palma y de biodiesel con el fin de alimentar el análisis de ciclo de vida que genera los indicadores ambientales de potencial de calentamiento global (IPCC) y demanda acumulada de energía (DEA). Para la construcción del índice de sostenibilidad del biodiesel en el Meta (ISBM) se utilizan tres dimensiones: ambiental, social y económica, jerarquizando los pesos dentro de la ecuación según resultados de la metodología AHP y se obtienen los índices base a partir de una selección preliminar. Los resultados de la dimensión ambiental muestran una mejora respecto a otros trabajos en IPCC, al tener un valor global en promedio de  $-0,9 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$  biodiesel y una DAE de  $15,5 \text{ MJ/kg}$  biodiesel. Se calcula un ISBM de referencia y se propone un sistema de niveles de sostenibilidad que permiten comparar los resultados obtenidos a nivel municipal, encontrándose que ningún municipio es sostenible de manera integral, aunque los municipios con mejor tecnología y ubicación geográfica se encuentran en una transición sostenible interesante, por otro lado, se encuentra que el municipio de Mapiripán es insostenible bajo las condiciones de referencia de este trabajo, lo que significa que no es viable el uso de aceite de palma proveniente de ese municipio para biodiesel, ni la siembra de palma de aceite.

**Palabras clave:** Sostenibilidad, biodiesel, palma de aceite, Índice multidimensional, Análisis de ciclo de vida.

## Abstract

This paper proposes a multidimensional index to measure the level of sustainability of the biodiesel production chain in the state of Meta. Based on this, it shows the productive context of the palm and biodiesel sector going down from the world scale to the department scale and the production of palm oil and biodiesel is characterized in order to feed the life cycle analysis of the Environmental Indicators of Global Warming Potential (IPCC) and Cumulative Energy Demand (DEA). For the construction of the biodiesel sustainability index in the Meta (ISBM), three dimensions are used: environmental, social and economic, hierarchizing the weights within the equation according to the results of the AHP methodology and obtaining the base indicators from a preliminary selection. The results of the environmental dimension show an improvement over other works in terms of IPCC, having an average global value of  $-0.9 \text{ kgCO}_2\text{eq} / \text{kg biodiesel}$  and a DAE of  $15.5 \text{ MJ} / \text{kg biodiesel}$ . The reference ISBM is calculated and a system of levels of sustainability is proposed that allow to compare the results obtained at municipal level, finding that no municipality is sustainable in an integral way, although the municipalities with better technology and geographical location are in an interesting sustainable conversion. Besides, it is found that the municipality of Mapiripán is unsustainable under the reference conditions of this work, which means the use of palm oil it is not viable for a biodiesel production, nor the sowing of palm oil itself.

**Keywords:** Sustainability, biodiesel, palm oil, multidimensional indexes, life cycle assessment.

# Contenido

<b>1. Capítulo 1: Contexto internacional y colombiano del biodiesel .....</b>	<b>15</b>
1.1 Los biocombustible y su ascenso.....	15
1.2 El biodiesel en el mundo .....	18
1.2.1 Principales países productores.....	19
1.2.2 La demanda del biodiesel y sus conflictos.....	22
1.2.3 Tecnologías para la producción del biodiesel .....	25
1.3 Biodiesel en Colombia .....	27
<b>2. Capítulo 2: Antecedentes y estado del arte .....</b>	<b>31</b>
2.1 Análisis de ciclo de vida .....	32
2.1.1 ACV en el biodiesel .....	33
2.2 Sostenibilidad: relacionando lo físico con lo socioeconómico.....	35
2.2.1 Sostenibilidad energética .....	36
2.2.2 Dimensión social y económica de la sostenibilidad .....	38
2.2.3 Indicadores compuestos e índices de sostenibilidad .....	38
<b>3. Capítulo 3: El contexto del biodiesel en el departamento del Meta .....</b>	<b>41</b>
3.1 Contexto socioeconómico .....	41
3.2 Uso de la tierra .....	44
3.3 Palma de aceite en el departamento.....	44
3.4 Procesamiento de la palma de aceite .....	47
3.4.1 Etapa de cultivo y cosecha.....	48
3.4.2 Extracción del aceite de palma.....	51
3.5 Producción de biodiesel.....	53
<b>4. Capítulo 4: Metodología para la sostenibilidad del biodiesel .....</b>	<b>57</b>
4.1 Marco metodológico.....	57
4.2 Indicadores base.....	62
4.3 Análisis de ciclo de vida .....	65
4.3.1 Alcance y objetivos.....	66
4.3.2 Análisis de inventario.....	67
<b>5. Capítulo 5: Resultados y análisis .....</b>	<b>71</b>
5.1 Análisis del componente energético/ambiental .....	71
5.2 Construcción del índice de sostenibilidad del biodiesel en el Meta .....	74
5.2.1 Compilación de indicadores socioeconómicos .....	74
5.2.2 Agregación de indicadores .....	76
5.2.3 Punto de referencia del ISBM.....	78
5.2.4 ISBM por municipio .....	79
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>87</b>
Anexo 1: Resumen de revisión de literatura para biodiesel. ....	87
Anexo 2: Teoría sobre métodos de normalización, jerarquización y agregación.....	89
<b>Bibliografía .....</b>	<b>95</b>



## Lista de figuras

<b>Figura 1-1:</b> Histórico de precios de petróleo desde 1861 hasta 2010. 1861-1944.....	17
<b>Figura 1-2:</b> Producción mundial y colombiana de biocombustibles entre 2004-2013. ....	18
<b>Figura 1-3:</b> Producción mundial de biodiesel desagregado por materia prima del aceite entre 2008 y 2014. ....	20
<b>Figura 1-4:</b> Principales productores de Biodiesel basados en aceite de palma entre 2008 y 2014. ....	21
Figura 1-5: Consumo de Biodiesel a nivel mundial entre los años 2000 y 2012.....	22
<b>Figura 1-6:</b> Demanda de los principales consumidores de Biodiesel Europeos entre 2012 y 2013. ....	24
<b>Figura 1-7:</b> Área cultivada de palma africana en hectáreas vs Producción de aceite de palma en el periodo de 1967 a 2000 en Colombia.....	28
<b>Figura 1-8:</b> Área cultivada de palma africana en hectáreas vs Producción de aceite de palma en el periodo de 2001 a 2013 en Colombia.....	28
<b>Figura 3-1:</b> Comportamiento de los principales sector económicos del Departamento del Meta entre 2005 y 2013.....	42
<b>Figura 3-2:</b> Plantación de palma de aceite en el Meta con forraje fijador de nitrógeno ..	49
<b>Figura 3-3:</b> Diagrama de flujo de la extracción de aceite de palma.....	52
<b>Figura 3-4:</b> Diagrama de flujo en la planta de producción de biodiesel .....	55
<b>Figura 4-1:</b> Diagrama explicativo para la construcción del índice de sostenibilidad .....	58
<b>Figura 4-2:</b> Modelo jerárquico mediante método AHP para el desarrollo del ISBM. ....	60
<b>Figura 5-1:</b> Comparación de resultados IPCC2007 y DAE para biodiesel entre Meta, Colombia y Malasia. ....	73
<b>Figura 5-2:</b> Modelo jerárquico APH para el desarrollo del ISBM. ....	78
<b>Figura 5-3:</b> Mapa de ISBM municipales según su nivel de sostenibilidad .....	82

## Lista de tablas

Tabla 1-1: Producción mundial de biodiesel en millones de toneladas. ....	21
<b>Tabla 1-2:</b> Consumo de biodiesel por región entre los años 2009 y 2012. ....	23
<b>Tabla 1-3:</b> Producción de Biodiesel y productividad del área en producción desde 2008 hasta 2014. ....	29
<b>Tabla 3-1:</b> NBI en principales municipios palmeros y petroleros en el Meta para el año 2005. ....	43
<b>Tabla 3-2:</b> Indicador GINI_T para principales municipios palmeros en 2009. ....	43
<b>Tabla 3-3:</b> Empresas extractoras de aceite de palma según su capacidad de procesamiento .....	45
<b>Tabla 3-4:</b> Cantidad de fertilizantes y pesticidas por kg de RFF en cultivos de la zona oriental. ....	50
<b>Tabla 3-5:</b> Plantas productoras de Biodiesel en operación en Colombia. ....	54
<b>Tabla 4-1:</b> Resumen del periodo de estudio y fuente de los indicadores base. ....	65
<b>Tabla 4-2:</b> Datos de inventario para la extracción de aceite de palma. ....	67
<b>Tabla 4-3:</b> Resumen de flujos másicos y energéticos para la producción de una tonelada de biodiesel. ....	68
<b>Tabla 4-4:</b> Resumen de emisiones de CO <sub>2</sub> del transporte de aceite y biodiesel por municipio. ....	69
<b>Tabla 4-5:</b> Balance de carbono en cambio del uso de la tierra en la región oriental en toneladas de carbono por hectárea. ....	70
<b>Tabla 5-1:</b> Resultados de IPCC2007 para los principales municipios palmeros del Meta. ....	71
<b>Tabla 5-2:</b> Resultados DAE para los principales municipios palmeros del Meta. ....	72
<b>Tabla 5-3:</b> Información socioeconómica de los principales municipios palmeros del Departamento del Meta entre el año 1993 y 2009. ....	75
<b>Tabla 5-4:</b> Pesos para las dimensiones de la sostenibilidad del sector agrícola. ....	77
<b>Tabla 5-5:</b> Indicadores base e ISBM los principales municipios palmeros del Departamento del Meta. ....	80

## Introducción

El crecimiento de la agroindustria palmera y de la producción de biodiesel, no viene asociado solamente a una serie de impactos de tipo físico-biótico, sino que también es un vector importante de cambio en las dinámicas socioeconómicas propias de una región. La repercusión de este sector productivo en un departamento como el Meta, el cual posee contradicciones de complejas en todo nivel, configura un motivo importante para analizar la relación de la cadena de producción de biodiesel con el contexto social y económico de algunos de sus municipios bajo el concepto de sostenibilidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, se pretende abordar la relación de las dimensiones de la sostenibilidad con la situación particular de un sector productivo y los municipios donde se lleva a cabo esta actividad a través de la creación de un índice, con el fin de tener una referencia futura que permita tomar decisiones sobre el crecimiento del sector productivo en el departamento o que le permita a las empresas palmeras redireccionar sus esfuerzos bajo un marco de sostenibilidad.

Atendiendo a la alternativa planteada, durante el trabajo se sigue un proceso de creación del índice de sostenibilidad a partir de la suma ponderada de sus dimensiones, las cuales se jerarquizan con ayuda de algunos resultados de metodología AHP en el sector agrícola y a su vez están constituidas por un par de indicadores base que aportan su grano de arena a la explicación del concepto en el contexto específico que se quiere estudiar, con el objetivo principal de analizar la sostenibilidad de la cadena productiva del biodiesel en los municipios palmeros del departamento. Para llevar a cabo este objetivo, el documento se divide en 5 capítulos y una sección de conclusiones, que abordan el contexto histórico de crecimiento del biodiesel y la palma de aceite y van hasta los cálculos de los diferentes indicadores que componen al índice.

En el primer capítulo, se hace una revisión al contexto internacional y nacional del biodiesel, comenzando por explicar los motivos por los cuales se dio el ascenso de éste tipo de combustible, mostrando luego los principales países productores y consumidores de biodiesel, una pequeña referencia a los debates que ha abierto su utilización en escenarios académicos e institucionales, la clasificación que se le da a la tecnología empleada y se termina con la información concerniente a Colombia en términos de evolución del cultivo de palma de aceite y producción de biodiesel.

La segunda parte de este trabajo, trata los antecedentes y el estado del arte respecto al abordaje del tema de la sostenibilidad, explicando temas como el análisis de ciclo de vida (ACV) y los trabajos realizados en el sector agroindustrial, la conceptualización inicial y evolución del concepto de sostenibilidad y la relación de las dimensiones ambiental, social y económica bajo el nombre este nombre.

El tercer capítulo, termina con la parte de contextualización concerniente a este trabajo, mostrando el contexto socioeconómico del biodiesel en el departamento del Meta a partir de información oficial como el índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI), los principales renglones productivos y la disparidad entre la situación social y económica de las cabeceras y las zonas rurales. Muestra además un rápido resumen de los cambios de uso de la tierra asociados a la palma de aceite y explica finalmente los procedimientos usados durante la etapa de cultivo de la palma, extracción del aceite y durante la etapa de producción del biodiesel.

El índice de sostenibilidad propuesto se comienza a trabajar en el capítulo 4, donde se explica la forma en la que se va a construir este índice y los métodos usados para la jerarquización y agregación de la información necesaria. Se listan los indicadores bases y las fuentes de las cuales provienen, explicando con un énfasis particular los indicadores de tipo ambiental, los cuales son el potencial de calentamiento global calculado mediante el IPCC2007 y la demanda de energía acumulada (DAE), dado que éstos provendrán del ACV y serán calculados para cada municipio palmero tenido en cuenta.

En el quinto y último capítulo, se muestran los resultados de los cálculos del ACV y se comparan con otros resultados reportados en la literatura científica, luego se procede a presentar la información de los indicadores sociales y económicos, analizando bajo qué

supuestos serán utilizados. Se sigue con la definición de las condiciones de referencia del índice y su posterior cálculo a escala municipal, seguido de un análisis sobre la sostenibilidad, basados en una serie de niveles propuestos en este trabajo y que se pueden observar de manera gráfica en el Mapa de sostenibilidad construido al final de capítulo.

El trabajo termina con la presentación de unas conclusiones globales que cubren los temas de contexto, cálculo y análisis del índice de sostenibilidad, mostrando al lector las limitaciones del presente trabajo, los supuestos asumidos a lo largo de éste, los aportes que se dan a los diferentes actores interesados a partir de los resultados obtenidos y se puntualiza las áreas de estudio que faltan por cubrir o mejorar.



# 1. Capítulo 1: Contexto internacional y colombiano del biodiesel

## 1.1 Los biocombustible y su ascenso

El uso de biocombustibles como alternativa energética para el sector transporte es un tema gran importancia en la actualidad, debido a que no son claros los beneficios de su utilización y los impactos ambientales generados. En realidad, los biocombustibles no son una invención reciente, puesto que se vienen usando desde finales del siglo XIX como carburante en los primeros motores de combustión interna (Gasca V. & Salinas E., 2009). Rudolf Diesel los utilizó en sus primeros modelos de motores para automóviles y dijo que en un futuro los aceites vegetales podrían ser tan importantes como el carbón o los productos del petróleo lo eran en ese momento. Henry Ford, por su parte, asegura al New York Times que el etanol sería el combustible del futuro (Texo J., Betancur C., & Duque J., 2009), lo que actualmente no está lejos de ser cierto en algunas partes del mundo. En la Segunda Guerra Mundial algunos países europeos dieron uso a la mezcla etanol/gasolina con el fin de alargar sus reservas de combustible, aunque con los bajos precios del petróleo luego de terminada la guerra se dejó de utilizar dicha mezcla (Álvarez C., 2009).

El auge del petróleo terminaría por relegar a los biocombustibles de la matriz energética mundial por un periodo de tiempo considerable, hasta que diversas situaciones como la inestabilidad de los países productores, los altos precios del crudo o la creciente preocupación ambiental (resultado de los altos niveles de contaminación y generación de gases de efecto invernadero), crearon una atmosfera propicia para su regreso el escenario mundial. La crisis del petróleo de 1973<sup>1</sup>, hizo que los precios mundiales del petróleo aumentaran drásticamente, dado que la oferta había bajado sustancialmente con repercusiones económicas importantes tanto en las potencias mundiales como en los países que dependían de ellos para la importación de gasolina (Center for Culture, History, and Environment, 2010). Ante el panorama mundial y la afectación directa, en el

---

<sup>1</sup> La crisis del petróleo del 73 inicia cuando la OPAEC (Países árabes miembros de la OPEC más Egipto y Siria) proclaman un embargo al petróleo contra Japón, Reino Unido, Países Bajos y Estados Unidos., aumentando el precio del crudo drásticamente (CHE, 2010).

año de 1975 Brasil inicia el ambicioso programa de sustitución energética PROÁLCOOL, con el objetivo de reemplazar parcialmente el uso de hidrocarburos fósiles. Este programa es el primer precedente del uso de biocombustibles a gran escala al producir en su etapa de pleno funcionamiento unos 10 billones de litros anuales de alcohol hidratado en más de 3.000 nuevas refinerías, con la participación activa del sector privado, los pequeños agricultores y el estado brasileño (Márquez L. & Shlosser J., 1995).

La segunda gran crisis del petróleo, en 1979, fue otra de las situaciones que tuvo incidencia directa en el aumento precio del petróleo a nivel internacional y ayudó a que los biocombustibles fuesen tenidos en cuenta por diversos países como alternativa a la baja oferta de crudo y sus altos precios (Sánchez E., 2010). En esta ocasión la producción bajó de 66.050 miles de barriles diarios en 1979 a 56.599 miles de barriles diarios en 1983, lo que aumentó también los precios del crudo, impulsando programas de mezcla etanol/gasolina como Alconafta en Argentina e incentivos al uso de biomasa para producción de biocombustibles en Estados Unidos, este último con motivos de salvaguardar la “seguridad energética” del país (Zerbe J., 1988).

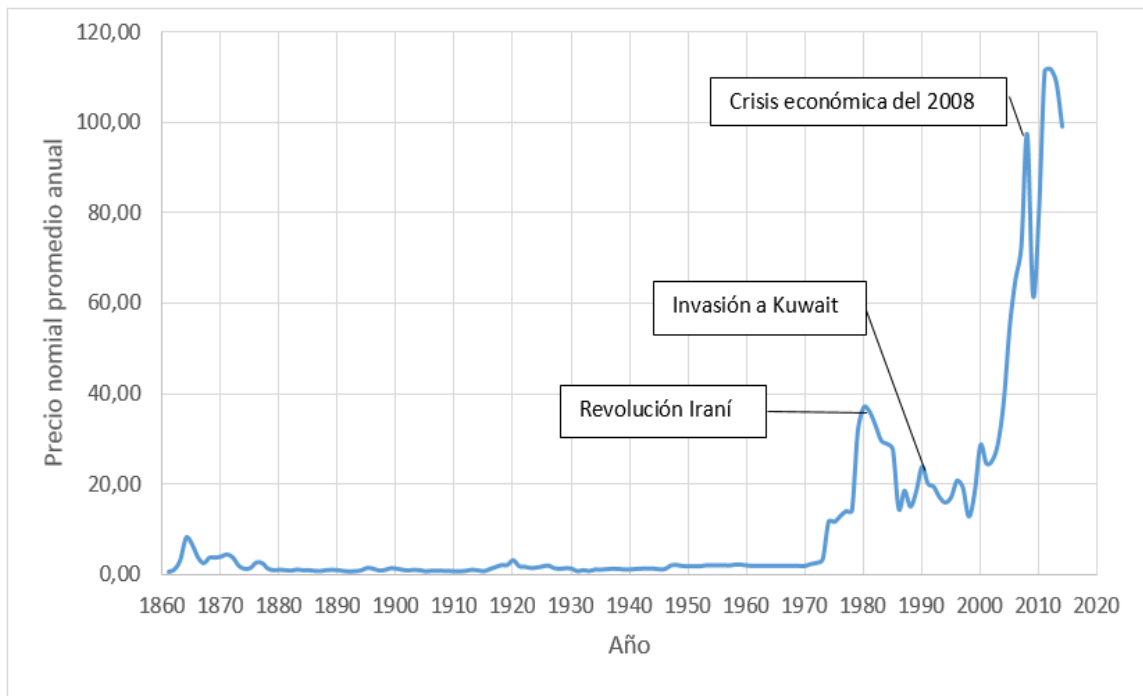
La guerra del golfo también influiría en el aumento de los precios y disponibilidad del petróleo a nivel mundial. Esta situación, sumado al desarrollo tecnológico sobre biodiesel y los acuerdos firmados en la conferencia de Rio de Janeiro en 1992, fueron algunas de las razones por las cuales, en algunos países europeos como Alemania, Francia, República Checa y Suecia, se abrieron plantas productoras de biodiesel y se comenzó a legislar sobre la mezcla de diésel y biodiesel (Rehman K., Jawaid M., & Alothman O., 2015). En Colombia, se comenzó a hablar sobre biocombustibles a nivel de política pública con la Ley 693 de 2001 (Garzón S., 2009), cuyo propósito es mitigar los efectos sobre el ambiente al utilizar oxigenantes en la gasolina en centros urbanos con más de 500.000 habitantes y se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo. Dicha Ley y la política de biocombustibles que en años siguientes aplicó el gobierno colombiano, produjeron una creciente demanda de etanol carburante y diésel de palma que rápidamente empezaron a ser suplidas por los respectivos gremios productores.

El último gran repunte en los precios del petróleo, que a su vez fue uno de los motivos para promover los biocombustibles en Colombia, se dio en 2008. La crisis económica mundial golpea de manera significativa la economía colombiana y a los países en vía de



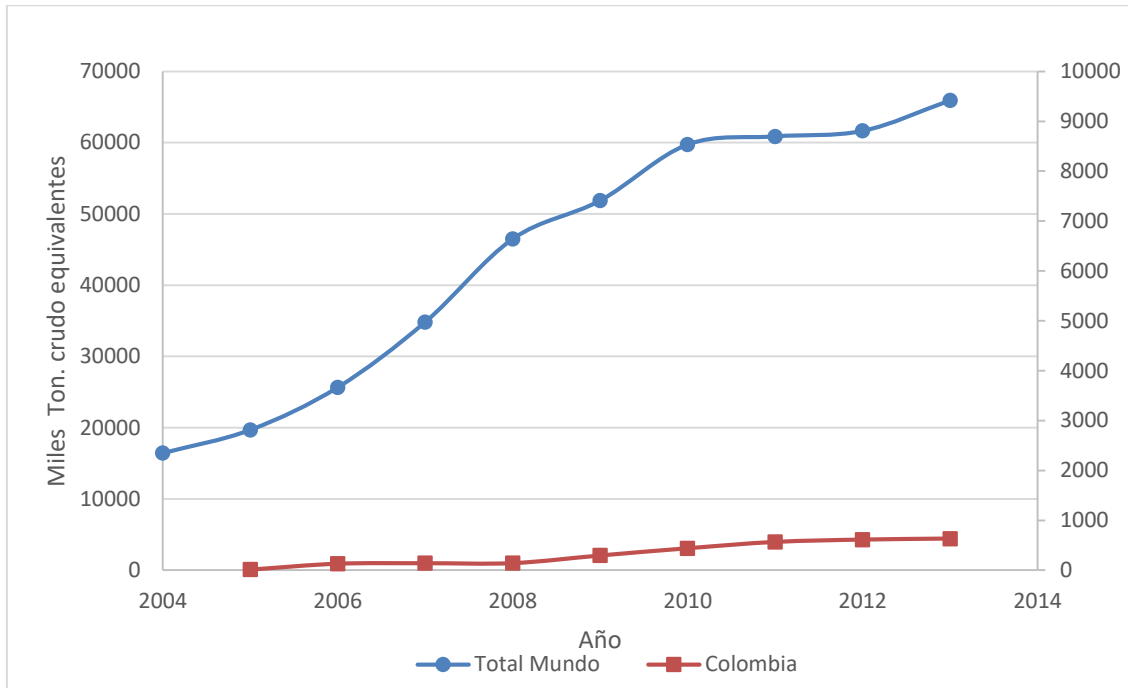
desarrollo en general; en ese momento por motivos especulativos y dado que se veía al petróleo como un activo financiero estable a futuro, se alcanza un precio de crudo de hasta 147 USD/barril en el mes de julio de 2008, bajando significativamente el valor para el mes de diciembre a unos 40 USD/barril (Sánchez E., 2010). La Figura 1.1 muestra el precio histórico del barril de crudo desde 1861 hasta 2010, mostrando la relación de aumento de precios con situaciones de desequilibrio mundial.

**Figura 1-1:** Histórico de precios de petróleo desde 1861 hasta 2010. 1861-1944.



Fuente: Elaboración propia, datos de BP. (BP, 2015)

La Figura 1.2 muestra el aumento en la producción mundial de biocombustibles desde 2004 a 2013, resaltándose a la vez el aumento en la producción colombiana en el eje derecho; en ésta figura se puede observar un aumento apresurado de 4,5 veces la producción de biocombustibles en el periodo comprendido entre 2008 hasta el 2013 para las cifras colombianas y de 1,4 para el resto del mundo.

**Figura 1-2:** Producción mundial y colombiana de biocombustibles entre 2004-2013.

Fuente: Modificado (BP, 2015), Eje izquierdo producción Mundial, Eje derecho producción Colombiana.

## 1.2 El biodiesel en el mundo

La mezcla del biodiesel con diésel convencional es actualmente una de las apuestas de algunos países para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y de otros contaminantes que genera el diésel durante la combustión. La American Society for Testing and Materials (ASTM) define al biodiesel como un “combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, designado como B100”(ASTM, 2012) y se obtiene a partir de una alta variedad de materias primas. Actualmente la principal materia prima para la producción de biodiesel (de primera generación) es el aceite vegetal, que puede provenir de la soja, colza, palma, entre otros (Luque, R. & Melero, J. A., 2012).

La tecnología empleada en la producción de biodiesel depende de la fuente de la cual se extraigan los aceites, por lo que existen tres generaciones tecnológicas en el proceso productivo, cada uno diferente de la anterior y cada vez más tecnificado. Se habla

actualmente de 3 generaciones de biocombustibles, de las cuales la primera generación de estos es la más usada y la que representa un mayor aporte a la oferta mundial con 50 mil millones de litros anuales para 2010 (Naik, S. N., 2010).

Esta primera generación hace referencia al biodiesel obtenido a partir de los aceites vegetales extraídos de los cultivos de palma africana, colza, soya, entre otros, producidos en países con un nivel técnico bajo o mediano y tienen como principal inconveniente que utilizan materias primas que son usadas para alimentos, lo que ha aumentado el precio de los últimos (Laursen, W., 2006). La segunda generación se refiere principalmente a biocombustibles producidos a partir de materiales lignocelulósicos como el pasto o los residuos agrícolas, que no compiten con los alimentos pero cuya explotación económica aún no es generalizada por alguna barreras de tipo tecnológico que no lo hacen viable costo-efectivamente (Eisberg, N., 2006) y la tercera generación de biodiesel hace referencia a los procedimientos en desarrollo para su producción a partir de algas, con lo cual se pretende resolver los inconvenientes de las otras generaciones, presentando rendimientos muy superiores a los tradicionales (Dragone, G., 2010).

### **1.2.1 Principales países productores**

Las nuevas dinámicas de mercado producidas a partir de la inserción de lo ambiental en las políticas públicas nacionales a nivel global han ocasionado una nueva gama de productos derivados de materias primas alimenticias de tipo commodity (como los aceites vegetales) para uso combustible, como lo son el bioetanol y el biodiesel. Éste último es obtenido principalmente a partir de los aceites refinados de diferentes materias primas, lo que determina puntualmente el rendimiento del cultivo, la calidad, y las problemáticas que trae consigo a la región en la cual se produce. En la Figura 1.3 se muestra la producción mundial de biodiesel entre el año 2008 y 2014<sup>2</sup>, desagregado por la materia prima del aceite utilizado en el proceso de refinación. En ella se muestra un claro el aumento sostenido en la producción de biodiesel a nivel mundial, principalmente a partir de 3 materias primas que son: la palma de aceite, la soja y la colza.

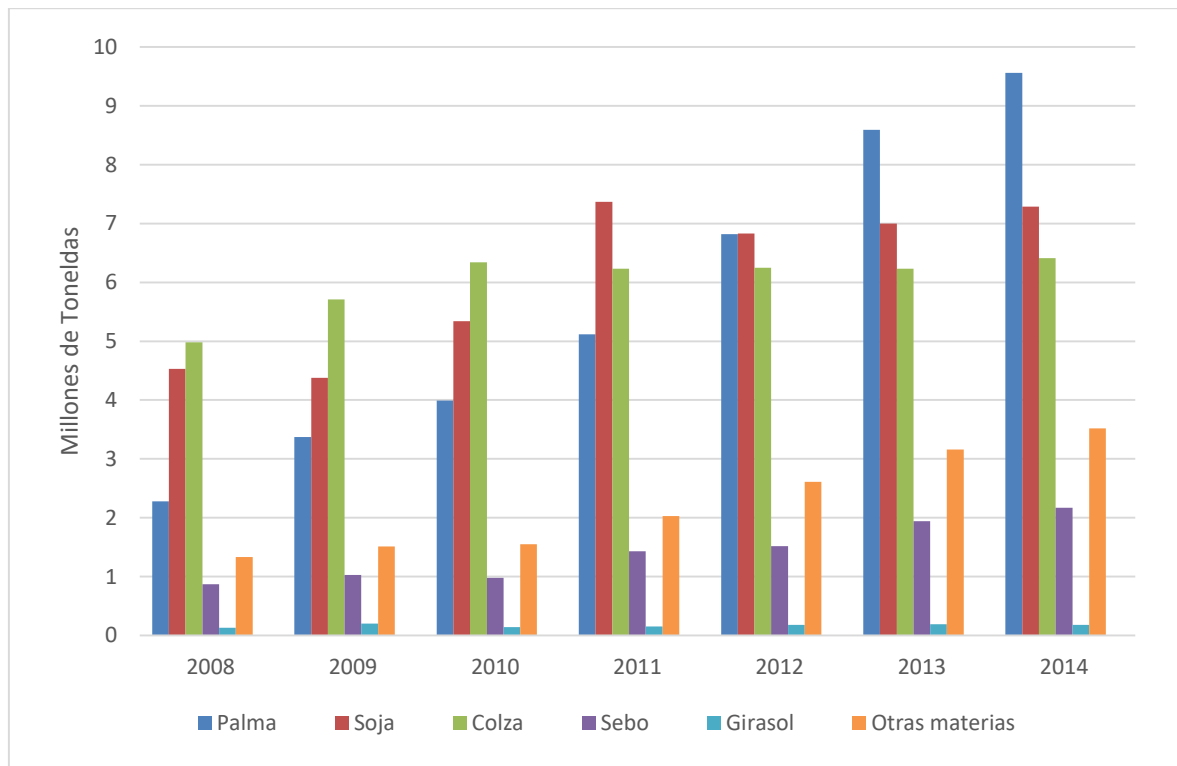
---

<sup>2</sup> El dato del 2014 es estimado, tomado del documento Oil World Statistic Update del año 2014.

Estos aceites son obtenidos de la Palma de aceite (*Elaeis guineensis*), La planta de Colza (*Brassica napus*) y la planta de Soja (*Glycine max*), ubicados en diferentes partes del mundo dependiendo de las características adaptativas de la planta. Esta es una de las razones por las cuales la producción mundial de biodiesel se distribuye en diferentes latitudes del planeta, especializándose cada país en un tipo de cultivo diferente; en la Tabla 1.1 se pueden observar los principales productores de biodiesel a nivel mundial.

Colombia representa el 1,85% de la oferta mundial de biodiesel para el año de 2014, lo que lo ubica entre los principales productores a base de aceite de palma, y aunque la fracción respecto a la producción mundial es pequeña, los conflictos asociados a este producto son variados e importantes de analizar para nuestro contexto particular.

**Figura 1-3:** Producción mundial de biodiesel desagregado por materia prima del aceite entre 2008 y 2014.



Fuente: Oil World (2014)

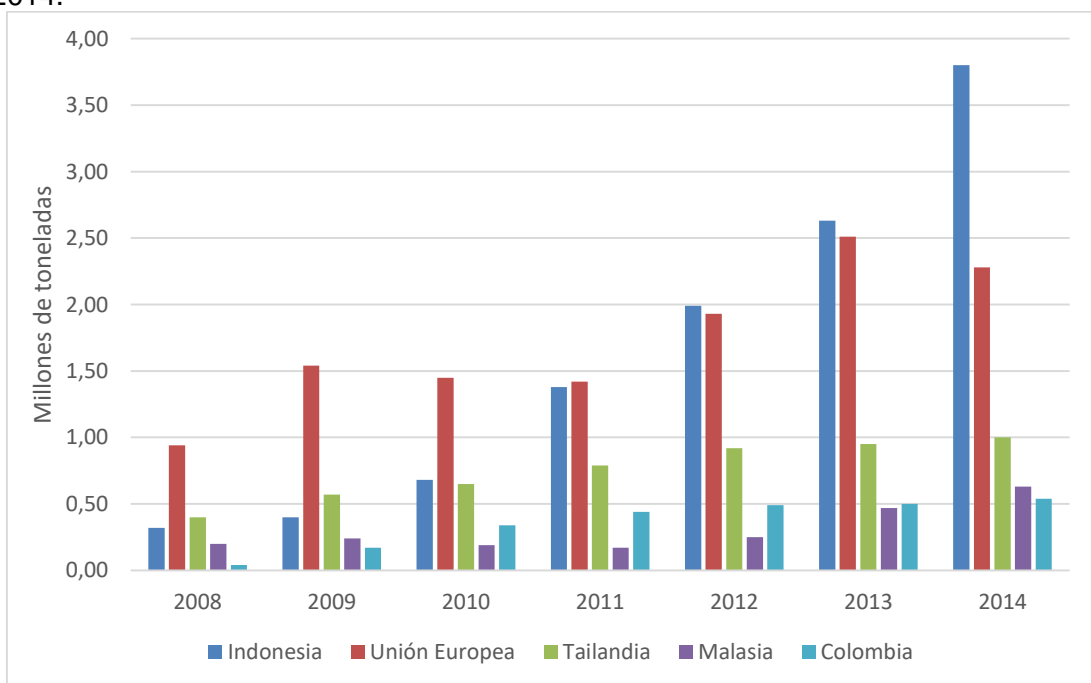
Tabla 1-1: Producción mundial de biodiesel en millones de toneladas.

País	2010	2011	2012	2013	2014
Total mundial	18,37	22,31	24,19	27,06	29,12
USA	1,14	3,22	3,30	4,53	4,30
Indonesia	0,68	1,38	1,99	2,63	3,80
Brasil	2,10	2,35	2,39	2,56	3,00
Alemania	2,80	2,79	2,63	2,70	2,75
Argentina	1,82	2,43	2,46	2,00	2,05
Tailandia	0,65	0,79	0,92	0,95	1,00
Colombia	0,34	0,44	0,49	0,50	0,54

Fuente: Oil world (2014)

La Figura 1.4 muestra los principales productores de biodiesel a partir de palma africana, ubicando a Colombia como el 4° productor a nivel mundial si se descompone a la Unión Europea en sus diferentes estados y 5° considerándolo un bloque comercial único.

**Figura 1-4:** Principales productores de Biodiesel basados en aceite de palma entre 2008 y 2014.



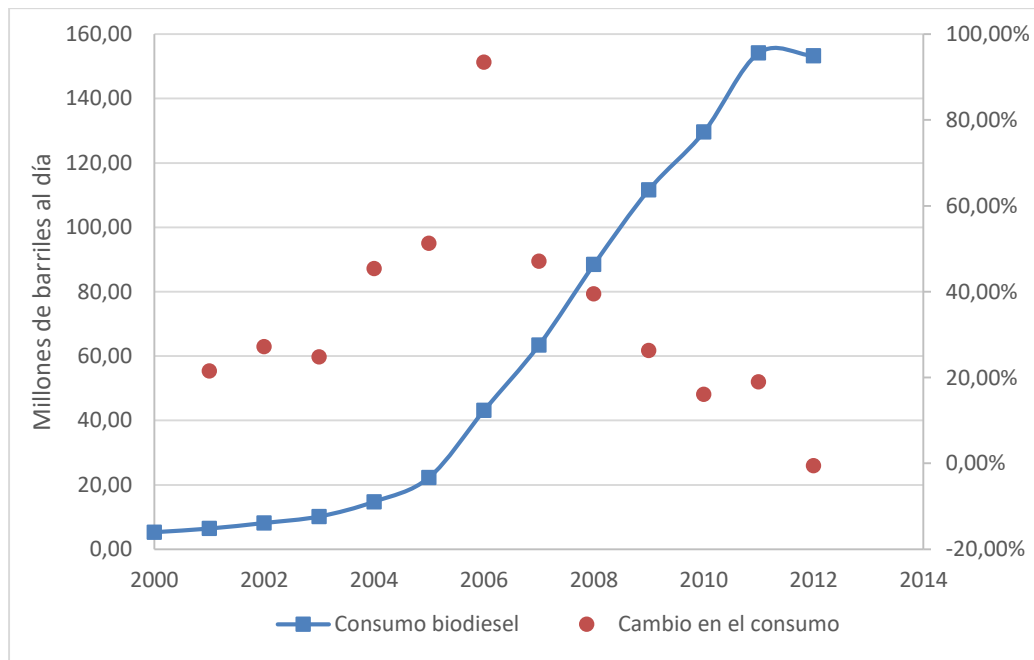
Fuente: Oil World (2014)

## 1.2.2 Demanda del biodiesel y sus conflictos

Una de las soluciones de la emisión de gases de efecto invernadero derivados del uso de combustibles fósiles en el sector transporte, que ocasionan en gran medida el cambio climático, fue la adopción de políticas de mezcla entre combustibles fósiles y biocombustibles obtenidos en su mayoría a partir de alimentos como la soya y el maíz. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2008), el aumento en la producción y consumo de biocombustibles está en función a las políticas adoptadas por los países de todo el mundo, en especial a la Unión Europea, que consume más de la mitad del biodiesel producido a nivel mundial.

En la Figura 1.5 se puede observar cómo el consumo de biodiesel aumentó significativamente a partir del año 2005 y hasta el 2011, donde por primera vez en más de 10 años disminuyó el consumo. Estas grandes variaciones en el consumo se deben en gran medida a las políticas de mezcla de biocombustibles, convirtiéndolas en un factor importante en el debate académico e institucional sobre seguridad alimentaria, eficiencia energética y sostenibilidad económica (Escobar C. et al., 2009).

Figura 1-5: Consumo de Biodiesel a nivel mundial entre los años 2000 y 2012.



Fuente: U.S. Energy Information Administration (2016).

La Tabla 1.2 muestra el consumo de biodiesel entre 2009 y 2012 desagregado por regiones, con lo cual es posible identificar a Europa como el principal consumidor y a la vez como el que menos crecimiento tiene en la demanda de biodiesel además de Medio Oriente. Es importante observar como otras regiones como Asia y Oceanía, Eurasia y en general los países del continente Americano han tenido aumentos significativos de entre el 45 %y 63% en el consumo de este producto, dado que es en estas regiones también se han generado gran parte de los conflictos asociados con la producción de aceite de palma necesario para la producción de biodiesel.

**Tabla 1-2:** Consumo de biodiesel por región entre los años 2009 y 2012.

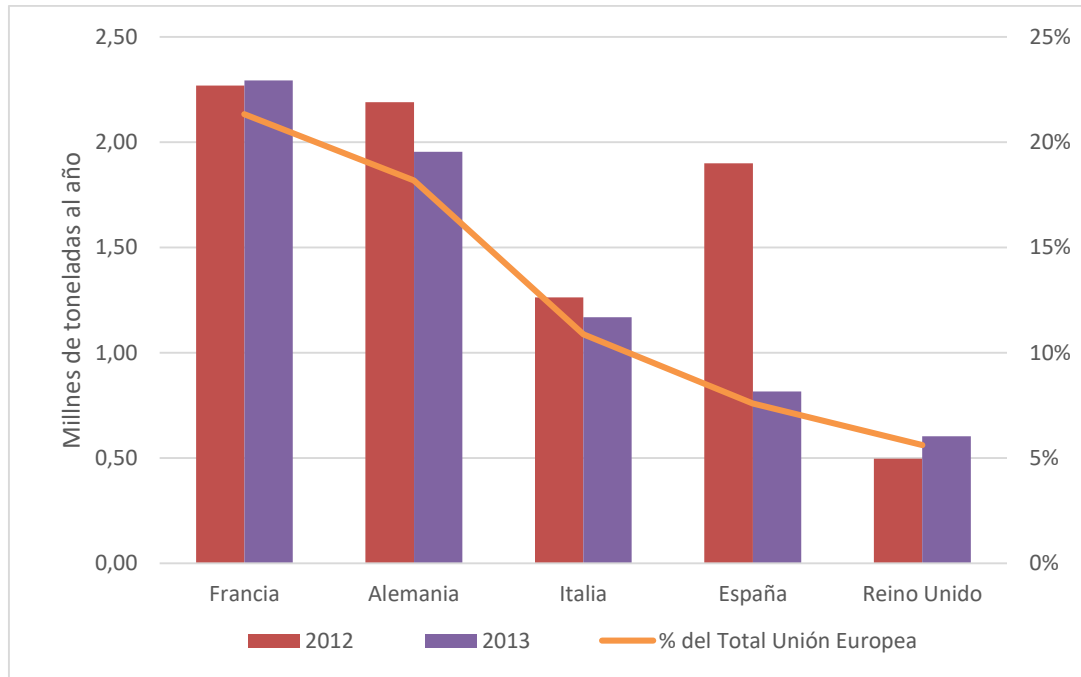
<b>Región</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>Crecimiento</b>
África	0,00	0,04	0,04	0,04	NA
Asia y Oceanía	11,68	13,87	16,43	21,17	45%
Centro y Sur américa	12,78	22,63	26,65	28,47	55%
Eurasia	0,47	0,69	0,88	0,91	48%
Europa	78,11	85,05	87,60	79,94	2%
Medio oriente	0,04	0,04	0,04	0,04	0%
Norteamérica	8,40	7,30	22,63	22,63	63%
Total mundo	111,69	129,58	154,03	153,30	27%

Fuente: U.S. Energy Information Administration (2016)

El consumo Europeo comenzó a disminuir desde 2011 como lo muestra la Figura 1.5; esto se debe en parte a una disminución en la producción interna motivada por los precios internacionales del petróleo y a las barreras de entrada para la importación de aceite crudo que no cuenta con las especificaciones ambientales y sociales que exige la Unión Europea. En la Figura 1.6 se muestra cómo ha disminuido el consumo de biodiesel en los cinco principales compradores de biodiesel en la Unión europea, lo que está relacionado con el decrecimiento en la demanda del biocombustible a nivel mundial al representar más de la mitad del mercado de compradores. Algunos autores relacionan el cultivo de las diferentes oleaginosas u otros vegetales necesarios en la producción de biodiesel con el alza de los precios de los alimentos o una posible afectación a la seguridad alimentaria

mundial, al reemplazar su uso alimenticio por un uso energético (Acosta O., 2009; Ewing M., 2009).

**Figura 1-6:** Demanda de los principales consumidores de Biodiesel Europeos entre 2012 y 2013.



Fuente: (Infinita Renovables, 2005)

El creciente uso de biocombustibles y el aumento ininterrumpido de la población humana van a chocar en un futuro próximo; se tiene calculado que para el año 2050 la demanda mundial de alimentos aumente 70% (FAO, 2009) y se pronostica que la producción de biocombustibles también aumente, lo que deja dudas sobre el camino a seguir para poder mantener la oferta alimenticia y bioenergética a nivel mundial. Msangi et al. (2007) afirman que de no haber un cambio tecnológico en la producción de biocombustibles en los próximos años, los precios de los alimentos podrían subir drásticamente, afectando sobre todo a países en desarrollo, por lo que insiste en la necesidad de desarrollar políticas que promuevan el uso del pasto y otros materiales celulósicos en la producción de biocombustibles teniendo en cuenta que tienen un mayor rendimiento y generan menos impacto ambiental negativo.

Existe preocupación por los impactos que la expansión y crecimiento acelerado de los cultivos como la palma de aceite y la soya pueden ocasionar, debido a que la afectación no es solamente de tipo biótica sino también de tipo social y económico. Algunas de las



repercusiones de la expansión de los cultivos para producir biocombustibles son la tala de aproximadamente 2,5 millones de hectáreas de bosque nativo en Argentina para la expansión del cultivo de soya en la región noreste de Argentina (Paruelo J. M., Guerschman J.P., & Verón S.R., 2005), la violencia contra sindicalistas y pobladores, desplazamiento forzado de campesinos en la zona rural del departamento del Chocó, Santander y algunos sectores del Magdalena Medio en Colombia, por parte de grupos paramilitares financiados aparentemente por los palmeros y ganaderos de la zona (Mingorance F. et al., 2004) y la tala de bosques tropicales en Indonesia, uno de los principales países productores de aceite crudo de palma y en el cual se han ocupado ilegalmente unos dos millones de hectáreas de los 5,9 millones que se han talado entre 2000 y 2008 según Koh & Ghazoul (2010).

### **1.2.3 Tecnologías para la producción del biodiesel**

Con el tiempo la forma de producir biocombustibles ha evolucionado principalmente en función de la materia prima de la cuál es extraída el aceite y de la tecnología empleada para ello. Actualmente se suele dividir a grandes rasgos dicha evolución en tres generaciones de biocombustibles: primera generación (a partir de materias primas utilizadas para alimentos), segunda generación (a partir de residuos lignocelulósicos o plantas no alimenticias) y tercera generación (a partir de algas u otras tecnologías asociadas al CO<sub>2</sub>) (Lee, R. A. & Lavoie, J. M., 2013).

- Primera generación de biocombustibles:

Es la generación de biocombustibles que más se emplea actualmente, usando materias primas que entran en conflicto con la seguridad alimentaria de los países. La producción de bioetanol se lleva a cabo a partir de la fermentación de materiales con alto contenido de azúcar, como la caña de azúcar (Utilizada principalmente en Brasil) (Lee, R. A. & Lavoie, J. M., 2013), la remolacha y el sorgo azucarero. También se produce a partir de otros materiales ricos en almidones vegetales como el maíz (En EEUU principalmente), yuca y trigo (Acevedo, A., 2013).

El biodiesel, por su parte, es producido a partir de la trans-esterificación de triglicéridos, provenientes de los aceites de varias materias primas que también entran en conflicto con la parte alimenticia, como la soja, palma africana, Colza, la grasa animal, entre otros (ver

Figura 1.3 para ver su peso en el porcentaje mundial). En este caso, el proceso utilizado generalmente es la reacción del Aceite con un alcohol de cadena corta como el metílico o etílico, y una serie de pasos posteriores en los cuales se separan los productos de dicha reacción, que son el biodiesel y el glicerol.

- Segunda generación de biocombustibles:

Esta generación se caracteriza por utilizar residuos lignocelulósicos de otros procesos productivos o ramas y hojas, que en general tienen un balance de carbono a lo largo de la cadena neutro o hasta negativo, según Naik (2010). Dice el autor, que el inconveniente de su aplicación es que actualmente la producción no es costo-efectivo debido a algunas barreras tecnológicas, pero tiene un potencial enorme, debido a que la biomasa de las plantas está conformada en su mayoría por paredes celulares, de las cuales aproximadamente el 75% de su composición son polisacáridos aprovechables para la producción de biocombustibles.

Los materiales lignocelulósicos son considerados materiales avanzados en la obtención de biodiesel, y típicamente los cultivos forestales como el eucalipto, álamo y sauce son utilizados, algunas hierbas como el pasto y residuos de la industria maderera. Estos materiales son tratados mediante hidrólisis, fermentación o mediante procesos de gasificación como el de Fisher-Tropsch y el bio-DME (o de dimetileter)(Balat, M., 2006).

- Tercera generación de biocombustibles

Esta última generación se caracteriza por ser obtenidos a partir de la biomasa de las algas. Estos procesos generalmente están íntimamente relacionados con el cultivo de microorganismos benéficos al fin que se quiere lograr, destacándose entre ellos especies como *Clostridium thermocellum* (por su estrategia de degradación) (Carere, R. C., Sparling, R., Cicek, N., & Levin, B. D., 2008) y la *Chlorella protothecoides* (por su alta productividad). Los problemas que enfrenta este tipo de tecnología es que la cantidad de agua empleada es muy grande y puede ser un inconveniente en países muy fríos, además que las tecnologías para remoción de agua y separación de lípidos (centrifugación por ejemplo) y otros aspectos del diseño de las plantas elevan los costos de producción haciendo hasta el momento que la tecnología no sea costo efectiva (Lee, R. A. & Lavoie, J. M., 2013).

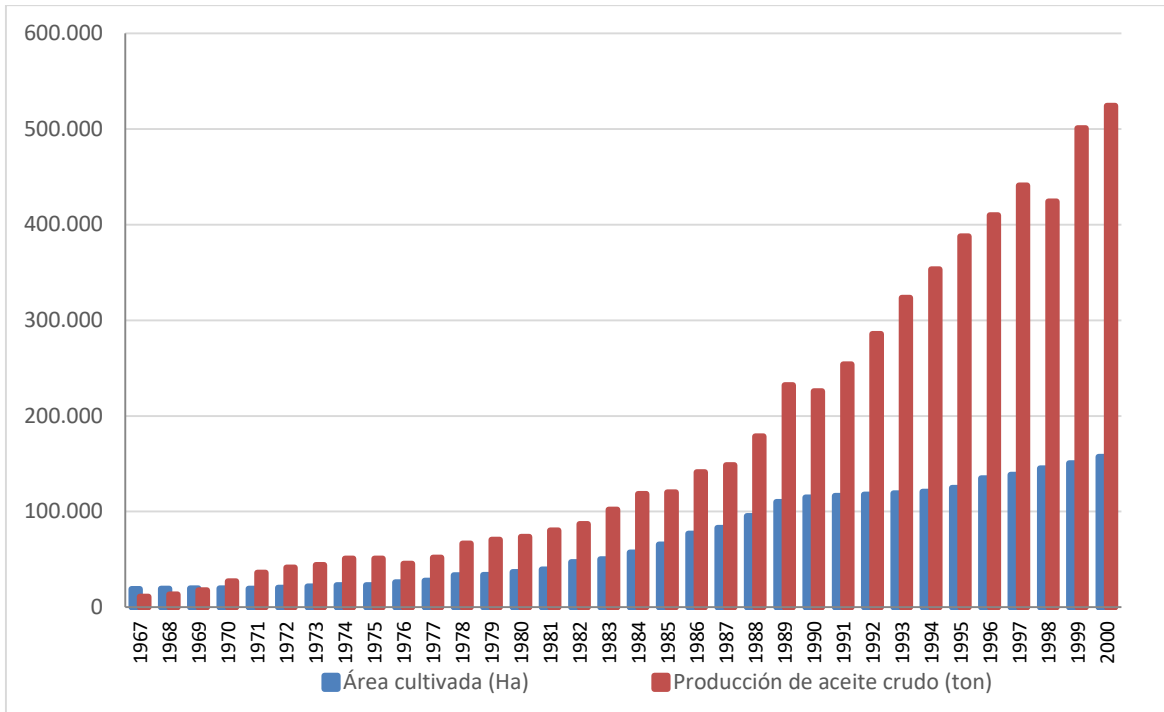
### 1.3 Biodiesel en Colombia

La palma africana fue introducida en Colombia en 1932, por Florentino Caes (director del Jardín Botánico de Bruselas, Bélgica) quien plantó algunas semillas en Cundinamarca y regaló algunas otras que terminarían siendo sembradas en Puertos asís y Florencia y tuvieron usos netamente ornamentales. En 1945 se inició el cultivo comercial de palma africana, con la plantación de la hacienda Patuca, en Sevilla - Magdalena, por parte de la United Fruit Company (Aguilera M., 2002).

Luego de esto, varias iniciativas como la de sustitución de importaciones para suplir la creciente demanda de aceites vegetales y la ley 26 de 1959 que brindó estímulos financieros para los cultivos de tardío crecimiento, hicieron que el sector palmicultor se afanzara en el país (Aguilera M., 2002). Para ilustrar el desarrollo de la industria palmera, se muestra en la Figura 1.7 el área cultivada con palma africana en Colombia en el periodo de 1967 a 2000, el cual será considerado en este trabajo como un periodo sin incentivos de mercado al combustible. A su vez, se muestra en el eje derecho de la figura la producción de aceite de palma en Colombia para el mismo periodo de tiempo, con lo que es posible visualizar el mejoramiento en el rendimiento por hectárea de palma en producción, pasando de 1,35 toneladas por hectárea en el año de 1967 a 3,89 ton por hectárea en el año 2000.

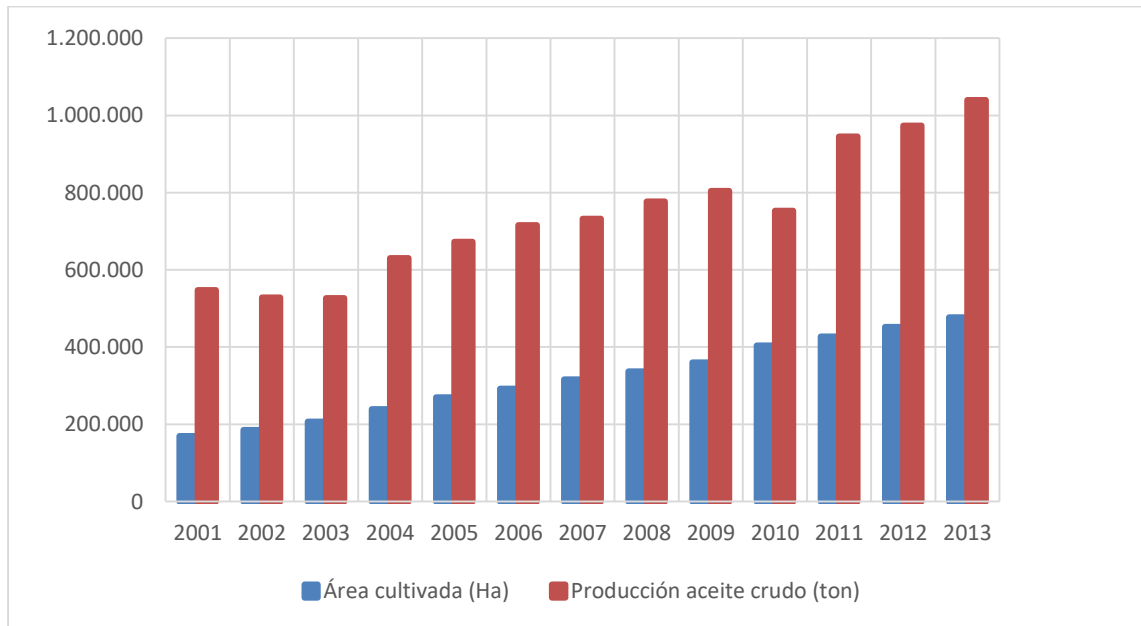
Desde el gobierno de Andrés Pastrana (1998-2002) hasta el actual de Juan Manuel Santos (2010-2018), la palma africana ha estado inmersa en las políticas nacionales de desarrollo; en el gobierno de Pastrana se promovió la industria palmicultora como un eje de desarrollo rural (Salinas Y., Alvarez P., & Fajardo D., 2010), mediante el programa plante, que incentivó la expansión del cultivo a la zona oriental del país. El gobierno de Uribe (2002-2010) continúa con la Ley 934 de 2004, que estimula la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diésel y con el PND 2006-2010, el cual establece al biodiesel como producto estratégico, dando un impulso a la industria palmera en Colombia al generar la demanda con mezclas obligatorias (García H. & Calderón E., 2012). Por último, los biocombustibles terminan afianzándose en el país a través de las políticas energéticas y de desarrollo rural promovido en el PND 2010-2014, donde se sigue generando demanda a partir de decretos de mezcla obligatoria e incentivos arancelarios a la producción.

**Figura 1-7:** Área cultivada de palma africana en hectáreas vs Producción de aceite de palma en el periodo de 1967 a 2000 en Colombia.



Fuente: Elaboración propia con datos de Ospina B. & Martha L. (2001).

**Figura 1-8:** Área cultivada de palma africana en hectáreas vs Producción de aceite de palma en el periodo de 2001 a 2013 en Colombia.



Fuente: Elaboración propia con datos de FEDEPALMA(FEDEPALMA, 2003, 2011a, 2014)

El mercado emergente de los biocombustibles genera una necesidad de expansión en la frontera agrícola en zonas como los llanos orientales y la costa atlántica, amentando necesariamente la demanda de superficie apta para el cultivo de palma africana y aumentando la producción de aceite de palma y de biodiesel. La Figura 1.8 muestra la evolución del área cultivada de palma africana y la producción de aceite de palma en el periodo comprendido entre 2000 y 2013, en este caso, el rendimiento por hectárea cae de 3,95 toneladas/hectárea en 2001 a 3,11 toneladas/hectárea en 2013.

En la Tabla 1.3 se encuentra la producción de biodiesel, el área en producción de palma africana y la proporción de biodiesel por hectárea en producción, aquí llamado productividad, desde 2008 hasta 2015. En 2008 el aceite de palma no se destinó a la producción de biodiesel y tampoco fue vendido en gran cantidad, posiblemente por la crisis energética y económica del 2008.

**Tabla 1-3:** Producción de Biodiesel y productividad del área en producción desde 2008 hasta 2014.

<b>Año</b>	<b>Producción Biodiesel (ton)</b>	<b>Área en producción (Ha)</b>	<b>Productividad (Ton/Ha)</b>
2008	22.730	221.266	0,103
2009	163.077	235.914	0,691
2010	337.713	250.663	1,347
2011	443.037	266.922	1,660
2012	489.990	299.953	1,634
2013	503.337	334.493	1,505
2014	518.093	353.566	1,465

Fuente: Elaboración propia a partir de fuentes gremiales (Fedebiocombustibles, 2016; FEDEPALMA, 2015).

Este aumento significativo en el área cultivada se da en gran medida por la producción de biodiesel; Colombia produjo en el año de 2014, 518.093 toneladas de biodiesel en 6 refinерías integradas a la cadena de suministro de materia prima y están ubicadas principalmente en la costa atlántica y la región central (Rueda A. & Ahumada M., 2013).



## 2. Capítulo 2: Antecedentes y estado del arte

En Colombia y el mundo se ha estudiado no solamente el proceso de producción de biodiesel y el cultivo de la palma, sino el contexto económico y político en el cual se desarrolla, los conflictos sociales y ambientales generados por los cambios del uso del suelo y acaparamiento de la tierra que trae consigo el negocio palmero. En el Anexo 1 se encuentra un resumen de estudios sobre el biodiesel y el aceite de palma realizados en el país y el exterior, con el cual se pretende dar una recopilación de información que ayude a contextualizar el presente trabajo.

Los antecedentes particulares de este trabajo inician explicando el balance energético y las incongruencias que suelen darse en el debate sobre los biocombustibles, con trabajos como los de Pimentel y Patzek (2005), en el cual concluyen que el balance energético al tener en cuenta todo el ciclo de vida del biocombustible, es negativo en algunos casos dependiendo de la materia prima de la cual se extrae el aceite necesario en la refinación de éste, y por otro lado se muestran trabajos como el de Krawczyk (1996) que comienza a explicar las propiedades del biodiesel y sus ventajas respecto a otros combustibles o el de Yañez (2009), en donde es posible ver un trabajo comparativo entre la industria de biodiesel en Brasil y Colombia, resultando la primera como una industria en términos energéticos mejor que la colombiana, y mostrando como ambas tienen un balance energético positivo en cuanto a obtención de biodiesel a partir de aceite de palma.

Continúa, mostrando diversos estudios que muestran la relación entre los estímulos económicos al sector palmero y de biocombustibles con el crecimiento de la frontera agrícola y la aparición y agudización de algunos problemas ambientales y/o sociales, como los de García (2012), pero además, estudios que sugieren que estos estímulos han relegado al sector palmero a suplir meramente el mercado interno, al perder competitividad en los mercados extranjeros (Rueda, A. & Pacheco, P., 2015) y el de Castiblanco & Hortúa (2012) que hace un análisis crítico sobre los biocombustibles en el panorama mundial y colombiano, teniendo en cuenta las implicaciones de la producción a gran escala y sus repercusiones en los servicios ecosistémicos, la seguridad alimentaria y los conflictos en el campo.

En última instancia, el Anexo 1 recopila en su sección de sostenibilidad y conflictos socio-ambientales una serie de artículos científicos que muestran el enfoque de sostenibilidad

que se le ha dado al sector palmero en países como Malasia, el cual es construido no solo con los palmeros sino con la comunidad vecina (Basiron Y., 2007), o cómo es vista la sostenibilidad dependiendo de los diferentes actores que se encuentran en y alrededor de los cultivos palmeros (Boons F. & Mendonza A., 2010) y a la vez cómo este sector productivo puede generar conflictos con las comunidades locales, llegando en ocasiones a que actos de violencia sean cometidos en contra de éstas, como lo muestra García (2014) en su trabajo sobre palma en el bajo atrato del Chocó Colombiano o a generar conflicto y desplazamiento en zonas palmeras de forma indirecta, como asegura Ocampo en su trabajo sobre Agroindustria y Conflicto Armado (Ocampo S., 2009).

En la literatura revisada se habla frecuentemente sobre Análisis de ciclo de vida (ACV), dado que esta es una potente herramienta técnica para calcular los impactos ambientales, positivos y negativos, que tiene un proceso productivo sobre el medio (Mohammed, M., 2000; Tukker, 2000). En la siguiente sección se hará entonces una pequeña revisión sobre los ACV en general y los ACV que se han realizado específicamente para el biodiesel. También se hace importante, ahondar en el tema de la sostenibilidad como un concepto integral que toma para su análisis y concepción aspectos no solo ambientales (los cuales serán abordados en este trabajo desde los resultados del ACV), sino también aspectos sociales y económicos que están directa o indirectamente asociados a la cadena de producción de biodiesel.

## 2.1 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida es definido por la Sociedad Ambiental de Toxicología y Química (SETAC) como el proceso que permite evaluar las descargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad con el fin de evaluar el impacto de esos materiales y energía. Además se utiliza también para identificar y evaluar oportunidades para realizar mejoras ambientales en los procesos (Azapagic, A., 1999).

La conveniencia del ACV frente a otras metodologías empleadas para el análisis ambiental de los procesos es su mirada de estudio sobre un sistema, abarcando en todas las etapas del proceso la identificación de flujos energéticos e impactos ambientales, que sirven para dilucidar los efectos a nivel global y local en el medio ambiente, por el contrario, el uso de metodologías que no tengan en cuenta el sistema completo, puede ocasionar el aumento de impactos en etapas no consideradas al creer que se optimiza la etapa considerada (Sánchez O., Cardona C., & Sánchez D. L., 2007).



Al tener un mayor nivel de integración en los diferentes momentos de cualquier proceso productivo, esta metodología ha sido utilizada por gobiernos como herramienta para la toma de decisiones en política ambiental; Se espera que en un futuro esta herramienta sea clave en la toma de decisiones en política pública, aportando en el desarrollo de estándares ambientales y teniendo en cuenta todos los impactos ambientales (DEFRA, 2000).

En principio, los ACV se utilizaron para estudiar procesos industriales, con el fin de desarrollar productos menos contaminantes, por ello, cuando éstos se comenzaron a aplicar en temas de agricultura, se requirieron nuevas metodologías y bases de datos que pudiesen hacer el trabajo de manera precisa (Cowell, S. & Clift, R., 1997). En Europa se han realizado algunos trabajos de adaptación de la metodología ACV para su aplicación en el sector agrícola, como lo es el trabajo de Wegener (1996), que sentó las bases para analizar los impactos ambientales de los productos agrícolas y el trabajo de Ausdley (1997), que investigó cómo el ACV puede ser aplicado a la producción agraria, estableciendo las primeras pautas e identificando dificultades a resolver en las investigaciones cercanas. El análisis ACV utilizado en cultivos agrícolas ha demostrado, por ejemplo, que no necesariamente los cultivos orgánicos son más amigables con el ambiente, pues aunque se reduce la toxicidad del producto, se aumentan las emisiones y requerimientos energéticos por el uso de más maquinaria (Milà, L., 2003).

### **2.1.1 ACV en el biodiesel**

En los ACV para el análisis de biocombustibles, existen dos tipos de abordajes dependiendo de la delimitación del problema: “Cradle to gate” o “de la cuna a la puerta”, que tiene en cuenta las etapas concernientes a lo agrícola, producción del aceite y refinación hasta biodiesel y “Cradle to grave” o “de la cuna a la tumba” que contempla las etapas anteriores y su posterior uso en el sector de transporte (Acevedo P., 2012). Este primer caso (de la cuna a la puerta) es el contemplado a nivel metodológico en este proyecto para el ACV. Al respecto, en Brasil se han desarrollado trabajos de esta índole, como el de Queiroz, et al. (2012), en el cual hicieron un ACV a la producción de biodiesel de palma centrándose en la etapa agrícola (como cuna) y la planta de producción como la puerta, determinando que en la fase agrícola el mayor gasto de energía intensivo viene por parte de los fertilizantes. Otros trabajos apuntan también a un balance energético negativo para los biocombustibles, sobre todo los de primera generación, como los

trabajos de Pimentel y Paszek (2005) haciendo LCA para maíz y pasto, y los de Delucchi (2006) y Gnansounou y Dauriat (2005) mostrando un ratio energético negativo de los biocombustibles a base de maíz.

En Colombia han sido varios los trabajos realizados utilizando la metodología ACV en el sector de biocombustibles, de los cuales se puede resaltar el realizado por Sánchez (2007) quien hace un ACV en la producción de bioetanol y proporciona una aproximación cualitativa para la aplicación del análisis de ciclo de vida durante el diseño del proceso de producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar. En 2009 se hace un trabajo de ACV cuantitativo sobre el ciclo de vida del carbono de la palma de aceite colombiana, por parte de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), donde se muestra que desde el cultivo hasta la producción del aceite, se tiene un balance positivo de 5,43 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de aceite crudo de palma (ACP) y que los aspectos que más impactan al balance son la respiración de los suelos con un 65,72%, el CO<sub>2</sub> producido por los residuos vegetales 15,6%, el CO<sub>2</sub> emitido en las plantas de tratamiento de efluentes 7,8% y el CO<sub>2</sub> producido en las calderas de producción de vapor 7,1% (Vargas, C., 2009).

Tal vez el estudio más completo que evalúa los biocombustibles en Colombia fue el realizado en el marco del proyecto “Estrategias de energía sostenible y biocombustibles para Colombia ATN/JC-10826-CO y ATN/JF-10827-CO” (Consortio CUE, 2012) en el cual se realiza un trabajo sobre la evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia, donde el impacto ambiental promedio de los biocombustibles evaluados se comparó con los estándares internacionales de sostenibilidad, dando como resultado que el impacto ambiental del bioetanol colombiano es levemente mayor al de la gasolina fósil debido a las emisiones de material particulado en la quema de la caña antes de la cosecha y por la ocupación del suelo. De igual manera el biodiesel colombiano genera más impacto ambiental agregado que el diésel convencional, basándonos solamente en las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes totales. Dicha investigación fue validada en la mayoría de puntos en una investigación del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia utilizando el software libre OpenLCA y hace énfasis en los escenarios de disminución de impacto ambiental que se pueden generar al utilizar los residuos del cultivo de palma (Buitrago R., 2014).

No se puede pasar por alto el ya mencionado trabajo de Yáñez sobre Brasil y Colombia, en el que se analizan tres refinadoras diferentes en cada país y se concluye que la relación salida/entrada de energía es positiva en ambos casos, pero con mayor favorabilidad para las brasileñas, que estaban mejor optimizadas y con una cadena de suministro más favorable (Yáñez E. et al., 2009); cabe aclarar que en el estudio se utilizan gran cantidad de datos secundarios y el inventario de flujos es tomado respecto a las plantaciones de palma cercanas a la refinadoras. Teniendo en cuenta que los estudios realizados en Colombia, específicamente con ACV sobre el biodiesel toman en cuenta sectores adyacentes a las refinadoras de biodiesel y no plantaciones como las que se encuentran en las diferentes zonas palmeras del país, a varios cientos de kilómetros de la planta extractora, ni son realizados bajo las categorías de impacto de sostenibilidad ambiental, sino en categorías de cambio climático, es importante realizar un trabajo de ACV que ayude a complementar la información para a tomar decisiones en un futuro sobre estas áreas lejanas y que según los datos de área cultivada van creciendo año a año.

## **2.2 Sostenibilidad: relacionando lo físico con lo socioeconómico**

Es difícil establecer el momento exacto en el que se comienza a usar la palabra sostenibilidad, por lo que algunos autores le atribuyen su surgimiento al sector forestal, en el cual se comienza a utilizar para referirse a la forma en la que debían ser administrados los recursos forestales en la década de los 70's (Leal, W., 2000). En 1987 Gro Harlem Brundtland publica el informe llamado "Nuestro futuro común", en el que se le dan bases por vez primera a lo que sería el concepto de desarrollo sostenible, enunciándolo como aquel que permite satisfacer nuestras necesidades sin comprometer la de las generaciones futuras. Este concepto de desarrollo sostenible inspirado en la sostenibilidad, daba cuenta de esfuerzos colectivos a nivel de estados, por lo que se refería a las obligaciones de los gobiernos a nivel de política pública y dejaba de lado a los individuos; en este sentido, la unión internacional para la conservación de la naturaleza (IUCN), El programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (UNEP) y el Fondo Internacional para la Naturaleza (WWF) definen el concepto de "sustainable living" o vida sostenible, el cual pretende cambiar un estilo de vida en el cual se reduzcan

los consumos de recursos naturales individuales, y con ello los de la sociedad (IUCN, UNEP, & WWF, 1991). En 1992, se llevó a cabo la Conferencia de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo, por parte de las Naciones Unidas, surgiendo como uno de los acuerdos más importantes la Agenda 21, que aporta recomendaciones para luchar contra los problemas medio ambientales y un programa de acción para el desarrollo sostenible, con la finalidad de establecer una política ambiental a nivel internacional (Robles, R. M., 2012)

Con el tiempo y los aportes de una gran cantidad de autores, la sostenibilidad comenzó a plantearse como una ciencia, centrándose en el desarrollo sostenible y las ciencias ambientales, introduciéndose oficialmente en la conferencia mundial “Retos de un planeta cambiante” en Ámsterdam (Kates, 2001). Esta nueva ciencia se preocupa principalmente en entender la relación del sistema humano y el ambiental, con el fin de avanzar en el diseño, implementación y evaluación de acciones concretas en lugares con contextos particulares, mediante las políticas de gestión y la investigación (MRCBG, 2001). En la sostenibilidad, se puede distinguir entre sostenibilidad débil, en la cual es compatible el crecimiento económico y la conservación del capital natural siempre y cuando la tecnología evolucione al tiempo necesario para remediar los daños ocasionados al ambiente (Mas-Colell, A., 1994), y sostenibilidad fuerte, que se define como la viabilidad de la relación entre un sistema socioeconómico con un ecosistema, tomando al sistema socioeconómico como dependiente del sistema natural (Naredo J., 1994).

En la corriente de este último, algunos autores basados en el trabajo de Georgescu-Roegen (1971) sobre la relación entre energía y economía, llaman la atención ante la incongruencia termodinámica del crecimiento ilimitado de la economía, puesto que determinados procesos irreversibles imponen límites finitos a esta (Mitchell, B., 1998). La sostenibilidad como tal, vista desde la ecología y aplicado al campo del desarrollo económico, se refiere al mantenimiento de los ecosistemas naturales con la intención de mantener la población humana en el largo plazo (Alberti, M. & Susskind, L., 1996) y de forma más sencilla es definida por Constanza y Pattern (1995) como aquel sistema que sobrevive o persiste.

### **2.2.1 Sostenibilidad energética**

El World Energy Council (WEC) define sostenibilidad energética basada en tres dimensiones: i) seguridad energética, ii) equidad social y iii) mitigación del impacto

ambiental. Constituyendo un “trilema” que involucra actores públicos y privados, gobiernos y entes reguladores, entre otros factores, como la preocupación ambiental (World Energy Council, 2011). Esta preocupación ambiental se trata de reflejar en los distintos indicadores de sostenibilidad energética usados actualmente, que buscan entre otras cosas la disminución de los flujos de energía y materia, aportando con ello a la conservación de los recursos naturales. Algunos ejemplos son el índice de dominancia petrolera (IDP, Oferta de energía primaria del petróleo/Oferta energías renovables es un país), índice de consumo contaminante (ICC, Emisiones de CO<sub>2</sub>/Consumo final total en equivalentes de petróleo) que muestran a grandes rasgos nociones la eficiencia energética de un país (German Agency for Technical Cooperation, 2003). Desde el punto de vista de procesos, es importante que en los análisis de sostenibilidad no sólo se usen indicadores que den nociones sobre la eficiencia energética de un proceso, sino que tenga en cuenta aspectos como el biótico, económico y social, como destaca Munasinghe (1993). Con este enfoque de sostenibilidad se tratará de abordar, o por lo menos tener presente, en el presente trabajo.

En general, la sostenibilidad es un término ambiguo y difícil de medir o cuantificar, por lo que se han desarrollado diferentes indicadores y metodologías en el marco de la sostenibilidad fuerte y muy fuerte (Jiménez, L. M., 2000; Martínez - Alier, J., 1999) y se caracterizan por su complejidad en el cálculo. Surge luego una tendencia grande a desarrollar un mayor número de indicadores para evaluar la sostenibilidad débil (Serageldin, I., 1996a, 1996b), más afín al análisis neoclásico, debido a la disponibilidad y facilidad en el análisis de datos; algunos de los indicadores más desarrollados son: ISEW (Índice de Bienestar Económico Sostenible), GPI (Indicador de Progreso Genuino), SDP (Producto Interior Neto Sostenible) y EF (Huella Ecológica) (Gonzales, F. & Martín, F., 2003).

Ahora, los indicadores por si solos no dan una medida de la sostenibilidad, sino que se analizan dentro de una metodología específica y mediante el uso de herramientas teóricas que dependen del tipo de indicador y del tema específico. Una de las formas de analizar la sostenibilidad de un proceso, es mediante el Análisis de Ciclo de Vida un producto, obteniendo con esto criterios de balance energético e impactos ambientales que permiten mejorar el proceso en el marco del uso de materiales y energía (Mohammed, M., 2000).

Dada la integralidad en el análisis que se quiere dar en este trabajo, que aunque no pretende abarcar la sostenibilidad en términos ecosistémicos y socioeconómicos de

manera completa, intenta abordar a continuación la dimensión social y económica de este concepto; con esto se espera sentar las bases teóricas con las que se tendrán en cuenta estos aspectos a la hora de concebir un índice de sostenibilidad.

### **2.2.2 Dimensión social y económica de la sostenibilidad**

A partir de los antecedentes que se han presentado, se puede hacer una aproximación al concepto de sostenibilidad y su evolución, aunque no queda claramente establecida la relación intrínseca que tiene este concepto con los componentes sociales y económicos que dan contexto a dicha sostenibilidad. Algunos autores critican la vaguedad del concepto de sostenibilidad como integralidad de conceptos ambientales y socioeconómicos o la poca capacidad real que tiene para dar un criterio objetivo de la sostenibilidad de algún proceso (Jacobs, M., 1999; McKenzie, S., 2004), por lo que han optado por enmarcar el concepto desde un marco de referencia para el desarrollo sostenible de forma estratégica (FSSD), con el cual se intenta integrar aspectos sociales y económicos en los procedimientos de optimización y definición de metas (Missimer, M., Robert, K. H., & Broman, G., 2016).

La dimensión económica se integra al ambiental de manera menos vaga debido a la conmensurabilidad de algunos de sus datos, dado que ambos se han trabajado desde hace tiempo principalmente en términos cuantitativos; esto definitivamente no podría hacerse con el componente social, dado que éste se desenvuelve en un contexto situacional propio y con escalas geográficas y temporales que no necesariamente son coherentes con la sostenibilidad (Davidson, M., 2009), por lo que los intentos que buscan mostrar la sostenibilidad con un sentido de integralidad de componentes, solo pueden ser aplicables en situaciones puntuales y con una escala adecuada (Missimer, M., Broman, G., & Robert, K. H., 2017); este es el enfoque se pretende utilizar en este trabajo.

### **2.2.3 Indicadores compuestos e índices de sostenibilidad**

Una de las formas en las que se ha tratado de incluir el aspecto multidimensional de la sostenibilidad, es mediante la integración de estas dimensiones a través de indicadores compuestos que condensan información de diversa índole en forma de un indicador simple, bajo un marco conceptual subyacente (Schuschny, A. & Soto, H., 2009). También se han creado un sinnúmero de índices de sostenibilidad que condensan diferentes componentes mediante métodos de agregación y normalización, dando un panorama que

puede llegar a ser bueno para explicar este esquivo concepto con una contextualización adecuada, que de lo contrario puede ser ineficaz y difícil de comparar (Pater L. R. & Cristea S. L., 2016). Dada la gran cantidad de enfoques y conceptualización que se ha hecho alrededor de los indicadores e índices, se adopta en este trabajo la definición de Ebert y Welch (2003) sobre ellos, en la cual los indicadores son una combinación de uno o más datos y los índices son agrupaciones de indicadores sintetizados a través de una función matemática preestablecida, los cuales deben ser consistentes, es decir, que hagan comparable su objeto en el tiempo que se ha determinado para reducir lo mayor posible la ambigüedad.

Los indicadores e índices ambientales y de sostenibilidad surgen prácticamente a la par con el incremento de la preocupación institucional por tratar estos temas, Rayén Quiroga en su trabajo titulado “Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe” realizado para la CEPAL, hace un recuento interesante de la evolución de éstos y los divide en tres generaciones. La primera generación va desde 1980 hasta la actualidad, dado que aún tienen un uso generalizado de estos primeros indicadores; éstos se refieren a sectores productivos en específico o fenómenos de la complejidad ambiental, como contaminación en el agua por metales pesados, cobertura vegetal, calidad del aire, entre otros, estos son importantes debido a que sustentan y dan rigurosidad a las siguientes generaciones de indicadores. La segunda generación o de desarrollo sostenible, están ubicados entre 1990 y la actualidad, y tratan de tener en cuenta los pilares económicos, sociales, ambientales e institucionales del desarrollo sostenible, viéndolos como indicadores separados, los cuales sirven principalmente para analizar y tomar decisiones en cada una de éstas áreas sin llegar a la integración de dichos pilares. La tercera y última, es una generación de indicadores muy recientes y tratan de ver los pilares del desarrollo sostenible desde una mirada sistémica e integradora, que sirva para tomar mejores decisiones de cara a la problemática ambiental actual (Quiroga, R., 2007). Álzate B. (2008), hace un gran avance en la utilización de índices en sostenibilidad ambiental, utilizando lo que llama Índices sistémicos ambientales (ISA) en el caso puntual del páramo de Guerrero en Colombia; dicha investigación arroja como resultado 40 indicadores que expresan parte de la complejidad sociedad/naturaleza y muestran en dicho caso de estudio la identificación y evaluación de ciertas tendencias de insostenibilidad en la transformación ambiental.

En este trabajo, se busca generar un índice de sostenibilidad para el sector productivo que atañe al biodiesel en el departamento del Meta que tome en cuenta el estado del proceso productivo de aceite de palma y luego del biodiesel y adopte el contexto social y económico de la región y lo potencie. El limitante conceptual se da por la complejidad y escaso avance hay aún en los indicadores ambientales de tercera generación, por lo que se tratará de usar un índice compuesto de segunda generación que tome ese contexto social y económico que se explica a lo largo de este trabajo para dar una visión condensada y comunicativa sobre la potencialidad o no del sistema productivo de biodiesel en los diferentes municipios del Meta.



## **3. Capítulo 3: El contexto del biodiesel en el departamento del Meta**

### **3.1 Contexto socioeconómico**

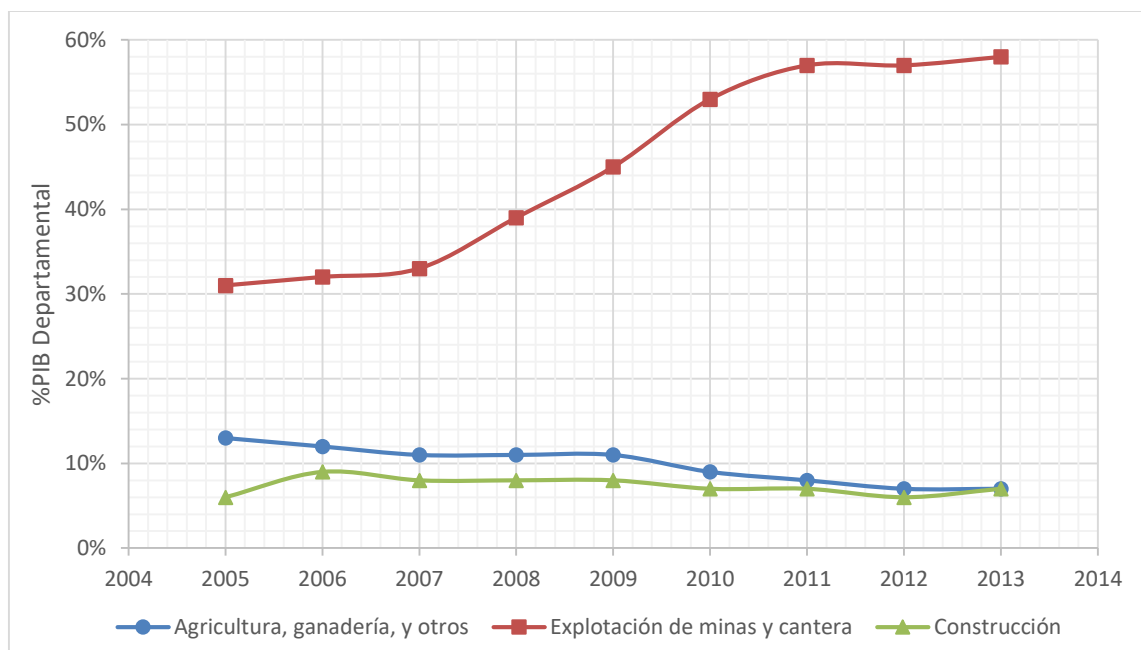
El departamento del Meta está ubicado en el centro de Colombia, aunque pertenece a la región de la Orinoquía; cuenta con una extensión de 85.770 km<sup>2</sup> (7.5% de la extensión del país) y la corporación autónoma regional que ejerce control ambiental sobre su territorio es Cormacarena. Perteneció al Estado Soberano de Cundinamarca y a la Provincia del Casanare, en 1909 se cobija bajo la figura de Intendencia Nacional del Meta y fue finalmente declarado departamento en 1959 (Martín, M. A., 1979). Según Miguel Ángel Martín, en su libro “El Folclor Llanero”, el Meta es único al estar configurado fisiográficamente en cinco unidades: Andina, piedemontana, sierra macaranense, amazonense y orinoquense, lo que puede explicar su gran riqueza hídrica.

Las principales actividades económicas del departamento son la agricultura y ganadería, explotación minera, extracción de petróleo y gas y el sector de la construcción; según el ANH y el PNUD para el año 2013 estos representaron el 7%, 58% y 7% respectivamente del total del PIB departamental (PNUD, 2014a). El departamento del Meta representó para el año 2014 el 5,1% del PIB del país, mostrando una disminución respecto al año anterior donde representaba el 5,8%(DANE, 2015), además, el PIB per cápita es el más alto a nivel nacional, al llegar a un valor de \$25.228.383 COP, en 2013, siendo el PIB per capital promedio del país \$ 10.460.964 para ese mismo año. En la Figura 3.1 se puede ver la evolución de los principales sectores de la economía del departamento desde 2005 hasta 2013, mostrando claramente una tendencia creciente del sector de minero-energético, donde la actividad principal es la extracción de petróleo y gas. Esta tendencia toma sentido cuando se revisa la participación de extracción de petróleo y gas del departamento respecto al total nacional, donde éste representó para el año 2013 el 49% según la ANH y el PNUD (2014a).

En términos de Indicadores sociales, el departamento tuvo un Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) de 54,0 puntos (5 puntos por encima del promedio nacional) y un coeficiente GINI para el año de 0,489 (12% menor al nacional) para el año 2005 (DANE, 2013). Esto resulta preocupante, dado que aunque el coeficiente GINI muestra que en

general el departamento es menos desigual en promedio que el resto del país, pero el IPM nos muestra que las asimetrías están realmente en el ingreso desigual, la falta de educación, la calidad de vida, entre otros factores, que se evidencian realmente cuando se compara el IPM rural y el de cabecera (79,7 y 45,4 respectivamente).

**Figura 3-1:** Comportamiento de los principales sector económicos del Departamento del Meta entre 2005 y 2013.



Fuente: PNUD (2014a)

El índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) del departamento para el año 2005 fue de 25,03%, estando 2,5% por debajo de la media nacional (DANE, 2005). Respecto al año 1993 el promedio departamental de NBI ha mejorado considerablemente, pasando del 41,30% (5,5 puntos por encima de la media nacional de ese año) al 25,03 % para el año 2005. En la Tabla 3.1 se muestra que entre el NBI rural y de cabecera en los principales municipios palmeros y petroleros del departamento presenta una brecha importante, visibilizando las condiciones de atrasado en infraestructura y servicios básicos en dicha zona, a pesar de altas regalías. Algunas de las razones que explican dicho comportamiento son el cambio de actividad productiva, la inversión pública centralizada, el desplazamiento a zonas urbanas, la corrupción en el manejo de las regalías, la violencia generalizada, entre otros (Castiblanco, C., 2014; Harman, J. F., 2015; Molano, A., 2015).

**Tabla 3-1:** NBI en principales municipios palmeros y petroleros en el Meta para el año 2005.

<b>Municipio</b>	<b>NBI cabecera</b>	<b>NBI rural</b>	<b>NBI Total</b>
Villavicencio	16,1	32,23	17,07
Acacias	21,59	28,42	22,68
Castilla la Nueva	17,02	28,76	23,42
Barranca de Upía	38,21	45,05	27,63
Puerto Gaitán	40,05	83,37	32,8
San Carlos de Guaroa	39,6	38,5	39,03
San Martín	25,63	35,74	26,99
Promedio Nacional	19,66	53,51	27,78

Fuente: (DANE, 2005)

Como se dijo anteriormente, uno de los principales renglones de la economía departamental es la explotación minera y agricultura a gran escala, que sumado a una tradición ganadera latifundista y de apropiación de baldíos que históricamente ha caracterizado a la región (Cárdenas, D., 2015; Contraloría General de la Nación, 2014; Rodríguez Gonzáles, I., 2013) han conllevado a que la estructura de la propiedad de la tierra en el Meta sea estrictamente desigual en la mayoría del territorio (0,86 GINI de tierras departamental). En la Tabla 3.2 se observa el indicador GINI de tierras (GINI\_T) para algunos municipios del departamento para el año 2009; los municipios donde la actividad de la industria palmera es alta, como San Carlos de Guaroa, San Martín, Puerto Gaitán, entre otros, presentan coeficientes GINI por debajo de la media departamental.

**Tabla 3-2:** Indicador GINI\_T para principales municipios palmeros en 2009.

<b>Municipio</b>	<b>GINI_T</b>
San Carlos de Guaroa	0,684
Puerto Gaitán	0,588
San Martín	0,742
Acacias	0,756
Cabuyaro	0,708
Barranca Upía	0,759

Fuente: IGAC (2012)

En los dos municipios con mayor área sembrada de palma en ese año, San Carlos de Guaroa y Puerto Gaitán, la concentración de la tierra es la más baja, pero ante la falta de

más datos es imposible concluir si el sector palmero tiene o no una relación directa con la acumulación de tierra. En el resto de municipios la concentración sigue siendo y aunque no puede afirmarse que la agroindustria es la razón por la cual la propiedad de la tierra es desigual, si pueden ser elementos importantes que contribuyen al fenómeno.

## **3.2 Uso de la tierra**

El departamento del Meta y en general la zona oriental del país ha sufrido una serie de cambios en el uso de la tierra en las últimas tres décadas impulsadas por el auge de la agroindustria, la cual desplaza la frontera agrícola hacía zonas de sabana y pastoreo antes baldías (Asner, G.P, et al., 2004).

Como analiza Clavijo, O. (2016), las políticas gubernamentales hacia el sector agroindustrial, y en especial el palmero, generan transformaciones en el territorio que confluyen inequívocamente en un incremento en la demanda de tierras, lo que se traduce en impactos directos e indirectos de la distribución y acceso a la tenencia de la tierra. En este contexto, se dan cambios sobre el uso de la tierra y la funcionalidad ecosistémica que cada uno de estos representa, repercutiendo directamente en las formas de producción tradicionales campesinas y en el acceso a los alimentos.

Según FEDEPALMA (2009) el cambio en el uso de la tierra en el año 2000 para la región oriental fue del 48% de pastizales, del 12% de arroz y en el 40% ya había cultivos de palma. Consorcio CUE (2012) referencia que entre 2000 y 2008 hubo cambios relativos del uso de la tierra por cultivos de palma como sigue: 57% zonas de pastoreo, 29% pastizales naturales y sabanas, 10% de tierras dedicadas a agricultura, 3% otras zonas y 1% de bosques naturales. Estos datos muestran un importante desplazamiento de áreas productoras de alimentos, si se tiene en cuenta que en las zonas de pastoreo del departamento se llevan a cabo las actividades de ganadería y que las zonas agrícolas reemplazadas pueden generar una condición futura adversa en términos de seguridad alimentaria.

## **3.3 Palma de aceite en el departamento**

En las plantas de beneficio se concentra la cosecha de frutos frescos de palma y se obtiene el aceite de palma, el cual es una de las materias primas para la producción de biodiesel y por ende, representa una porción importante en la carga ambiental de todo el

ciclo de vida de dicho producto. En el departamento del Meta se encuentran en producción y crecimiento 140.473 hectáreas de palma de aceite, lo que representó para el año 2012 el 31,05% del área sembrada de aceite proveniente de palma a nivel nacional, siendo San Carlos de Guaroa, Puerto Gaitán y San Martín donde se concentra en mayor proporción el área cultivada (FEDEPALMA, 2013). Según Fedepalma (2016), los principales mercados del aceite de palma colombiano, según las toneladas compradas, fueron respectivamente: Biodiesel (488.627 ton), industrias procesadoras de aceites y grasas (309.030 ton) y fabricantes de alimentos balanceados (38.899 ton), mostrando la importancia que tiene el renglón de biocombustibles para la industria palmera, al representar el 38,7% de las ventas de aceite (FEDEPALMA, 2016a).

**Tabla 3-3:** Empresas extractoras de aceite de palma según su capacidad de procesamiento

Municipio	Empresa extractora	ton RFF/hora
Acacias	Alianza Oriental S.A.	15
	Inversiones La Mejorana S.A.S.	11
	Oleaginosas Santana S.A.S.	13
	Palmeras del Llano S.A.	15
	Palmeras La Margarita Díaz Martínez & Cía. Ltda.	7
Barranca de Upía	Guaicaramo S.A.	36
Cabuyaro	Alianza del Humea S.A.S.	24
	Compañía Palmicultora del Llano S.A. - Palmallano S.A.	5
Cumaral	Hacienda La Cabaña S.A.	22
	Plantaciones Unipalma de los Llanos S.A.	25
Granada	Agropecuaria La Rivera Gaitán S.A.S.	20
Mapiripán	Poligrow Colombia Ltda.	30
Puerto Gaitán	Abago S.A.S.1	16
	Extractora San Sebastiano S.A.S.	15
	Sapuga S.A.	15
Puerto Rico	Aceites Cimarrones S.A.S. Zona Franca	18
San Carlos de Guaroa	Aceites Manuelita S.A.	52
	Aceites Morichal S.A.S.	8
	Baquero Ramírez Víctor Ramón	6
	Extractora La Paz S.A.	20
	Servicio de Maquila Agrícola de los Llanos S.A.S.	15
San Martín	Agropecuaria Santamaría S.A.	15
	Entrepalmas S.A.S.	35

Fuente: (FEDEPALMA, 2013, 2016a)

Para procesar los frutos de la palma producidos en el departamento, se encuentran activas 23 plantas de beneficio de fruto fresco con una capacidad total de 438 ton RFF/h (Racimos de fruto fresco por hora) (FEDEPALMA, 2013, 2016a), de las cuales 4 son grandes dado que procesan por encima de los 30 ton RFF/h y el resto se considerarían plantas de medianas y baja capacidad, lo que en términos de infraestructura tecnológica representa una barrera importante a la hora de pensar en el manejo ambiental de la extractora por cuestiones de costos. En la Tabla 3.3 se amplía la información sobre las plantas de procesamiento en el área de estudio, mostrando una relación directa entre el municipio donde se encuentra las plantas de beneficio y los municipios con grandes áreas sembradas en palma africana, lo cual en términos logísticos representa una ventaja competitiva bien aprovechada, dado que reduce los costos y las emisiones totales del transporte.

La producción de aceite de palma en el departamento y en general en la zona oriental ha tenido un rápido aumento en los últimos años, estimulados en parte por los incentivos económicos otorgados por el Estado que esperan asegurar la producción de biocombustibles necesaria para cumplir las normas de mezcla a lo largo del país. Para el año 2013 Finagro emitió créditos al sector palmero mayoritariamente para los grandes y medianos productores, por un total de 5,2 billones (74%) y para los pequeños productores 1,8 millones (26%), siendo el Departamento del Meta al cual se le asignaron mayores créditos para el rubro de mantenimiento del cultivo, con un monto del 67,5% del total nacional (FEDEPALMA, 2014), lo que se traduce en una mayor capacidad de inversión de estos grandes y medianos productores en sus cultivos y por ende una mayor productividad y calidad en términos de frutos de palma.

En términos de empleo, el sector palmero generó aproximadamente 58 mil empleos directos y 87 mil empleos indirectos en todo el país para el año 2015 (FEDEPALMA, 2016b). En el departamento del Meta se suele contratar mediante figuras de tercerización las tareas de cosecha y mantenimiento del cultivo, a través de las llamadas cooperativas de trabajadores y SAS, las cuales consisten en un modelo de trabajo en el cual los trabajadores reciben su remuneración a través de estas figuras, que en últimas gerencian los dividendos otorgados por las empresas palmeras. Con esto, los trabajadores tercerizados se ven obligados a trabajar un mayor número de horas en comparación a los trabajadores directos para poder completar un sueldo mínimo que les garantice suplir sus necesidades básicas, puesto deben cubrir sus gastos de seguridad social e implementos

de trabajo (Entrevista, 2016). En algunos casos los trabajadores se ven obligados a laborar en condiciones climáticas y de salud adversa, frente a la necesidad de conseguir un mejor ingreso, por las razones ya expuestas; por otro lado, en el caso de los trabajadores sindicalizados han existido algunas mejoras en sus condiciones laborales en los últimos años. A pesar de esta problemática social referida al método de contratación del sector palmero, es importante destacar que en municipios golpeados por la actual crisis del petróleo éste es un factor determinante a la hora de aliviar las necesidades de trabajo de los obreros rasos de los municipios que comparten ambos renglones productivos, dado que en épocas de alta productividad del cultivo el número de trabajadores de campo puede aumentar entre un 20 y 30%.

### **3.4 Procesamiento de la palma de aceite**

El procesamiento de la palma para obtención de aceite se encuentra inmerso dentro de la categoría de biocombustibles de primera generación, por lo que el proceso industrial y la tecnología empleada son bastante parecidas alrededor del mundo. En este apartado se va a resumir y explicar el cultivo de palma y el proceso de extracción de aceite basado en diferentes fuentes: datos primarios obtenidos en dos empresas aceiteras de significativa importancia en el departamento del Meta, datos secundarios de literatura nacional sobre el cultivo y la extracción del aceite (Buitrago R., 2014; FEDEPALMA, 2011b; Queiroz, A.G., 2011; Sánchez O. et al., 2007) e informes institucionales sobre el análisis de ciclo de vida de éste proceso productivo (Consortio CUE, 2012), con los cuales se da un acercamiento a la dinámica productiva del resto de plantas de beneficio y cultivos de palma africana que se encuentran en el departamento.

La primera etapa en este renglón productivo es la de cultivo, el cual se lleva a cabo de manera autónoma por las empresas palmeras, aunque también se acogen a algunas directrices del gremio palmero (Representado por Fedepalma y su centro de investigación Cenipalma). La palma de aceite o *Elaeis guineensis* Jac, se da en zonas tropicales calurosas por debajo de los 500 msnm y con una temperatura media entre 26°C y 28°C aproximadamente, las precipitaciones anuales de las principales zonas palmeras en el mundo oscilan entre 1800 mm y 2300 mm de agua distribuidas en el año. En el departamento del Meta por ser uno de los primeros en sembrar palma, se maneja principalmente la variedad de palma tradicional, aunque debido a la edad de los cultivos y

algunos problemas con enfermedades como la pudrición del cogollo, se ha comenzado a expandir el uso de una variedad híbrida llamada Amazon, la cual cruza el germoplasma de población oleífera y el polen de la *E. guineensis* (Empleado palmero, comunicación personal, 27 de septiembre de 2016).

### 3.4.1 Etapa de cultivo y cosecha

- Etapa de cultivo

El cultivo de la palma se podría dividir en las siguientes sub-etapas: adecuación del suelo, vivero y siembra de plantas. En la adecuación del terreno se adapta el lote a los requerimientos geomorfológicos de este cultivo bajo las especificaciones técnicas resultado del estudio de suelos y el levantamiento topográfico de planimetría y altimetría;

A la par de la adecuación del terreno se hace el establecimiento de los viveros, para garantizar la reproducción de las semillas que se van a sembrar en los lotes. En primera instancia se hace germinar semillas escogidas y luego se siembran en pequeñas bolsas con suelo que tiene las condiciones de humedad y sanidad apropiadas por un tiempo de 2 a 3 meses. Las plantas que logran pasar la etapa de previvero son llevadas a los viveros finales, donde transcurren otros entre 6 y 7 meses, seleccionando los especímenes que no presenten crecimiento anormal para formar parte del cultivo principal. En la última sub-etapa, se siembran los especímenes seleccionados del vivero en los lotes correspondientes, generalmente con una distribución de triángulo 9x9 que genera una densidad por hectárea de 143 palmas para la variedad tradicional y 116 palmas por hectárea para la variedad híbrida (Empleado palmero, comunicación personal, 27 de septiembre 2016). La siembra se suele llevar a cabo en época de lluvias dado que las condiciones climáticas benefician la adaptación de las plantas al terreno.

- Etapa de mantenimiento del cultivo

El cultivo se hace la siembra de arvenses o cobertura vegetal que protege el suelo, riego y drenaje, plateo y desyerbe (el cual hace en parte el control de plagas y enfermedades), la fertilización y la poda. En cuanto a las coberturas arvenses, se busca sembrar aquellas que retengan humedad y además den otros beneficios como la fijación de nitrógeno, el



aumento de la materia orgánica, el control, natural de malezas y enfermedades; estas características se encuentran sobre todo en la familia de las leguminosas, por lo que las coberturas más empleadas son: Kudzú, maní forrajero y el pegapega (Ver Figura 3.2).

**Figura 3-2:** Plantación de palma de aceite en el Meta con forraje fijador de nitrógeno



Fuente: Elaboración propia.

Para minimizar la competencia por agua y nutrientes, además de facilitar otras tareas como la fertilización y la recolección de frutos, es necesario realizar tareas de desyerbe y plateo alrededor de las plantas de palma, lo que al principio del cultivo debe hacerse de forma manual para evitar daños en la planta joven y luego ha de realizarse bajo un programa periódico que depende del diseño que le de cada empresa palmera, aunque suele ser trimestral. La fertilización de los lotes de palma depende de las necesidades del cultivo, que en términos generales son principalmente nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) y en menor medida calcio (Ca), boro (B) y otros microelementos. En la zona del Meta

debido a la presencia de terrenos con condiciones del suelo más o menos drenados, o con mayor o menos materia orgánica, pueden hacerse fertilizaciones semestrales o anuales, pero en general, se emplean entre 6-8 kg de fertilizantes por planta al año, lo cual suele acompañarse con la materia orgánica residual de los procesos de extracción, poda y cosecha. En la Tabla 3.4 se muestra las cantidades suministradas de fertilizantes (minerales y orgánicos) y pesticidas por kilogramo racimo de fruto fresco (RFF) producido.

**Tabla 3-4:** Cantidad de fertilizantes y pesticidas por kg de RFF en cultivos de la zona oriental.

<b>Fertilizante mineral (kg/ton RFF)</b>	
Fosfato nitrato de amonio, como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,20
Borax	0,52
Óxido de Boro	0,20
DAP como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,70
Dolomita	9,20
Cloruro de Potasio	14,00
Urea	6,00
<b>Fertilizante orgánico (kg/ton RFF)</b>	
Tusa	220
<b>Pesticidas (kg/ton RFF)</b>	
Glifosato	0,042
Compuestos de Bipiridilium	0,006
Compuestos de urea	0,019
Alcoholes Etoxilados (AE7)	0,019
Compuestos Organofosforados	0,037
Compuestos de Acetamidaanilida	0,013
Insecticidas	0,002

Fuente: Elaboración propia a partir de Consorcio CUE (2012).

Durante la vida útil de la palma se le da un tratamiento de podas que permite retirar las hojas basales que pierden funcionalidad y facilitar las tareas de recolección del fruto. Es importante asegurar una disponibilidad de agua por palma que permita mantener los procesos de la planta funcionando de manera óptima, lo cual depende de si se usa la variedad típica o la híbrida; la primera necesita 150 mm de agua al mes por palma y la segunda 210 mm de agua al mes, lo cual representa una cantidad importante en grandes plantaciones en periodos de sequía, no solo por el volumen requerido por las plantas sino por el volumen captado de los afluentes, el cual tiene grandes pérdidas a lo largo de su recorrido, fluctuando entre 17 y 30% la eficiencia del riego en la zona de estudio.

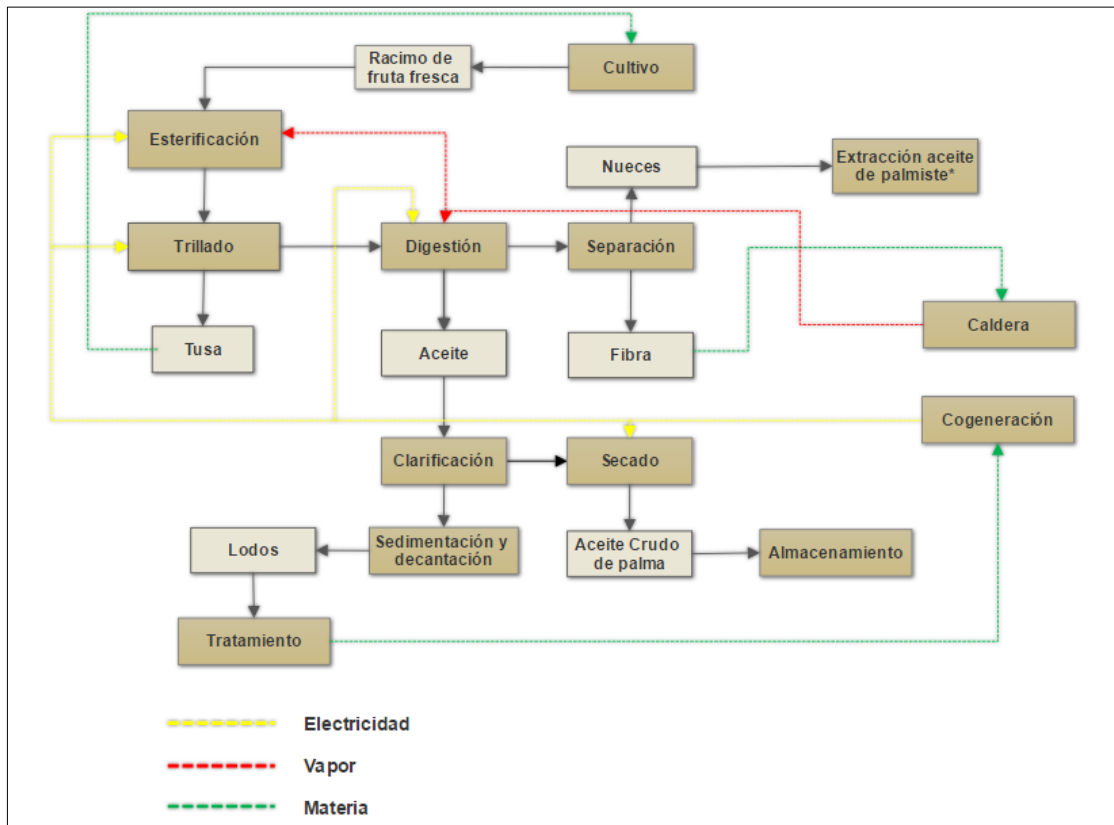
Es importante considerar en el mantenimiento del cultivo es el control de plagas y enfermedades, dado que la palma es atacada desde sus primeras fases de desarrollo por una buena cantidad de plagas y además algunas enfermedades específicas del cultivo como la marchitez sorpresiva, la pudrición del cogollo y la pudrición del estípote. Para lidiar con este problema, se acostumbra principalmente a dar un control químico (Ver cantidad de pesticidas en Tabla 3.4), lo que conlleva a un aumento de los costos debido al desarrollo de resistencia por parte de las plagas o a tratamientos costosos para las enfermedades, por lo que CENIPALMA ha impulsado en los últimos años un manejo integrado de las plagas y enfermedades (MIPE), basado en el control biológico, mecánico y químico de forma integrada (CENIPALMA, 2014).

- Etapa de cosecha

Luego que el cultivo llegue a su etapa de madurez, las palmas en edad de producción se comienzan a aprovechar en lo que se llama la etapa de Cosecha; en esta etapa simplemente son cortados los racimos de frutas a lo largo de la vida productiva de la planta (que suele ser entre 25 y 30 años) según un plan de aprovechamiento de lotes productivos, agrupados en pequeños grupos y luego cargados hacia la planta extractora en diversos medios, los cuales suelen ser mixtos, es decir, se llevan los frutos a la planta por medio de medios de transporte mecánicos como tractores o por medio de carretas arreadas por animales, que generalmente suelen ser búfalos o bueyes. Este transporte se hace el mismo día para mantener las propiedades de la fruta y no afectar la calidad del aceite. La producción media de racimos de fruta de una planta de variedad tradicional varía entre 16 y 18 al año y la de híbrido incrementan la producción de racimos a 30 por año, pero tiene un mayor costo de operación al tener que hacerse una polinización manual (Empleado palmero, comunicación personal, 27 de septiembre 2016).

### **3.4.2 Extracción del aceite de palma**

Como se presentó anteriormente la etapa de extracción de aceite es parecida para este tipo de cultivos, por lo que en la Figura 3.3 se presenta un diagrama de flujo de la obtención final del aceite de palma, principal materia prima del biodiesel.

**Figura 3-3:** Diagrama de flujo de la extracción de aceite de palma

Fuente: Elaboración propia.

La carga de los racimos de fruta frescos (RFF) se trata de hacer el mismo día que se cosechan, por los motivos mencionados en la sección anterior; estos ingresan a la planta extractora en camiones, donde se les realiza un control de calidad y luego los depositan en trenes de carga o en bandas transportadoras que los dirigen hacia los esterificadores. Los esterificadores son máquinas que aplican una presión y temperatura determinada a los RFF con el fin de liberarlos de los patógenos y ablandarlos, haciendo que su manejo sea más fácil en las etapas posteriores. Esta etapa suele hacerse en esterificadores horizontales, los cuales operan a relativa baja presión (de 20 a 40 bares) durante 90 minutos, aunque algunas empresas palmeras han comenzado a operar paralelamente esterificadores verticales, los cuales ahorran una cantidad importante de agua y energía respecto a los primeros. Posterior a la esterificación los racimos son transportados a una etapa de trillado, donde los frutos se separan del resto del racimo y los residuos son transportados a otra sección donde se adecúa su humedad (si se van a utilizar en caldera) o se acumulan para su uso como fertilizante orgánico.

Una vez los frutos están libres del racimo se pasan a la etapa de digestión, allí se tratan con vapor y se prensan de forma mecánica para romper las células de la fruta e ir extrayendo el aceite, la fibra resultante es secada y utilizada en la caldera y la almendra se separa y se lleva a otro proceso paralelo donde se obtendrá la torta de palmiste y el aceite de palmiste, subproductos importantes para el sector palmero. El aceite de palma es llevado en este punto a tanques de clarificación, donde se aprovecha la diferencia de densidades para separar el aceite del agua, luego es almacenado si cumple con los requerimientos de acidez, calidad y humedad. El efluente que queda del proceso de clarificación se pasa por un tambor vibrador o por centrifugas, con lo cual parte del aceite recuperado se devuelve a la etapa de clarificación y el agua sobrante se deposita en el sistema de tratamiento de aguas residuales. El tratamiento de aguas residuales puede variar según la capacidad económica que tengan las empresas para destinar a este proceso, pueden ir desde un confinamiento en lagunas de oxidación para tratar de bajar la DBO de los efluentes y luego depositarlos en algún cauce cercano hasta el aprovechamiento del metano que exhalan estas lagunas con biodigestores y su posterior aprovechamiento energético, con lo cual se disminuye la DBO y además se puede suplir la demanda energética de planta extractora y aún tener excedentes. Cuando el aceite de palma se tiene almacenado, puede ser vendido para diferentes usos, como ya se ha aclarado en secciones anteriores, entre ellas para la obtención de Biodiesel a través de la transesterificación del aceite de palma y un alcohol de cadena corta como el metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ).

### **3.5 Producción de biodiesel**

En Colombia la producción de biodiesel se lleva a cabo en 6 plantas: tres plantas en la región norte, dos en la región central y una en la región oriental- Estas plantas se ubican cerca de los núcleos palmeros para aprovechar estratégicamente la distancia de la mejor manera; en la Tabla 3.5 se amplía la información sobre las plantas y su capacidad de producción anual. La capacidad instalada en estas plantas de refinación de aceite es de 486.000 toneladas/año y el biodiesel producido se usa para suplir la demanda interna según la mezcla que promueve el Gobierno Nacional, que actualmente es la B7 en el centro oriente del país y B10 en el resto, es decir, 7-10% biodiesel 90-93% diésel convencional (Consortio CUE, 2012; MME, 2010).

En el departamento del Meta uno de los principales usos que se le da al aceite de palma es la producción de biodiesel en la planta de Aceites Manuelita S.A., la cual sufre su demanda de materia prima con la producción de aceite de palma de sus fincas y la de un gran número de proveedores a lo largo de la región; también se vende aceite de palma al centro del país, en especial a la planta de biodiesel BioD en Facatativá, teniendo en cuenta su relativa cercanía de algunas empresas palmeras del norte del departamento del Meta.

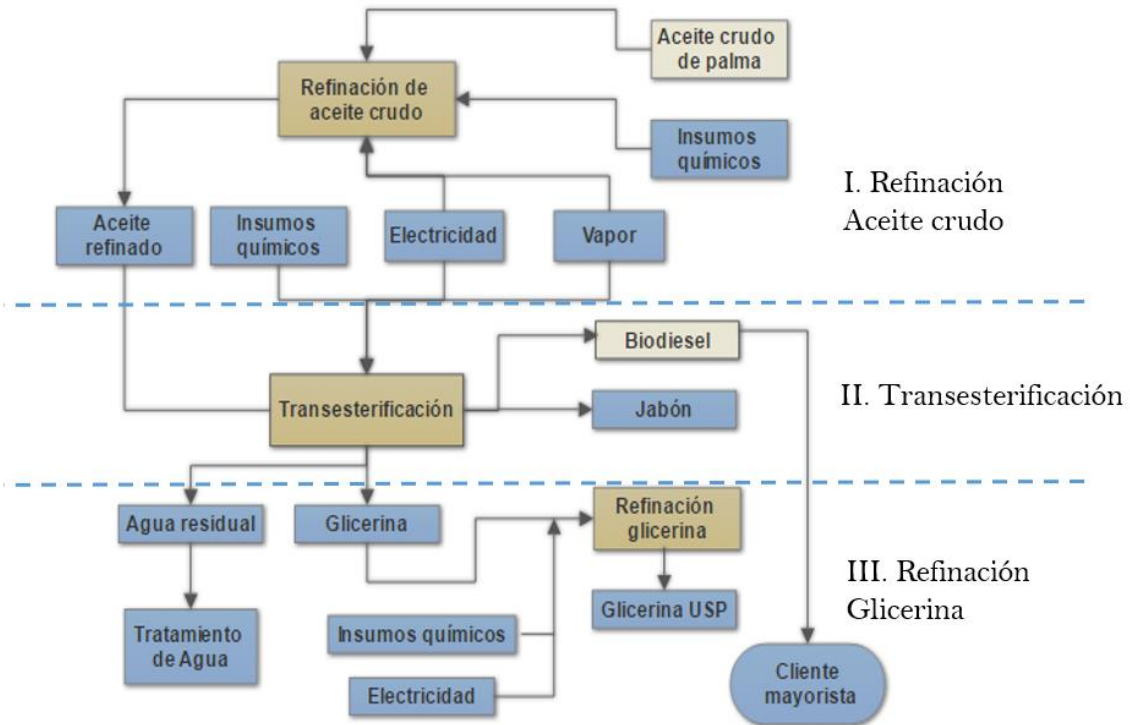
**Tabla 3-5:** Plantas productoras de Biodiesel en operación en Colombia.

<b>Compañía refinadora</b>	<b>Municipio</b>	<b>Capacidad (ton/año)</b>
Oleoflores	Codazzi, Cesar	50.000
Odin Energy	Santa Marta, Magdalena	36.000
Biocombustibles sostenibles del caribe	Santa Marta, Magdalena	100.000
Bio D	Facatativá, Cundinamarca	100.000
Aceites Manuelita	San Carlos de Guaroa, Meta	100.000
Ecodiesel	Barrancabermeja, Santander	100.000
TOTAL		486.000

Fuente: (Consortio CUE, 2012)

En la Figura 3.4 se presenta el diagrama de flujos del proceso de producción del biodiesel. Como se observa, el proceso tiene tres grandes fases: la refinación del aceite crudo de palma, la transesterificación del aceite y la purificación de los productos. En este se explica el esquema de refinación a partir de información primaria e información secundaria tomadas del estudio del consorcio CUE sobre ACV del biodiesel colombiano (Consortio CUE, 2012). El proceso comienza con el blanqueo del aceite de palma bruto, el cual es la materia prima principal para la producción de biodiesel. Para esto se introduce en un tanque de blanqueo donde se le agrega ácido cítrico y se hace pasar por tierras de blanqueo, con el fin de incrementar su estabilidad al eliminar los productos que promueven la oxidación del aceite y los pigmentos responsables del color del aceite. Luego del blanqueo se filtra el aceite, para retirar algunas impurezas aún presentes y las tierras de blanqueo agotadas, es decir, que han perdido su capacidad de absorción. En este punto el aceite blanqueado se lleva a un tanque desodorizador donde se retiran ciertos olores para dejarlo listo como aceite refinado RBD listo para usar en la etapa de transesterificación.

**Figura 3-4:** Diagrama de flujo en la planta de producción de biodiesel



Fuente: Elaboración propia.

La transesterificación depende del tipo de catálisis que se vaya a llegar a cabo, dado que puede hacerse ácida (con ácido sulfúrico) o básica (con metilato de sodio), que beneficia la reacción dependiendo del reactivo, la calidad, las condiciones del reactor, entre otras. En este punto el aceite RBD se mezcla dentro del reactor de transesterificación con el metanol, con lo cual los ésteres son transformados en biodiesel y también glicerina como subproducto. Dado que ambos son productos importantes, se le hace un tratamiento de separación y eliminación de impurezas hasta llegar a las especificaciones comerciales. Para esto, el biodiesel se dirige a una centrifuga en el cual la diferencia de densidades separa el producto deseado de las impurezas y luego se lleva a una torre de secado para retirar la humedad necesaria, con lo cual el producto terminado se almacena en diferentes tanques de almacenaje listos para su distribución.

La glicerina (mezcla de glicerol y otros oleínas), el subproducto principal de la reacción, tiene un mercado específico en la industria cosmética, pero las especificaciones lo requieren en grado USP (United States Pharmacopea). Cuando sale del reactor, la glicerina se y se pasa por un proceso de secado y se almacena como glicerina cruda (Cardeño, F., Gallego, L. J., & Rios, L., 2011); Luego se pasa a una columna de secado para ajustarla a las condiciones de diseño de la columna de destilación, el fondo es llevado a un evaporador, donde se quedan las sales y se recircula la glicerina que se haya ido al fondo de nuevo a la torre de destilación; los productos de cima se desodorizan y luego pasan por una serie de tanques con carbón activado, que termina de remover algunos compuesto volátiles hasta llevarla a las condiciones necesarias del grado USP (Consortio CUE, 2012).



## 4. Capítulo 4: Metodología para la sostenibilidad del biodiesel

### 4.1 Marco metodológico

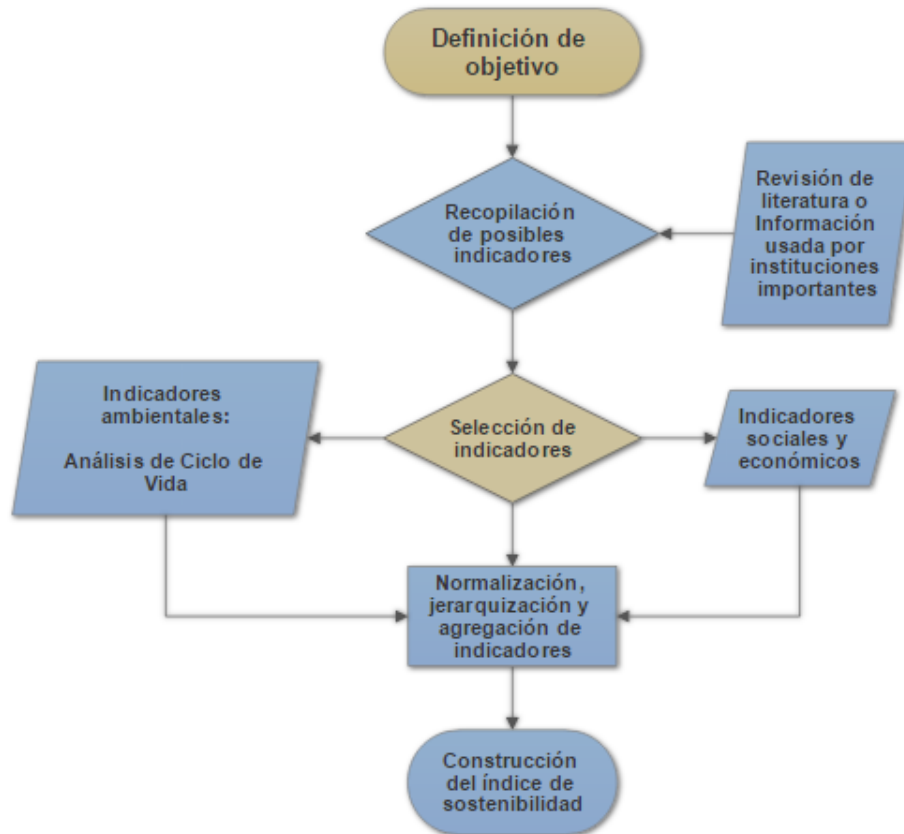
Este trabajo tiene como objetivo evaluar la sostenibilidad de la cadena productiva del biodiesel en el departamento del Meta, proponiéndose la creación de un índice de sostenibilidad conformado por un análisis de ciclo de vida en los principales municipios del sector palmero y de información socioeconómica de éstos.

En la construcción de indicadores sintéticos o índices, es importante la metodología usada para la jerarquización de cada uno de los indicadores que lo conforman, dado que esta es susceptible de manipulación o falta de coherencia, lo que hace que éstos sean mirados con cierta desconfianza por los economistas o estadistas si no tienen una base teórica fuerte (Nardo, M., et al., 2005); La base teórica de las metodologías de jerarquización y agregación se resumen en el Anexo 2. Algunos autores sugieren una serie de pasos que doten al proceso de construcción de los índices de una coherencia y fortaleza lógica (Nardo, M. et al. 2005a, 2005b; Sánchez, G., 2009). Teniendo en cuenta lo anterior, el índice de sostenibilidad del biodiesel en el Meta (ISBM), pretende ser un dato cuali-cuantitativo del desempeño sostenible del renglón productivo de biodiesel en la región de estudio, y se construye a través de los pasos que se muestran en la figura 4.1.

Las dimensiones de la sostenibilidad estarán representadas por una serie de indicadores que se muestran en la siguiente sección y se van a integrar mediante la técnica de agregación *proceso analítico jerárquico* (AHP por sus siglas en inglés), normalizando los datos mediante el método de min-máx. Los datos para el Análisis de ciclo de vida y algunas otras informaciones que contextualizan este trabajo se obtuvieron a través de visitas de campo y entrevistas a dos plantas extractoras de aceite de palma y varios municipios de vocación palmera en el mes de octubre del año 2016. Cabe aclarar que el ACV es en sí una metodología para tratar de explicar la sostenibilidad desde un punto de vista meramente energético y físico-biótico y que no sería suficiente para abarcar lo que es sostenibilidad para este trabajo, por lo que en este caso será solo una herramienta técnica para obtener una serie de indicadores que nutran el índice esperado y que de cierta forma dé un soporte cuantitativo para los resultados del análisis. Dadas las dimensiones de un ACV, en este capítulo se muestra el resumen del análisis de inventario

para realizar el cálculo de los indicadores que harán parte del ISBM y no se profundizará mucho en otros aspectos concernientes a dicha metodología, evitando así restar claridad sobre la metodología de construcción del índice de sostenibilidad.

**Figura 4-1:** Diagrama explicativo para la construcción del índice de sostenibilidad



Fuente: Elaboración propia.

La idea general del ISBM es que sirva como base para la construcción futura de otros índices o el mejoramiento del presente y logre explicar la complejidad de los beneficios y desventajas de índole ambiental o social que tiene la industria palmera y de biodiesel en el departamento del Meta, en el contexto de crecimiento del sector agroindustrial. Para ello es indispensable establecer una línea base de indicadores de fácil seguimiento o disponibilidad para alimentar el ISBM, en el que por definición, su mejor valor es una medida de buena integración o armonía entre el manejo técnico y energético del procesamiento de la palma de aceite y biodiesel, manejo económico de los ingresos

palmeros municipales y la presencia de infraestructura mínima para cubrir las necesidades básicas de la población.

El contexto estudiado permite el desarrollo de un marco conceptual para el objetivo del proyecto, pasando a ser el vector principal para la selección de unos indicadores base que aporten a la alternativa planteada, posteriormente se lleva a cabo un análisis en dónde se escoge un grupo de esos indicadores y se normalizan sus valores (para hacerlos comparables). Luego jerarquizan los datos, es decir, se realiza una asignación de pesos a cada dimensión tenida en cuenta y se agregan matemáticamente, con lo cual es posible calcular la alternativa que resuelve el objetivo inicial, en este caso el ISBM.

Según Sánchez G. (2009) los principales métodos de normalización de indicadores para la construcción de índices son el método min-máx y la normalización z-score, dado que además de ser generalizados, presentan características que facilitan la posterior agregación de datos(Sánchez, G., 2009).

El método min-máx es un método sencillo donde el factor de la escala se mide en distancia y no por desviaciones estándar. En este sentido, el rango de todos los posibles valores está entre 0 y 1, siendo 0 el valor mínimo observado y 1 el valor máximo observado. Dependiendo de si el valor  $X_i$  esperado para el indicador es un mínimo ( $X_{\min}$ ) o un máximo( $X_{\max}$ ), cambiará la manera en que se calcula; a continuación se muestran las ecuaciones para cada uno de los casos (Phillis, Y. A. & Andriantiatsaholiniaina, L. A., 2001):

Cuando el valor objetivo del indicador es un máximo,

$$N(X_i) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & \text{si } X_i < X_{\max} \\ 1 & \text{si } X_i \geq X_{\max} \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

Si el valor objetivo es un mínimo,

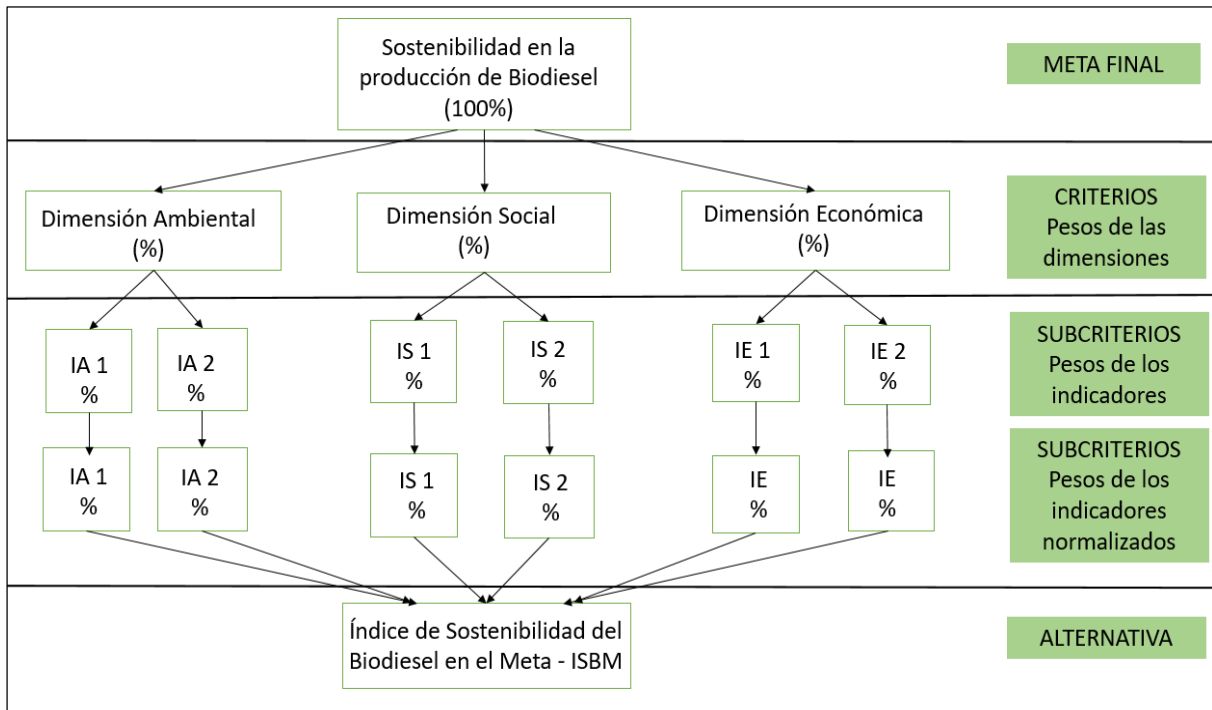
$$N(X_i) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{si } X_i \leq X_{\max} \\ \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} & \text{si } X_i > X_{\max} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Donde  $N(X)$  es la función de normalización,  $X_i$  es el valor del indicador  $i$ ,  $X_{\max}$  es el valor máximo en la serie de datos del indicador y  $X_{\min}$  es el valor mínimo observado en la serie

de datos del indicador. Dadas las ventajas del uso de este método, será el usado para normalizar los datos en el presente trabajo.

La jerarquización de las dimensiones del ISBM se hace a través del proceso analítico jerárquico (AHP), teniendo en cuenta información en la literatura en el mismo renglón productivo y el contexto específico del país. Este método consta de tres etapas principales: la modelización, la valoración y la priorización y síntesis. La modelización consiste en construir una figura jerárquica donde se incluyen todos los aspectos a considerar dentro del objetivo, en este sentido, se debe tener al menos tres niveles: la meta final, en este trabajo llamada sostenibilidad de la cadena productiva del biodiesel (primer nivel), los criterios intermedios de decisión, que en este caso serían las dimensiones de la sostenibilidad más los indicadores que se desprenden de éstas (segundo nivel) y por último las alternativas, que para efectos de este trabajo es el Índice de Sostenibilidad del Biodiesel en el Meta como tal (Ver Figura 4.2). En la metodología AHP los niveles de los cuales dependan otros se llaman nodos y el nivel final, alternativas, puesto nadie es dependiente de él (Sánchez, G., 2009).

**Figura 4-2:** Modelo jerárquico mediante método AHP para el desarrollo del ISBM.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de establecer la estructura jerárquica, sigue la etapa de valoración. En esta etapa consiste en condensar los juicios de valor de los expertos en el área específica que se está analizando, lo cual se puede hacer mediante procedimientos numéricos o gráficos (Saaty, T. L., 1980). En el trabajo de sostenibilidad agrícola de Sánchez G. se utiliza el método verbal, haciendo que cada uno de los expertos asigne un valor numérico entre 1 y 9 a cada categoría y subcategoría de la sostenibilidad que luego es comparada por pares mediante un matriz de comparación construida con valores cardinales, de la cual luego se sacará el peso relativo de cada nodo.

Por último, la metodología AHP utiliza la información de la valoración y prioriza mediante procedimientos estadísticos como la media geométrica por filas (Saaty, T. L., 1980), asignando los pesos de cada indicador según la suma de los juicios de cada decisor de la forma que se muestra a continuación:

$$W_{im} = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ijm}} \quad \forall i, m, j \in n \quad (4)$$

Donde  $W_{im}$  es el peso real del criterio o subcriterio  $i$  para el decisor  $m$ ;  $a_{ijm}$  es juicio comparado del criterio o subcriterio  $i$  sobre el criterio o subcriterio  $j$  del mismo nivel jerárquico otorgado por el decisor  $m$  y  $n$  es el número de nodos que conforman el nivel jerárquico.

Como se puede deducir, los juicios de expertos son los más cercanos o posibles de realizar en el ámbito académico, pero para integrar a la toma de decisiones en cuanto a los pesos a la sociedad, que es parte fundamental de cualquier problema agrario y/o productivo a analizar, los costos y tiempos del proyecto se incrementarían considerablemente, por lo que en este trabajo se seguirá el consejo de Sánchez G. y se tomarán como referencia trabajos realizados anteriormente que tengan puntos en común, áreas de conocimiento y contextos de análisis parecidos (Sánchez, G., 2009). En esta línea, en el siguiente capítulo se mostrará la manera en la cual se asignarán los pesos para las dimensiones de la sostenibilidad según la literatura acorde a las condiciones de este trabajo.

Teniendo el modelo jerárquico diseñado con sus respectivos pesos, el único paso que faltaría para la obtención de la alternativa, que en este caso es el ISBM, es la agregación

de los indicadores que conforman las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. Existen varios métodos de agregación, entre ellos los de tipo aditivo y los de tipo multiplicativo. En este trabajo se utilizará el método aditivo de suma ponderada de indicadores, dado que es usado en la literatura bajo el supuesto de que los indicadores simples son independiente entres si o tienen baja correlación(Sánchez, G., 2009; UPRA, 2014). En la ecuación 5 se resume la manera en la que se calcula el ISBM bajo el método de agregación indicado.

$$ISBM = \sum_{i=1}^i W_i X_i \quad (5)$$

Donde ISBM es índice de sostenibilidad que se plantea como alternativa de la metodología AHP,  $i$  es uno de los indicadores escogidos,  $W_i$  es el peso del indicador y  $X_i$  es el valor del indicador normalizado.

## 4.2 Indicadores base

Siguiendo la ruta metodológica, el siguiente paso es la presentación inicial de un grupo base de indicadores y su posterior selección. A continuación se dará una pequeña descripción de varios indicadores económicos, sociales y ambientales, que podrían aportar al análisis de la situación específica que está siendo estudiada, y en últimas hacer parte del ISBM.

- **Producto Interno Bruto (PIB):** Este es tal vez el indicador económico más usado en el mundo, dado que mide la producción monetaria de un país; en este caso se usaría la variación municipal para tener en cuenta solo los flujos de cada municipio.
- **Índice de Ingreso Municipal (IIM):** Es la relación entre los ingresos fiscales del municipio sobre los ingresos corrientes, por lo que entre más cercano a 1 el valor, más ingresos tiene el municipio. (Castiblanco, C., 2014).

- **Coefficiente Gini de tierras (GINI\_T):** Indica el grado de concentración de propiedad de la tierra en áreas rurales. Entre más cercano a 1 mayor concentración de tierras en pocos individuos. (IGAC, 2012)
- **Índice de precios al consumidor (IPC):** El IPC representa el comportamiento del costo promedio de una canasta de bienes y servicios representativa del consumo final, en relación a un periodo y su determinada inflación. <sup>3</sup>
- **Índice de Desarrollo Humano (IDH):** Es un indicador social desarrollado por el PNUD que consta de tres parámetros principalmente: vida larga y saludable, educación y nivel de vida digno(PNUD, 2014b).
- **Índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI):** Según el ICESI es la cantidad de personas por hogar contra el total de viviendas que tiene al menos una necesidad insatisfecha. Este indicador es una medición de la pobreza estructural, es decir, que un aumento en el ingreso del hogar no lo hará salir de las condiciones de insatisfacción de necesidades básicas o pobreza (ICESI, s. f.)
- **Índice de violencia (INDV):** Mide la intensidad de la violencia, teniendo en cuenta los indicadores de intensidad del desplazamiento e intensidad de homicidio. Entre más cercano a uno menos violento el municipio (Castiblanco, C., 2014).
- **Índice de Pobreza Multidimensional (IPM):** Se construye como la combinación del porcentaje de personas consideradas pobres, y de la proporción de dimensiones en las cuales los hogares son, en promedio pobres (DNP, 2011)
- **Seguridad Social Trabajadores Palmeros:** Como tal no es un indicador establecido oficialmente por algún ente o investigador, pero se refiere al cubrimiento de seguridad social de trabajadores palmeros, subsidiada o por cuenta propia.
- **Huella hídrica (HH):** La huella hídrica calcula la cantidad de agua necesaria para elaborar una unidad de producto, teniendo en cuenta toda la cadena de suministro<sup>4</sup>.
- **Potencial de calentamiento global (IPCC 2007):** Calcula las emisiones de CO<sub>2</sub> en toda la cadena del producto mediante la metodología IPCC 2007, desarrollada por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (Buitrago R., 2014).

---

<sup>3</sup> Tomado de: <http://www.banrep.gov.co/es/ipc>

<sup>4</sup> Tomado del sitio web <http://www.huellahidrica.org/>

- **Demanda acumulada de energía (DAE):** Cuantifica la energía consumida directa o indirectamente en el ciclo de vida de un producto. Generalmente se expresa en energía (MJ) sobre kilogramos de producto<sup>5</sup>.
- **Eco-indicador 99 (E99):** Es un indicador que cuantifica los impactos ambientales de un producto bajo el análisis de diferentes categorías como la salud humana, la calidad de los ecosistemas y el uso de recursos naturales (Buitrago R., 2014).

Haciendo una revisión de los indicadores de tipo económico, se descarta de entrada el PIB municipal por razones de acceso a la información a esa escala, y se propone remplazar por el IIM del municipio, dado que este tiene en cuenta los ingresos fiscales de la industria local, entre ellos el del sector palmero. También se descarta el índice de precios al consumidor, debido a que se encuentra desagregado a nivel departamental y las diferencias de precios en los municipios palmeros son grandes por las dinámicas socioeconómicas y socioculturales específicas de cada uno de ellos. Se escogerá como indicador base el GINI\_T dado que da una medida social relacionada intrínsecamente con procesos económicos de acumulación de tierras propios de la agroindustria y el Departamento del Meta.

En el caso de la dimensión social, la parte que explique las condiciones de pobreza municipal se hará mediante el indicador NBI en vez del IDH e IPM, por cuestiones de acceso a la información y para no caer en doble contabilidad a la hora de armar el índice objetivo; también se quiere ver la estabilidad de orden público en los municipios palmeros o acceso a la salud, por lo que el INDV será utilizado y la parte de seguridad social será abordada más que todo para enriquecer el contexto social, dado que como se comenta en el capítulo anterior, las condiciones de tercerización particulares de la zona son un tema complejo que resta estabilidad a los obreros de la palma.

Los indicadores ambientales para este trabajo apuntan a dos metas: la primera, a tratar de describir el total de emisiones de dióxido de carbono equivalente en el proceso, dado que este es un dato que da indicios del impacto de algún proceso sobre el calentamiento global y segundo a hacer un sumario de la energía utilizada en la producción del biodiesel, desde que se crearon los insumos necesarios para el cultivo y la refinación, la

---

<sup>5</sup> Tomado del sitio web <http://www.ecosmes.net/>



energía usada en los procesos de producción, entre otros, con el fin de ver cómo esta cadena productiva en particular hace uso de los recursos energéticos para producir una unidad de biodiesel. Siguiendo estas metas, la información de los inventarios y los datos en la literatura con los cuales se puede comparar en la etapa de análisis de resultados, se decide escoger el Potencial de Calentamiento Global (IPCC2007) y la Demanda Acumulada de Energía (DAE), indicadores energéticos que miran la cantidad de CO<sub>2</sub> generado en comparación con la cantidad de producto producido y la cantidad de energía en MJ que se utiliza en algún proceso por unidad de energía productiva, respectivamente. La tabla 4.1 resume los indicadores seleccionados, la fuente de información y la temporalidad de cada uno de ellos.

**Tabla 4-1:** Resumen del periodo de estudio y fuente de los indicadores base

Indicador	Periodo	Fuente
Índice de Ingreso Municipal (IIM)	1993, 2000, 2005, 2009	Castiblanco, C. (2014)
Gini de tierras (GINI_T)	2000, 2005, 2009	IGAC (2012)
Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	1993, 2000, 2005, 2009	Castiblanco, C. (2014)
Índice de Violencia	1993, 2000, 2005, 2009	Castiblanco, C. (2014)
IPCC	2000, 2009, 2016	Consortio CUE (2012) y Ecoinvent 3.3
DAE	2000, 2009, 2016	Consortio CUE (2012) y Ecoinvent 3.3

Fuente: Elaboración propia.

### 4.3 Análisis de ciclo de vida

Un Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta importante a la hora de mostrar los impactos ambientales y el balance energético de cualquier proceso productivo. Debido a su alcance, es una herramienta muy utilizada a nivel mundial, lo que llevó a que la organización ISO publicara algunas normas que estandarizan de cierta manera la forma y metodología a aplicar a la hora de abordar un ACV. Según la norma internacional ISO 14000, un ACV debe desarrollarse teniendo en cuenta los siguientes elementos: definición

de objetivos, análisis de inventario, análisis de impacto y la interpretación de los resultados. Dicho esto, es necesario considerar el alcance del sistema a estudiar, es decir, el objeto de estudio que se quiere analizar y sus alrededores, para poder cuantificar todos los flujos y ganar precisión en los resultados; esta etapa se estandariza bajo la norma ISO 14040. Luego de haber definido el objetivo, se debe hacer una lista de los flujos másicos y energéticos del sistema identificado, lo que toma el nombre de análisis de inventario y se trabaja en la ISO 14041. El análisis de impacto se refiere al análisis de las categorías de impacto ambiental que se van a calcular en el ACV y que van de la mano de los objetivos planteados; esta etapa se explica en la ISO 14042 (Romero, B. I., 2013).

### **4.3.1 Alcance y objetivos**

El objetivo central del trabajo no es el ACV, pero este es una pieza fundamental para dar nociones sobre el comportamiento ambiental y energético de la cadena productiva del biodiesel y luego integrarlo en un análisis multidimensional. En este orden de ideas, el objetivo específico de este análisis de ciclo de vida es calcular el potencial de calentamiento global, es decir, las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el ciclo de vida y el consumo energético neto de energía, ósea, la demanda energética de la cadena productiva del biodiesel en las etapas de cultivo, extracción, producción del biodiesel y su transporte hasta la ciudad de Bogotá.

El alcance del estudio será de tipo de la cuna a la puerta o “Cradle to gate”, es decir, se tendrá en cuenta los procesos mostrados en la Figura 3.3 y 3.4, el transporte de los insumos necesarios en dichos procesos y el transporte del producto terminado hasta la ciudad de Bogotá.

Para lograr cumplir los objetivos es necesario el acceder a bases de datos especializadas, las cuales son una recopilación de información estandarizada de procesos, flujos, y gastos energéticos contextualizados en cierta ubicación geográfica, que puede ser de referencia global, hasta regional y local. La base de datos utilizada en este trabajo es la Ecoinvent 3.3, con licencia académica otorgada para países no pertenecientes a la OCDE; esta base está construida con más de 12.800 bases de datos y tiene un inventario de emisiones para más de 4000 procesos, además de contar con alrededor de 40 métodos de análisis de impacto, lo que la hace bastante robusta (Buitrago R., 2014).

### 4.3.2 Análisis de inventario

Los datos para el análisis de ciclo de vida de biodiesel se basan en inventario específico para la zona oriental publicado por el Consorcio CUE (2012), información primaria de dos plantas extractoras de aceite de palma ubicadas en el departamento del Meta y algunos flujos fueron calculados a partir de información del US Environmental Protection Agency (EPA), la base de datos Ecoinvent para la producción de aceite y algunos datos del trabajo de Buitrago, T (2014). Los flujos de entrada y de salida para el proceso de extracción de aceite se pueden ver en la Tabla 4.2, teniendo en cuenta que se calcularon con base de 100 toneladas de RFF en la entrada del proceso.

**Tabla 4-2:** Datos de inventario para la extracción de aceite de palma.

ENTRADAS			SALIDAS		
Flujo	Unidad	Valor	Flujo	Unidad	Valor
Racimos fruto fresco	ton	100,00	Aceite crudo de palma	ton	21,38
Agua	ton	109,84	Tusa	ton	21,34
Electricidad	kWh	740,12	Aceite de palmiste	ton	2,00
Electricidad (red)	kWh	1358,1	Harina de palmiste	ton	2,86
Electricidad (Diesel)	kWh	19,08	Aguas residuales	ton	97,17
Vapor	ton	43,35	Fibra	ton	13,16
			Cáscara de las	ton	7,90

Fuente: Consorcio CUE (2012), Buitrago, T. (2014).

Con estos flujos es posible calcular las emisiones específicas de cada insumo, y hacer el balance de emisiones para la etapa de extracción en particular. En cuanto al cultivo, se toman los valores de emisiones en la producción de fertilizantes y pesticidas enunciados en la Tabla 3.4 y se calcula los indicadores del ACV por kg de biodiesel producido finalmente, sabiendo que aproximadamente se produce una tonelada de biodiesel por cada hectárea de palma sembrada (Empleado palmero, 2016). Las palmas de aceite tienen una absorción de CO<sub>2</sub> considerable, por lo que se tiene en cuenta esta capacidad específica de la planta para hacer los cálculos de emisiones (que serán negativas dado que se absorbe). Las 97,7 toneladas de aguas residuales ricas en carga orgánica, son utilizadas en algunas plantas para la cogeneración de energía a partir del metano extraído en biodigestores anaerobios, por lo la cantidad de emisiones para las que apliquen esta tecnología va a disminuir considerablemente.

**Tabla 4-3:** Resumen del flujos másicos y energéticos para la producción de una tonelada de biodiesel

<b>Flujo</b>	<b>Unidad</b>	<b>Magnitud</b>
<b>Entradas Refinación aceite</b>		
Aceite crudo de palma	ton	1,04
Ácido cítrico	kg	0,77
Arena de blanqueo	kg	5,01
Hidróxido de Sodio	kg	0,34
Electricidad (Red)	kWh	14,09
Agua	kg	179,24
Vapor	kg	477,27
<b>Entradas Producción Biodiesel</b>		
Aceite refinado	ton	1,00
Metanol	kg	108,65
Metóxido de sodio	kg	18,15
Ácido cítrico	kg	0,68
Ácido sulfurico	kg	0,18
Ácido clorhídrico	kg	7,69
Hidróxido de Sodio	kg	0,48
Ácidos grasos	kg	11,92
Electricidad (Red)	kWh	28,18
Vapor	kg	361,42
<b>Salidas de la producción y refinamiento</b>		
Biodiesel	kg	1.000,00
Glicerina cruda	kg	137,40
Jabón	kg	50,80
Agua residual	kg	76,20
Sedimentos	kg	1,30
Perdida metanol	kg	0,40

Fuente: Elaboración propia a partir de Consorcio CUE (2012)

En la planta de producción de biodiesel, los flujos son calculados sobre la base de producción de una tonelada de biodiesel; En la Tabla 4.3 se hizo un resumen del balance de masa y energía, mostrando los insumos necesarios para su procesamiento, la energía utilizada en el refinamiento de biodiesel y la utilizada en el refinamiento de la glicerina, la cual es alta debido al gran gasto que representa la destilación de éste compuesto.

Con base en las cantidades de insumos y el impacto ambiental inherente a cada uno de estos se calculan los indicadores ambientales seleccionados, sumando a ello los gastos energéticos de los procesos (refinación aceite, producción biodiesel y refinación de glicerina).

Los cálculos de emisiones para el transporte en este estudio se van a hacer para cada pueblo palmero seleccionado, suponiendo que su producción de aceite de palma es destinada a la producción de biodiesel. Para esto se calcula el potencial de calentamiento de un camión de 32 toneladas cargado de aceite o de biodiesel con un consumo de combustible de 0,32L/km. En la Tabla 4.4 se condensa la información de emisiones para el transporte según la distancia total de cada municipio, siendo esta última la suma entre la distancia del municipio a la planta productora de biodiesel y de la planta de biodiesel a la cual envió su aceite hasta la ciudad de Bogotá, donde se hace la mezcla y se vende.

**Tabla 4-4:** Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte de aceite y biodiesel por municipio.

Municipio	Emisiones (kgCO <sub>2</sub> /kg biodiesel)	Distancia total (km)
Acacías	6,50	201
Barranca Upía	9,96	308
Cabuyaro	10,4	323
Cumaral	9,18	284
Granada	8,80	272
Mapiripán	17,6	543
Puerto Gaitán	12,7	392
San Martín	8,45	261
San Carlos de	5,53	171

Fuente: Esta investigación

El cambio en el uso del suelo será considerado a partir de la información de inventario suministrada en el estudio del Consorcio CUE (2012), donde se calcula el cambio del carbono como la diferencia de carbono en la biomasa superficial del suelo (Above Ground Biomass, AGB), la biomasa por debajo del suelo (Below Ground Biomass, BGB) y el carbono orgánico del suelo (Soil Organic Carbon, SOC), que hay antes y después de la plantación de la palma de aceite (Tabla 4.5). Las reservas de carbono se analizan sobre un periodo de 20 años, tomando el año 2000 como referencia, por lo tanto en este análisis no se toma en cuenta las plantaciones ya establecidas antes de la fecha.

**Tabla 4-5:** Balance de carbono en cambio del uso de la tierra en la región oriental en toneladas de carbono por hectárea.

<b>Tipo Carbono</b>	<b>Antes</b>	<b>Después</b>
AGB	20,82	44,00
BGB	6,58	13,50
SOC	50,00	57,50
TOTAL	77,40	115,00

Fuente: Consorcio CUE (2012)

Teniendo en cuenta el periodo de 20 años, la diferencia de carbono antes y después del cultivo de palma y la cantidad de carbono que tiene un kilogramo de RFF, se obtiene una diferencia de 35 ton CO<sub>2</sub>/ton RFF, lo que muestra un cambio positivo en absorción de CO<sub>2</sub> respecto al uso anterior.

## 5. Capítulo 5: Resultados y análisis

### 5.1 Análisis del componente energético/ambiental

Los indicadores que se tuvieron en cuenta finalmente para el análisis de la dimensión ambiental/energética del ISBM se muestran en la sección 4.2, resultando finalmente escogidos el Potencial de Calentamiento Global o IPCC2007 (Kg CO<sub>2</sub>eq / Kg biodiesel) y la Demanda Acumulada de Energía o DAE (MJ / Kg biodiesel). La Tabla 5.1 muestra los resultados del análisis de ciclo de vida para el indicador de IPCC2007 dividiendo las contribuciones en varios elementos constitutivos del sistema, que son los que aportan casi la totalidad de la magnitud del indicador y que se calcularon bajo las condiciones promedio planteadas en el Estudio del consorcio CUE sobre el ACV del biodiesel en Colombia, tomando en cuenta sólo la zona oriental.

**Tabla 5-1:** Resultados de IPCC2007 para los principales municipios palmeros del Meta.

Potencial de Calentamiento Global en kgCO <sub>2</sub> eq/ kg de biodiesel						
Municipio	Trans	EFert	CultP	ProdB	TratAg	Total
Acacías	6,50E-03	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	9,60E-01	5,27E-01
Barranca	9,96E-03	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	-2,49E+00	-2,92E+00
Cabuyaro	1,04E-02	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	-2,49E+00	-2,92E+00
Cumaral	9,18E-03	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	9,60E-01	5,29E-01
Granada	8,80E-03	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	9,60E-01	5,29E-01
Mapiripán	1,76E-02	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	9,60E-01	5,38E-01
Puerto	1,27E-02	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	9,60E-01	5,33E-01
San Martin	8,45E-03	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	9,60E-01	5,29E-01
San Carlos de Guaroa	5,53E-03	3,37E-01	-1,07E+00	2,93E-01	-2,49E+00	-2,92E+00
Optimo	5,53E-03	2,36E-01	-1,18E+00	2,34E-01	-2,49E+00	-3,19E+00

Fuente: Elaboración propia.

Para la tabla anterior, la columna 1 se refiere al transporte del aceite crudo desde las fincas hasta la planta refinadora, que para todos a excepción de Barranca de Upía es la planta de Aceites Manuelita S.A en San Carlos de Guaroa, la columna 2 hace referencia a las emisiones provocadas por los fertilizantes que no logra aprovechar el cultivo, la tercera representa la captación de CO<sub>2</sub> por parte de la palma de aceite, la cual se supuso constante en los municipios estudiados dadas las similitudes en el cambio del uso del

suelo para estos cultivos, la número 4 se refiere al potencial de calentamiento global del procesamiento de biodiesel, el cual se incrementa considerablemente por los gastos energéticos y emisiones del proceso de refinación de glicerina y por último la columna número 5 representa el IPCC2007 que tienen las plantas extractoras al momento de tratar la DBO de las aguas residuales del proceso, el cual es alto debido a la gran cantidad de metano que es liberado a la atmósfera. Como se observa en la tabla anterior, los valores de TratAg son negativos en tres municipios, lo que se debe a que en estas plantas de extracción se emplea tecnología de recuperación de metano mediante biodigestores, dicho valor fue obtenido en la literatura siguiendo el trabajo de Buitrago, T. (2014) donde también se calcula el aporte energético que tiene la incorporación de ésta tecnología a otras partes del proceso de producción de biodiesel. La Columna de transporte se calculó con las emisiones generadas por el transporte de un camión de 32 ton en la distancia correspondiente entre el municipio y San Carlos de Guaroa más, el transporte del biodiesel hasta la ciudad de Bogotá, lugar donde se hace la mezcla con el diésel convencional.

A partir de los datos de inventario de la sección 4.3 se calcula la demanda acumulada de energía (DAE) a través del ciclo de vida del biodiesel (Tabla 5.2), teniendo en cuenta los principales aportes de procesos sobre el indicador final.

**Tabla 5-2:** Resultados DAE para los principales municipios palmeros del Meta.

Demanda acumulada de energía en MJ/ kg de biodiesel						
Municipio	RefGlic	InPB	Trans	PPest	PFert	Total
Acacías	1,36,E-01	6,96,E+00	3,72,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	13,76
Barranca Upía	9,40,E-01	6,96,E+00	5,11,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	15,95
Cabuyaro	1,36,E-01	6,96,E+00	5,69,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	15,73
Cumara	1,36,E-01	6,96,E+00	5,06,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	15,10
Granada	1,36,E-01	6,96,E+00	4,86,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	14,91
Mapiripán	1,36,E-01	6,96,E+00	9,25,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	19,29
Puerto Gaitán	1,36,E-01	6,96,E+00	6,81,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	16,85
San Martín	1,36,E-01	6,96,E+00	4,69,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	14,73
San Carlos de Guaroa	1,36,E-01	6,96,E+00	3,23,E+00	1,26,E-01	2,82,E+00	13,27
Optimo referencia	1,22,E-01	4,87,E+00	2,91,E+00	1,13,E-01	2,54,E+00	10,55

Fuente: Elaboración propia

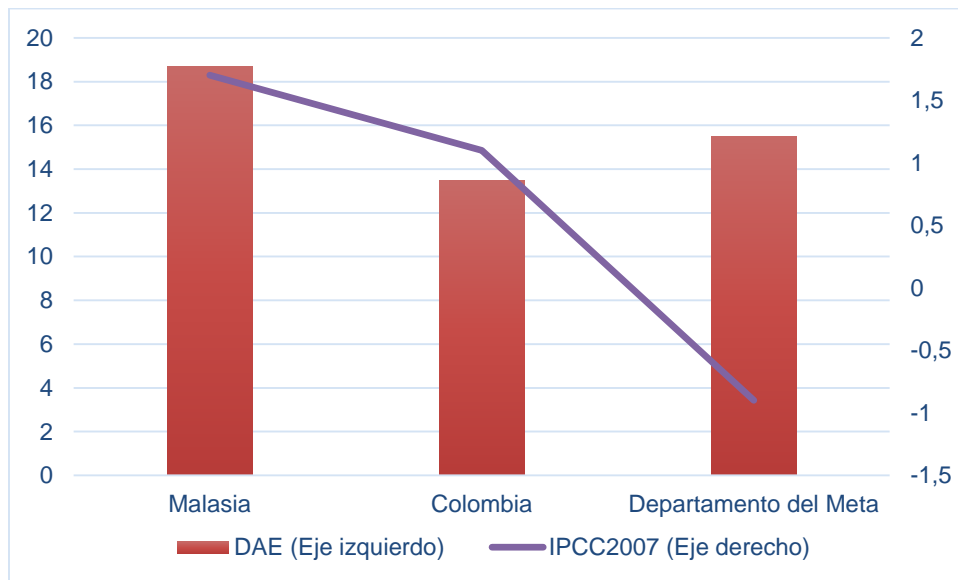
En este caso “RefGlic” se refiere al aporte del proceso de refinación de glicerina, el cual como ya se había comentado, tiene unos requerimientos energéticos para la destilación



bastante elevados, “InPB” se refiere a los insumos para la producción de biodiesel, que pasan principalmente por el metanol usado, su transporte, la importación de algunos materiales como las tierras de lavado y la energía del proceso (Consortio CUE, 2012), “Transporte” corresponde a la suma del DAE de transportar el aceite de palma hasta la planta refinadora y luego el biodiesel hasta la ciudad de Bogotá, “PPest” a la producción de los pesticidas utilizados en la etapa de cultivo y “PFert” a la producción de los pesticidas usados para aumentar la productividad del cultivo. Claramente se ve que el mayor demandante de energía, si se da un uso exclusivo de la producción de aceite crudo de palma para el de biodiesel, es el municipio de Mapiripán, Meta, situación que puede explicarse a partir de las grandes distancias que las operaciones de compra de insumo y venta de aceite implicarían. En este caso las columnas de InPB, PPest y PFert son iguales, dado que se usaron datos promedio para el cálculo de los valores y se tiene en cuenta el tema de las distancias en el apartado de transporte.

Buitrago (2014) compara los valores del análisis de las categorías de impacto con esos valores para Malasia, según los datos que obtuvo en la base de datos de Ecoinvent para ese país. En la Figura 5.1 se comparan los resultados de estos dos trabajos con los resultados del IPCC2007 y DAE calculada en el presente trabajo.

**Figura 5-1:** Comparación de resultados IPCC2007 y DAE para biodiesel entre Meta, Colombia y Malasia.



Fuente: Elaboración propia con datos de Buitrago, T. (2014).

La comparación muestra que el IPCC2007 promedio para los cultivos en el Meta es de -0,9 kg CO<sub>2</sub> /kg de biodiesel, es decir, el balance de emisiones equivalente de CO<sub>2</sub> no es emisor sino captador de dióxido de carbono. Esto ocurre principalmente porque el aporte en el promedio de las grandes plantas extractoras con tecnología de captura de metano en el tratamiento de aguas mejora el desempeño general del departamento, lo que lo hace mejor comparativamente a Malasia, que presenta emisiones de 1,7 kg CO<sub>2</sub> eq/ kg biodiesel, lo que se explica en parte porque en ese país la gran mayoría de plantaciones se hicieron sobre selva tropical. Por otro lado, la demanda acumulada de energía del departamento del Meta tiene un mejor comportamiento que el de Malasia, pero no menos al promedio Colombiano, lo que se debe en gran medida a que al considerar a todos los municipios palmeros del Meta como potenciales proveedores de aceite crudo para la refinación del biodiesel, se acepta el incremento en las distancias, el uso de tecnología menos amigable ambientalmente y mayor trayecto para transporte de insumos, que es el principal aportante al cálculo referido.

## **5.2 Construcción del índice de sostenibilidad del biodiesel en el Meta**

### **5.2.1 Compilación de indicadores socioeconómicos**

A partir de los indicadores iniciales considerados en el apartado 4.2 del capítulo anterior, se hace la búsqueda de información secundaria correspondiente para la elección de los indicadores que hacen parte del índice. Como resultado de esto, se encuentra que uno de los principales obstáculos al realizar estudios a nivel municipal en Colombia es la falta de datos desagregados de toda índole, dado que los últimos consolidados y públicos se encuentran para el 2005, año del último gran censo del país.

En este caso, los datos socioeconómicos de los municipios palmeros del Meta se obtuvieron de Castiblanco C. (2014) y se plantean como los índices finales dado que el análisis estadístico realizado en el estudio, demuestra que la correlación entre ellos es baja y por ende, son representativos en la información que puede brindar su análisis.

**Tabla 5-3:** Información socioeconómica de los principales municipios palmeros del Departamento del Meta entre el año 1993 y 2009.

<b>Año</b>	<b>MUNICIPIO</b>	<b>NBI</b>	<b>GINI</b>	<b>INDV</b>	<b>IIM</b>
1993	Acacías	34,06	-	0,85	2,63
2000	Acacías	-	0,77	0,80	0,08
2005	Acacías	22,68	0,78	0,76	0,81
2009	Acacías	22,68	0,76	0,72	0,84
1993	Barranca de Upía	55,30	-	0,92	4,65
2000	Barranca de Upía	-	0,72	0,92	0,18
2005	Barranca de Upía	40,21	0,75	0,16	0,51
2009	Barranca de Upía	40,21	0,76	0,87	0,75
1993	Cabuyaro	56,82	-	0,79	-
2000	Cabuyaro	-	0,73	0,91	0,32
2005	Cabuyaro	44,00	0,67	0,93	0,63
2009	Cabuyaro	44,00	0,71	0,97	0,76
1993	Cumaral	34,74	-	0,92	0,13
2000	Cumaral	-	0,81	0,94	0,66
2005	Cumaral	23,30	0,81	0,89	0,72
2009	Cumaral	23,30	0,86	0,91	0,76
1993	Granada	36,29	-	0,73	0,19
2000	Granada	-	0,65	0,58	0,39
2005	Granada	27,63	0,64	0,65	0,76
2009	Granada	27,63	0,69	0,67	0,84
1993	Mapiripán	82,14	-	0,98	0,55
2000	Mapiripán	-	-	0,52	-
2005	Mapiripán	100,00	0,65	0,67	0,23
2009	Mapiripán	100,00	0,74	0,78	0,25
1993	Puerto Gaitán	73,34	-	0,97	0,05
2000	Puerto Gaitán	-	0,61	0,90	0,04
2005	Puerto Gaitán	65,47	0,59	0,80	0,37
2009	Puerto Gaitán	65,47	0,59	0,78	0,92
1993	San Carlos de Guaroa	46,68	-	1,00	0,74
2000	San Carlos de Guaroa	-	0,66	0,77	0,81
2005	San Carlos de Guaroa	39,03	0,66	0,87	0,61
2009	San Carlos de Guaroa	39,03	0,68	0,98	0,80
1993	San Martín	34,24	-	0,89	0,01
2000	San Martín	-	0,85	0,69	0,49
2005	San Martín	26,99	0,85	0,67	0,56
2009	San Martín	26,99	0,74	0,47	0,62

Fuente: Castiblanco C. (2014)

Como se observa, la recopilación de datos va desde el año 1993 hasta el 2009 para los municipios considerados palmeros en este trabajo, variando la disponibilidad de la información en función del municipio y el tipo de dato, lo que lo hace difícilmente modelable a través del tiempo, sumándole también a esto, que éste tipo de información no suele presentar un patrón sino que se debe analizar cada dato en el contexto social y económico histórico según corresponda. El índice a calcular debe presentar información congruente respecto a la temporalidad de la información, por lo que los indicadores base calculados y los traídos desde la literatura científica comparten el mismo año de medición. Los índices sociales para este trabajo son el NBI (Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas), debido a que integrado diversos indicadores que arrojan información sobre la calidad y acceso de los servicios básicos de la población en determinado lugar y el INDV (Índice de violencia), puesto refleja de cierta manera el estado de orden público y estabilidad en una región. Los económicos serán el IIM (Índice de ingresos Municipales), índice que muestra el ingreso de determinado municipio respecto al departamento y el GINI\_T (Gini de tierras), que al reflejar el nivel de desigualdad en la propiedad de las tierras de determinado municipio, da información sobre la concentración del capital y la tierra dentro de éste.

### **5.2.2 Agregación de indicadores**

Basándose en la revisión hecha en el apartado 4.5.2 del Capítulo 4 de este trabajo, se construye la Tabla 5.4 en la cual se hace un recuento de los valores asignados bajo la metodología AHP en varios estudios del sector agrícola, con lo cual relacionaremos dichas experiencias con la cadena de producción del biodiesel, dónde el eslabón de cultivo de palma de aceite y extracción de aceite de palma bruto se relacionan directamente con todas las dimensiones tenidas en cuenta y pueden tratar de reflejar el juicio de los expertos y/o sociedad en general sobre los pesos para éstas.

Como se puede observar, los resultados dependiendo de la región en la que se realice el estudio cambian considerablemente para la dimensión ambiental y social, más no para la económica. Aunque, por ejemplo, para el estudio realizado en Colombia y Venezuela, de relativa similitud en las condiciones socioculturales y biofísicas, las tres dimensiones tienen desviación estándar promedio alrededor de 3%, de lo que se puede inferir con

ciertas restricciones que al tener un contexto multidimensional parecido los juicios de los participantes del AHP tienden a ser parecidos y por ende, replicables siempre y cuando cada uno de los estudios sea riguroso en el seguimiento de la metodología y métodos de comprobación estadística de baja correlación entre indicadores, lo cual pasa con los estudios mostrados en la tabla anterior.

**Tabla 5-4:** Pesos para las dimensiones de la sostenibilidad del sector agrícola.

<b>Autor</b>	<b>Lugar</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Social</b>	<b>Económico</b>
UPRA <sup>6</sup>	Colombia	48,1%	29,0%	22,6%
Sánchez G.	España	31,7%	39,8%	29,5%
Gómez-Limón <sup>7</sup>	España	37,5%	32,5%	29,9%
Flores J.	Venezuela	48,5%	24,5%	26,9%
Este trabajo	Colombia	48,3%	26,7%	24,7%

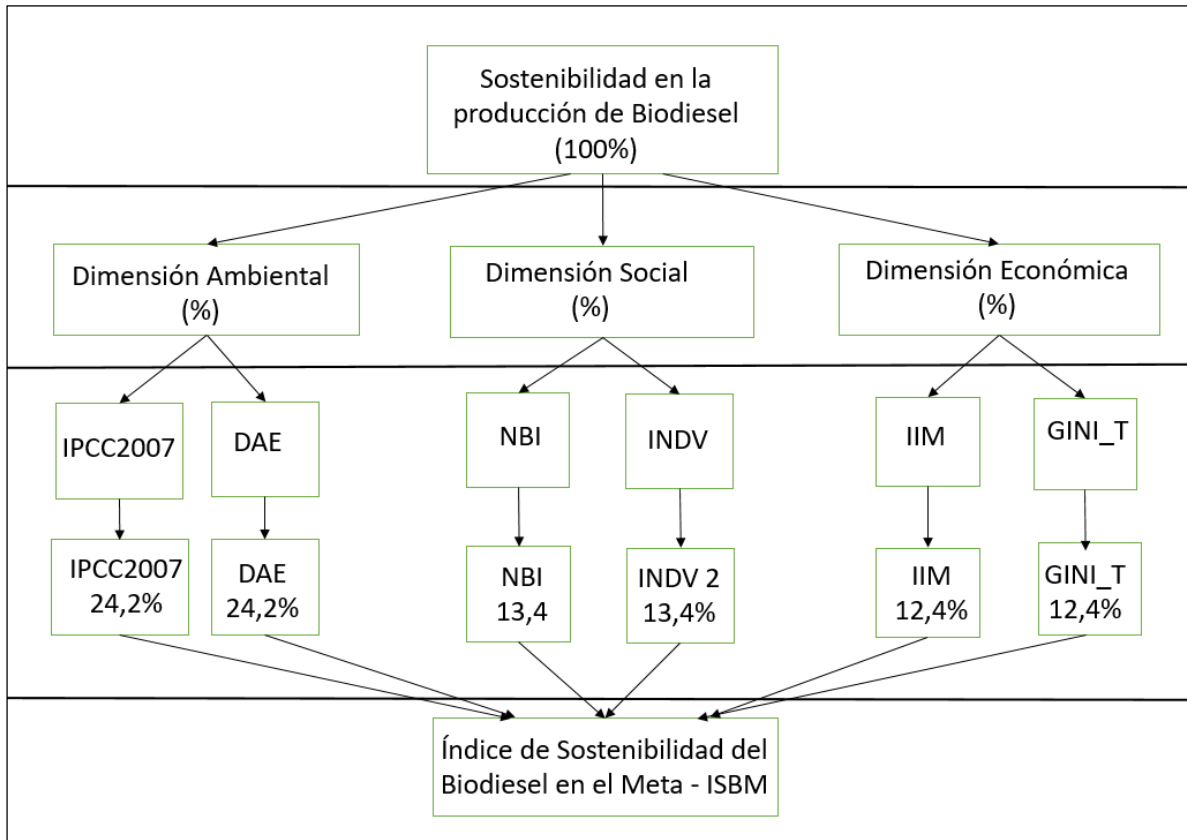
Fuente: Flores, J. & Gómez-Limón J. A. (2006), Gómez-Limón J. A. & Atance, I. (2004), Sánchez, G. (2009) y UPRA (2014)

Cuando los subcriterios no tienen un peso especificado no quiere decir que no tenga realmente, sino que todos aportan proporcionalmente al criterio principal, como pasa en el cálculo del “Environmental Sustainability Index”(EXI), el cual asigna valores iguales a los subcriterios por desconocimiento de las relaciones causales que recaen sobre el objetivo central (Esty, D. C. et al. , 2005).

Este supuesto se usará en este estudio, por restricciones de índole económica y de tiempo, por lo que los pesos de los criterios serán el promedio aritmético de los estudios más robustos realizados por el UPRA en Colombia y Flores y Gómez-Limón en Venezuela (48,3% ambiental, 26,7% el social y 24,7% el económico), el peso de los subcriterios será proporcional en cada caso según corresponda al número de indicadores por criterio como se dijo anteriormente; la Figura 5.1 muestra el modelo jerárquico final con los pesos de cada categoría y su normalización.

<sup>6</sup> Recalculado teniendo en cuenta solo la dimensión ambiental, social y económica.

<sup>7</sup> Recalculado con la ponderación de los grupos que hacen parte del AHP.

**Figura 5-2:** Modelo jerárquico APH para el desarrollo del ISBM.

Fuente: Elaboración propia

### 5.2.3 Punto de referencia del ISBM

A partir de las consideraciones tenidas en cuenta en la sección anterior, las jerarquías de los procesos agrícolas para este trabajo son 48,3% para la dimensión ambiental, 26,7% para la social y 24,7% para la económica. El Índice de sostenibilidad del Meta estaría dado por la Ecuación 5.1.

$$ISBM_i = 0,483D_{amb_i} + 0,267D_{soc_i} + 0,247D_{eco_i} \quad (5.1)$$

Pero como se ha planteado, las dimensiones están constituidas por subcriterios ya normalizados, con lo que la ecuación final para calcular el ISBM<sub>i</sub> será la sumatoria de cada indicador normalizado por su peso respectivo. Dado que tenemos solo 6 indicadores, la fórmula completa para el cálculo del ISBM de cada municipio.

$$ISBM_i = 0,242IPCC2007 + 0,242DAE + 0,134NBI + 0,134INDV + 0,124GINI_T + 0,124IIM \quad (7)$$

Para hacer comparable cada ISBM municipal (ISBMm), es necesario definir las condiciones de un ISBM de referencia o ISBMr, que será el cero de referencia en la escala utilizada en la interpretación del índice. Dados los procesos de normalización y agregación, el ISBM sólo puede tomar valores entre de 0 a 1. Dicho esto, los ISBMm cercanos a ceros serán multidimensionalmente más sostenibles bajo las condiciones de referencia.

Las condiciones del cero de referencia se calcularon a partir del valor más bajo en cada uno de los criterios que forman parte del ISBM, como sigue: IPCC2007: -3,19 kgCO<sub>2</sub>eq/Kg biodiesel, calculado suponiendo una mejora en el cultivo del 10%, una mejora en el proceso de biodiesel del 20%, una mejora en la tecnología y proveedores de fertilizantes que reduzca su impacto al 30%, se asume el valor de tratamiento de aguas y transporte de aceite como el mejor del grupo de datos: DAE: 10,55 MJ/kg biodiesel, calculado como un 10% más eficiente que el mejor valor para la refinación de glicerina, 30% de reducción del impacto de los insumos para el biodiesel, mejorando la cadena de suministro y optimizando el proceso, reducción del 10% del impacto del transporte de biodiesel y suponiendo 10% de reducción en impacto del fertilizantes y pesticidas; NBI: 17 (El más bajo del departamento, es decir, Villavicencio); INDV: 0,47 (El más bajo de los municipios tenidos en cuenta); IMM: 1.5, valor supuesto subiendo el mejor rendimiento de los municipios palmeros en 0.6, lo que denotaría un municipio con mayor diversificación económica y con unos ingresos municipales mejores y GINI\_T: 0.5, el menor de los municipios palmeros tenidos en cuenta.

#### 5.2.4 ISBM por municipio

Los valores de los indicadores ambientales, sociales y económicos de los diferentes municipios palmeros tenidos en cuenta en este trabajo se normalizaron a partir del método min-máx, y a partir de la ecuación 7 se agregaron los valores normalizados de los diferentes indicadores que constituyen el ISBM municipal, la Tabla 5.5 muestra los resultados del cálculo.

**Tabla 5-5:** Indicadores base e ISBM los principales municipios palmeros del Departamento del Meta.

Municipio	Nodo	Magnitud	Valor	Peso	ISBM
Acacías	PCG	0,53	0,996	0,242	0,557
	DAE	13,76	0,367	0,242	
	NBI	22,68	0,068	0,134	
	INDV	0,72	0,486	0,134	
	IIM	0,84	0,529	0,124	
	GINI_T	0,76	0,711	0,124	
Barranca de Upía	PCG	-2,92	0,072	0,242	0,472
	DAE	15,95	0,618	0,242	
	NBI	40,21	0,280	0,134	
	INDV	0,87	0,786	0,134	
	IIM	0,75	0,599	0,124	
	GINI_T	0,76	0,719	0,124	
Cabuyaro	PCG	-2,92	0,072	0,242	0,481
	DAE	15,73	0,593	0,242	
	NBI	44,00	0,325	0,134	
	INDV	0,97	0,990	0,134	
	IIM	0,76	0,590	0,124	
	GINI_T	0,71	0,577	0,124	
Cumaral	PCG	0,53	0,997	0,242	0,709
	DAE	15,10	0,521	0,242	
	NBI	23,30	0,076	0,134	
	INDV	0,91	0,872	0,134	
	IIM	0,76	0,589	0,124	
	GINI_T	0,91	1,152	0,124	
Granada	PCG	0,53	0,997	0,242	0,561
	DAE	14,91	0,498	0,242	
	NBI	27,63	0,128	0,134	
	INDV	0,67	0,394	0,134	
	IIM	0,84	0,525	0,124	
	GINI_T	0,69	0,528	0,124	
Mapiripán	PCG	0,54	0,999	0,242	0,905
	DAE	19,29	1,000	0,242	
	NBI	100,00	1,000	0,134	
	INDV	0,78	0,608	0,134	
	IIM	0,25	1,001	0,124	
	GINI_T	0,74	0,676	0,124	



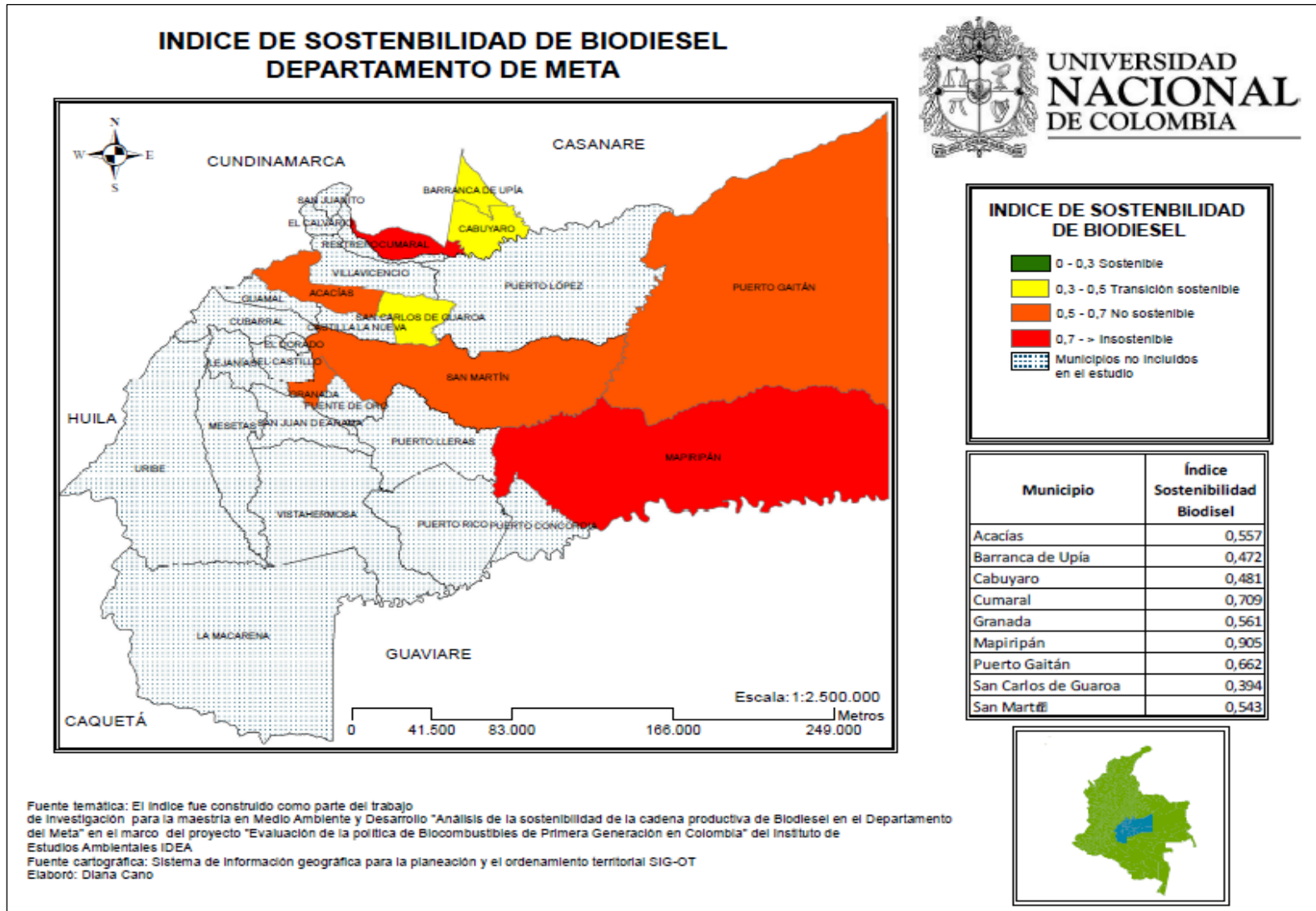
**Tabla 5.5 (Continuación):** Indicadores base e ISBM los principales municipios palmeros del Departamento del Meta.

Puerto Gaitán	PCG	0,53	0,998	0,242	0,662
	DAE	16,85	0,720	0,242	
	NBI	65,47	0,584	0,134	
	INDV	0,78	0,605	0,134	
	IIM	0,92	0,468	0,124	
	GINI_T	0,59	0,245	0,124	
San Carlos de Guaroa	PCG	-2,92	0,071	0,242	0,394
	DAE	13,27	0,311	0,242	
	NBI	39,03	0,265	0,134	
	INDV	0,98	0,999	0,134	
	IIM	0,80	0,558	0,124	
	GINI_T	0,68	0,511	0,124	
San Martín	PCG	0,53	0,997	0,242	0,543
	DAE	14,73	0,478	0,242	
	NBI	26,99	0,120	0,134	
	INDV	0,47	0,004	0,134	
	IIM	0,62	0,704	0,124	
	GINI_T	0,74	0,673	0,124	

Fuente: Elaboración propia.

Estos ISBM municipales muestran cómo es el estado del municipio en términos de sostenibilidad bajo las condiciones de referencia, con lo cual se puede asociar los mejores valores de ISBM con los municipios que tienen plantas de extracción de aceite con sistema de tratamiento de aguas integrado a biodigestores anaerobios y que además están cerca de la planta de producción de biodiesel de la región. Según los resultados, el peor de los municipios para sembrar palma y destinarla a la producción de biodiesel es Mapiripán, dada su lejanía a la planta refinadora, a los cambios de uso del suelo que se dieron para la siembra de palma (ISBM = 0,905), al manejo de las aguas y a la distancia a los proveedores de insumos químicos para el cultivo y el mejor San Carlos de Guaroa (ISBM = 0,394), lo cual se debe en la parte técnica a que la planta refinadora está al lado de la extractora de aceite bruto, que tiene un manejo de agua con recuperación de metano y que producen mucha de la energía consumida en el proceso, además cuenta con una concentración de tierra relativamente baja, lo cual no era esperado y las condiciones económicas son aceptables.

Figura 5-3: Mapa de ISBM municipales según su nivel de sostenibilidad



La Figura 5.3 muestra el mapa de la distribución del ISBM municipal, el cual se discrimina en diferentes rangos según su cercanía o lejanía al cero, correspondiente al ISBM bajo las condiciones de referencia. Como se observa, los municipios con colores vivos son los que se han tenido en cuenta en este estudio y los que se encuentran en blanco son los pertenecientes al departamento y no presentan o tienen muy baja actividad palmera, por lo que trabajos futuros en esta área pueden tener una potencialidad grande en el resto de municipios, sobre todo ante la posibilidad del crecimiento de la industria palmera por el posible aumento de mezcla de biodiesel al 20% para el año 2020.

El mapa hace evidente que la cercanía al departamento de Cundinamarca y al municipio de San Carlos de Guaroa incrementa la sostenibilidad del uso del aceite de palma para producción de biodiesel, con excepción del municipio de Cumaral, el cual entra en la categoría de “Insostenible” por 0,04 unidades pero podría fácilmente hacer ajustes a su sistema de producción para acercarse al grupo siguiente. En este trabajo se propone una división en rangos a la escala de ISBM, en la cual el nivel de sostenibilidad se divide en 4 regiones, como sigue:

Entre 0 y 0,3 se dice que el municipio es “SOSTENIBLE”, dado que tiene las condiciones necesarias, tanto técnica, social y económicamente para destinar su producción de aceite de palma a la producción de biodiesel, con una afectación en términos de emisiones y consumo de energía bajas, distancias convenientes en términos de aprovisionamiento y transporte de aceite y biodiesel.

Entre 0,3 y 0,5 se va a llamar al municipio “TRANSICIÓN SOSTENIBLE”, debido a que las dimensiones de la sostenibilidad en general apuntan a que en dicho lugar se da un manejo sobresaliente a los procesos de extracción, a que se encuentran cerca o a distancia prudentes para el transporte de aceite y a que sus condiciones socioeconómicas son mejores que las del promedio. En esta categoría se encuentran 3 municipios, que coinciden con la aplicación de biodigestores en el tratamiento del agua, lo que muestra la relación directa entre el uso de esta tecnología y la sostenibilidad en la cadena.

Entre 0,5 y 0,7 se definirá la producción de aceite del municipio para la transformación a biodiesel como “NO SOSTENIBLE”, esto porque las condiciones tecnológicas, operativas y socioeconómicas muestran que en términos de sostenibilidad el destino de la producción a la actividad de estudio no es recomendada. En este grupo estuvieron 4

municipios: Acacías, Granada, Puerto Gaitán y San Martín, municipios en los cuales no se aplica la tecnología de tratamiento de agua y además muestran indicadores sociales como el NBI preocupantes, lo que definitivamente afecta su ISBM.

Los valores mayores a 0,7 se definen como “INSOSTENIBLE”, diferenciándose del anterior en que tal vez ni siquiera la producción de aceite se esté haciendo de buena forma o que las condiciones de lejanía geográfica no son las mejores para el desarrollo de ésta agroindustria; sumado a esto las condiciones socioeconómicas en general son las peores de la población de estudio y el sector productivo del biodiesel podría ahondar en estas problemáticas. No se recomienda seguir expandiendo el cultivo en estas zonas, especialmente en Mapiripán, población alejada de los centros de refinamiento y distribución de insumos.

Según los resultados de este trabajo, ningún municipio del departamento es sostenible, lo que no puede interpretarse como un error del sector palmero en general en términos ambientales, sino como una configuración de varios factores socioeconómicos sobre los municipios estudiados, que hacen que los niveles de vida y seguridad social no sean óptimos por el momento, y aunque el sector palmero y de biodiesel no es responsable de ello, si debe considerarse como parte del problema y de la solución. En la medida que las decisiones locales se enfoquen a integrar de una mejor manera la industria palmera con el desarrollo conjunto de la población, con generación de oportunidades que generen convivencia y con gestión ambiental que cuide los recursos comunes, la industria que soporta la producción de biodiesel podría ser realmente sostenible en todas las dimensiones a día de hoy consideradas como necesarias por la sociedad.

## 6. Conclusiones

Este trabajo presenta un marco contextual del biodiesel en el mundo y Colombia, describiendo cómo el área plantada comienza a incrementar a lo largo de la primera década del siglo XXI (38%), como resultado de una serie de situaciones de tipo económico, institucional y ambiental; se contextualiza el crecimiento del sector palmero a partir de un análisis que tiene en cuenta el crecimiento paralelo de la producción de biodiesel. A partir de este contexto particular se planea evaluar la sostenibilidad del biodiesel en el departamento del Meta, para lo cual se propone el ISBM y su forma de construcción basado en la metodología AHP.

La utilización de la metodología AHP permitió tener en cuenta las percepciones de sostenibilidad de otros lugares del mundo, además de combinar en la información base del índice información proveniente de otras metodologías más cuantitativas como el ACV; esto se convierte en una herramienta en construcción importante a la hora de argumentar la viabilidad del cultivo de palma de aceite en diferentes zonas del país, desde un punto de vista que tienen en cuenta no sólo el componente biótico, sino también el socioeconómico. A partir de los balances del análisis de inventario se calcula el IPCC 2007 y la DAE para cada municipio del Meta, como se mostró en las Tablas 5.1 y 5.2, de lo cual se concluye que los municipios sin un sistema de tratamiento de agua que aproveche el metano resultante tienen mayores impactos ambientales (105% más emisiones CO<sub>2</sub>eq) y que además, las distancias juegan un papel importante a la hora de considerar la opción del uso del aceite para biodiesel, no solo por el transporte del biodiesel y aceite, sino por el impacto de la importación de ciertos insumos en la etapa de cultivo.

El potencial de calentamiento global cambia en promedio a valores negativos para el caso puntual del departamento del Meta cuando se incorpora en el proceso productivo de aceite de palma tecnología para la recuperación de Metano. Los resultados del cálculo del ISBM muestran una tendencia global de los municipios palmeros del meta a tener valores elevados, con excepción Barranca de Upía, San Carlos de Guaroa y San Martín que están cercanos al cero de referencia, es decir, son más cercanos a los parámetros

de referencia que componen la sostenibilidad para este trabajo. Si se ve el mapa en el cual se comparan estos mismos índices, se nota una tendencia de los municipios ubicados el sur-oriental del departamento a estar en las categorías de no sostenibilidad e insostenibilidad, lo que traduce que en esa zona no es sostenible el uso de aceite para destinarlo a producir biodiesel o el cultivo de palma en sí, bajo las condiciones supuestas.

Este trabajo es pionero en proponer un índice de sostenibilidad a nivel departamental en el sector productivo de biodiesel, por lo que no es posible comparar el ISBM contra algún otro índice de sostenibilidad; en este sentido, la importancia de este índice está entonces en la base metodológica y en la posibilidad de generación de conocimiento en investigaciones futuras, que traten de replicar, mejorar y comparar sus resultados particulares con los de éste trabajo, que pretende englobar un concepto complejo como la sostenibilidad en un dato resumen que puede ayudar a mejorar la toma de decisiones del sector productivo o incluso el institucional.

No se puede olvidar las limitaciones de acceso de información y de tipo económico que hicieron tomar suposiciones a lo largo del trabajo como la homologación de jerarquías en el proceso AHP, el inventario de algunos procesos que fueron obtenidos a partir de información secundaria (Buitrago R., 2014; Consorcio CUE, 2012) y la propuesta en la construcción del índice donde se supone que los usos del aceite de palma producidos en cada municipio son destinados en su totalidad a la producción de biodiesel.

## Anexos

### Anexo 1: Resumen de revisión de literatura para biodiesel.

	Autor	Publicación	Resumen
Procesamiento y análisis energético	Krawczyk T., 1996	Biodiesel Alternative Fuel Makes Inroads But Hurdles Remain	Resumen de propiedades físico-químicas y motivos a favor de la utilización de biodiesel para su uso como combustible.
	(Pimentel D. & Patzek T.W., 2005	Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower	Análisis de ciclo de vida completo. Se afirma que el balance energético de los biocombustibles analizados es negativo, en el mejor de los casos, el etanol, es de -29%,
	(González A., Jiménez I., Susa M., Restrepo S., & Gómez j., S. F.)	Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes	Aportes al procesamiento de etanol y biodiesel a partir de subproductos de estas industrias y a la elaboración de catalizadores necesarios.
	(Yáñez E. et al., 2009)	The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia	Análisis de ciclo de vida para procesos en Brasil y Colombia, anunciando relación salida/entrada de energía entre 6 y 8 dependiendo los casos.
	(de Souza S.P., Pacca S., Turra M., & Borges J., 2010)	Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel	Comparación de emisiones de CO <sub>2</sub> y balance energético en Brasil con estudios del resto del mundo. En dicho estudio el balance energético es positivo.
	(García H. & Calderón E., 2012).	Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia	La producción de biocombustibles está favorecida por estímulos fiscales y económicos que representan costos para el estado de 452.000 millones para el 2011.

Contexto económico y político	(Castiblanco C. & Hortúa S., 2012)	El paradigma energético de los biocombustibles y sus implicaciones: Panorama mundial y el caso Colombiano	Análisis crítico sobre los biocombustibles en el panorama mundial y colombiano, teniendo en cuenta las implicaciones de la producción a gran escala y sus repercusiones en los servicios ecosistémicos, la seguridad alimentaria y los conflictos en el campo.
	(Rueda, A. & Pacheco, P., 2015)	Políticas, mercados y modelos de producción. Un análisis de la situación y desafíos del sector palmero colombiano	Discute cómo el estado ha beneficiado al sector palmero y cómo este a su vez se ha visto estancado en el mercado interno, con dificultades de exportación por motivos de fitosanitarios y de competitividad.
Sostenibilidad y conflicto socio-ambiental	(Basiron Y., 2007)	Palm oil production through sustainable plantations	Se muestra cómo el sector palmero en Malasia opera acorde a las normas internacionales de sostenibilidad y cómo el sector integra a los pequeños productores
	(Ocampo S., 2009)	Agroindustria y conflicto armado. El caso de la palma de aceite	El autor muestra cómo el cultivo de la palma puede financiar el conflicto y desplazamiento en zonas palmeras indirectamente.
	(Boons F. & Mendonza A., 2010)	Constructing sustainable palm oil: how actors define sustainability	Los autores analizan la construcción del significado de sostenibilidad por parte de los actores envueltos en la producción y consumo de productos de la palma.
	(López A. & Botero V., 2014)	Estimación de conflictos de uso de la tierra por la dinámica de cultivo de Palma africana usando sensores remotos en el Cesar, Colombia	Concluye que los cultivos de palma ocupan medianamente zonas con vocación agropecuaria en el Cesar y ocupan significativamente áreas conservadas y/o protegidas, por lo que no fragmentan los bosques nativos considerablemente



	(García P., 2014)	Tierra, palma africana y conflicto armado en el Bajo Atrato chocoano, Colombia. Una lectura desde el cambio en los órdenes de extracción	Analiza críticamente las transiciones en el uso de la tierra y los conflictos de distinta índole que se dieron en la región del Bajo Atrato, concluyendo principalmente que el conflicto no fue generado por el cambio en la propiedad de la tierra.
--	-------------------	--	--

## **Anexo 2: Teoría sobre métodos de normalización, jerarquización y agregación.**

En la construcción de indicadores sintéticos o índices, es importante la metodología usada para la jerarquización o escogencia de pesos de cada uno de los indicadores que lo conforman, dado que esta es susceptible de manipulación o falta de coherencia, lo que hace que éstos sean mirados con cierta desconfianza por los economistas o estadistas si no tienen una base teórica fuerte (Nardo, M., et al., 2005). Es por esto que algunos autores sugieren una serie de pasos que doten al proceso de construcción de los índices de una coherencia y fortaleza lógica (Nardo, M. et al. 2005a, 2005b; Sánchez, G., 2009), como se ha aplicado en la Figura 4.1. Estos pasos serían el desarrollo de un marco teórico y contexto, la selección de unos indicadores pase, un análisis en dónde se escoja un grupo de esos indicadores, la normalización de los datos (para hacerlos comprables), una asignación de pesos y agregación de los datos y una comparación de estos índices con otras variables y datos originales.

Dependiendo las dimensiones que se vayan a tener en cuenta a la hora del análisis del objeto principal, se organizan los diferentes indicadores y se evalúa su conveniencia para el índice según un análisis comparativo; generalmente esta comparación se hace mediante análisis estadísticos de componentes principales o de correlaciones entre indicadores simples para evitar doble contabilidad de éstos en el valor resultado que sería el índice de sostenibilidad (Sánchez, G., 2009).

### Normalización de indicadores base

Debido a la naturaleza de cada uno de los indicadores de distinta índole que se tienen en cuenta para la construcción del índice de sostenibilidad, será necesario normalizar sus valores puesto cada uno tiene diferentes unidades de medida y no podrán agregarse en esa forma, además de que pueden aparecer fenómenos que dependen de las escala del indicador, lo que debe corregirse antes de la jerarquización y agregación (Schuschny, A. & Soto, H., 2009). Según Sánchez G. los principales métodos de normalización de indicadores para la construcción de índices son el método min-máx y la normalización z-score, dado que además de ser generalizados, presentan características que facilitan la posterior agregación de datos(Sánchez, G., 2009).

El método min-máx es un método sencillo donde el factor de la escala se mide en distancia y no por desviaciones estándar. En este sentido, el rango de todos los posibles valores está entre 0 y 1, siendo 0 el valor mínimo observado y 1 el valor máximo observado. Dependiendo de si el valor  $X_i$  esperado para el indicador es un mínimo ( $X_{\min}$ ) o un máximo( $X_{\max}$ ), cambiará la manera en que se calcula; a continuación se muestran las ecuaciones para cada uno de los casos (Phillis, Y. A. & Andriantiatsaholiniaina, L. A., 2001):

Cuando el valor objetivo del indicador es un máximo,

$$N(X_i) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & \text{si } X_i < X_{\max} \\ 1 & \text{si } X_i \geq X_{\max} \end{array} \right\} \quad (1)$$

Si el valor objetivo es un mínimo,

$$N(X_i) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{si } X_i \leq X_{\max} \\ \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} & \text{si } X_i > X_{\max} \end{array} \right\} \quad (2)$$

Donde  $N(X)$  es la función de normalización,  $X_i$  es el valor del indicador  $i$ ,  $X_{\max}$  es el valor máximo en la serie de datos del indicador y  $X_{\min}$  es el valor mínimo observado en la serie de datos del indicador. Dadas las ventajas del uso de este método, será el usado para normalizar los datos en el presente trabajo.

El otro método generalizado es el z-score o tipificación, dónde los valores del indicador se normalizan según la media y la desviación estándar, comportándose como una

distribución normal en la cual la media es cero y la desviación estándar es unitaria, lo cual lo hace un método atractivo pues facilita la etapa de agregación (Sánchez, G., 2009). La fórmula correspondiente para este método se observa en la siguiente ecuación.

$$N(X_i) = \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \quad (3)$$

Donde  $N(X)$  es la función de normalización,  $X_i$  es el valor del indicador  $i$ ,  $\bar{X}$  es el valor promedio de los datos y  $\sigma$  es la desviación estándar.

### **Jerarquización y agregación de indicadores**

Las etapas de jerarquización y agregación son tal vez las más importantes a la hora de construir un índice, debido a que los pesos de las dimensiones que quiere considerar pueden ser alterados a través de un sin número de métodos, haciendo que se pierda rigor o credibilidad en el análisis. La falta de consenso en un tema tan delicado como este se suma también a las críticas que tienen los índices, por lo que algunos autores afirman que están contruidos bajo juicios de valor subjetivos, capaces de sesgar el resultado final (Hansen, J. W., 1996; Hueting, R. & Reijnders, L., 2004; Sánchez, G., 2009).

Como enuncia Sánchez G. en su trabajo, Nardo et al. en el trabajo realizado para la OCDE en 2005, las técnicas de agregación pueden condensarse en dos grupos: las positivas y las normativas (Nardo, M. et al., 2005a y 2005b). Las primeras son de naturaleza estadística, puesto permiten encontrar los pesos en el índice de forma endógena a través de una representación de la realidad y se destacan entre ellos el análisis de componentes principales (ACP), el análisis de regresión, el de distancias, el análisis DEA, entre otros. Una ventaja es que se pierde subjetividad en el procedimiento de asignación de pesos, pero aparece la escogencia de indicadores iniciales de manera separada al pensamiento de la sociedad en la que se enmarca el problema como una desventaja de esto.

Las segundas son técnicas consensuadas con los diferentes actores que están presentes directa o indirectamente en el problema que se quiere abordar, por lo que son

participativas y exógenas en la asignación de pesos a las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. Entre las formas recomendadas para esta clase de método, se encuentra la consulta a expertos (Stewart, T. J., 1992; Weber, M. & Borchering, K., 1993), dado que pueden aumentar la precisión de la representación de la realidad en la asignación de los pesos, las encuestas de opinión pública, los modelos multivariados como el proceso analítico jerárquico, la ponderación tradeoff, entre otros (Sánchez, G., 2009). Cabe resultar que aunque la naturaleza de los dos enfoques (el estadístico y el participativo), algunos autores aseguran que los resultados de ambos son parecidos y que al final el método de jerarquización dependerá de las preferencias del investigador y el tipo de problema que quiera analizar (Pöyhönen, M. & Hämäläinen, R. P., 2001).

En la construcción de índices, el método AHP (Analytic Hierarchy Process en inglés) consiste en la división jerárquica de los indicadores de las dimensiones consideradas, a partir de los juicios dados por un número determinado de expertos o por los diferentes actores que se ven envueltos en una situación particular; éstos juicios sirven para construir los pesos que se van a asociar a cada elemento y son reflejo de la importancia que tienen frente al objetivo principal (UPRA, 2014). En principio, esta técnica fue desarrollada por Saaty a finales de los 70's para toma de decisiones multicriterio basada en la estructuración jerárquica (Saaty, T. L., 1977, 1980), pero según autores como Nardo et al. (Nardo et al., 2005a, 2005b) dicha metodología tiene utilidad a la hora de asignar pesos a las jerarquías, por lo que se comenzó a usar también en la creación de índices. Como referencia Sánchez G. (2009), la metodología AHP sea utilizado también en el sector agrícola a la hora de decidir las preferencias sociales sobre ese tópico (Duke, J. M. & Aull-Hyde, R., 2002; Gómez-Limón J. A. & Atance, I., 2004) y en Colombia de igual forma la Unidad de Planificación Rural Agrícola (UPRA) ha utilizado la metodología para asignar pesos ambientales, sociales, económicos, entre otros en la evaluación del desempeño de la agroindustria del caucho (UPRA, 2014).

La metodología AHP consta de tres etapas principales: la modelización, la valoración y la priorización y síntesis. La modelación consiste en construir una figura jerárquica donde se incluyen todos los aspectos a considerar dentro del objetivo, en este sentido, se debe tener al menos tres niveles: la meta final, en este trabajo llamada sostenibilidad de la cadena productiva del biodiesel (primer nivel), los criterios intermedios de decisión, que en este caso serían las dimensiones de la sostenibilidad más los indicadores que se desprenden de éstas (segundo nivel) y por último las alternativas, que para efectos de

este trabajo es el Índice de Sostenibilidad del Biodiesel en el Meta como tal. En la metodología AHP los niveles de los cuales dependan otros se llaman nodos y el nivel final, alternativas, puesto nadie es dependiente de él (Sánchez, G., 2009).

Luego de establecer la estructura jerárquica, sigue la etapa de valoración. En esta etapa consiste en condensar los juicios de valor de los expertos en el área específica que se está analizando, lo cual se puede hacer mediante procedimientos numéricos o gráficos (Saaty, T. L., 1980). En el trabajo de sostenibilidad agrícola de Sánchez G. se utiliza el método verbal, haciendo que cada uno de los expertos asigne un valor numérico entre 1 y 9 a cada categoría y subcategoría de la sostenibilidad que luego es comparada por pares mediante un matriz de comparación construida con valores cardinales, de la cual luego se sacará el peso relativo de cada nodo.

Por último, la metodología AHP utiliza la información de la valoración y prioriza mediante procedimientos estadísticos como la media geométrica por filas (CITA), asignando los pesos de cada indicador según la suma de los juicios de cada decisor de la forma que se muestra a continuación:

$$W_{im} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{i=n} a_{ijm}} \quad \forall i, m, j \in n \quad (4)$$

Donde  $W_{im}$  es el peso real del criterio o subcriterio  $i$  para el decisor  $m$ ;  $a_{ijm}$  es juicio comparado del criterio o subcriterio  $i$  sobre el criterio o subcriterio  $j$  del mismo nivel jerárquico otorgado por el decisor  $m$  y  $n$  es el número de nodos que conforman el nivel jerárquico.

Como se puede deducir, los juicios de expertos son los más cercanos o posibles de realizar en el ámbito académico, pero para integrar a la toma de decisiones en cuanto a los pesos a la sociedad, que es parte fundamental de cualquier problema agrario y/o productivo a analizar, los costos y tiempos del proyecto se incrementarían considerablemente, por lo que en este trabajo se seguirá el consejo de Sánchez G. y se tomarán como referencia trabajos realizados anteriormente que tengan puntos en común, áreas de conocimiento y contextos de análisis parecidos (Sánchez, G., 2009). En esta línea, en el siguiente capítulo se mostrará la manera en la cual se asignarán los pesos

para las dimensiones de la sostenibilidad según la literatura acorde a las condiciones de este trabajo.

Teniendo el modelo jerárquico diseñado con sus respectivos pesos, el único paso que faltaría para la obtención de la alternativa, que en este caso es el ISBM, es la agregación de los indicadores que conforman las diferentes dimensiones de la sostenibilidad. Existen varios métodos de agregación, entre ellos los aditivos y los multiplicativos; entre los métodos aditivos más usados están el de suma de ordenadores ordinales, la suma de desviaciones nominales y la suma ponderada de indicadores ponderados; en cuanto a los métodos multiplicativos el más usado es el de producto de indicadores normalizados (Sánchez, G., 2009), en donde la agregación es de manera geométrica o multiplicativa y su fórmula es de la clase  $f(X_i) = \prod X_i^{w_i}$ .

En este trabajo se va a emplear el método de agregación aditivo de suma ponderada de indicadores normalizados, puesto es el usado en la literatura base bajo el supuesto de que los indicadores simples son independiente entres si o tienen baja correlación(Sánchez, G., 2009; UPRA, 2014). En la ecuación 5 se resume la manera en la que se calcula el ISBM usando el método de agregación indicado.

$$ISBM = \sum_{i=1}^i W_i X_i \quad (5)$$

Donde ISBM es índice de sostenibilidad que se plantea como alternativa de la metodología AHP,  $i$  es uno de los indicadores escogidos,  $W_i$  es el peso del indicador y  $X_i$  es el valor del indicador normalizado.

## Bibliografía

- Acevedo, A. (2013). Biocombustibles: tipos, generaciones y biomásas empleadas para su elaboración. *Agropost*, 127.
- Acevedo P. (2012). *Herramienta de análisis de alternativas de producción incorporando el ACV «Cuna a Cuna» a los métodos tradicionales. Comparación de biodiesel de palma e higuera (Doctoral)*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Acosta O., C. A. (2009). Biocombustibles, Seguridad Alimentaria y Cultivos Transgénicos. *Salud Pública*, 11(2), 290-300.
- Aguilera M. (2002). Palma Africana en la Costa Caribe: un semillero de empresas solidarias. Banco de la República, Cartagena. Recuperado a partir de <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER30-Palma-Africana.pdf>
- Alberti, M., & Susskind, L. (1996). Managing urban sustainability: an introduction to the special issue. *Environmental Impact Assessment Review*, 16, 213-221.
- Álvarez C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 359, 63-89.
- Álzate, B. (2008). *Indicadores de sostenibilidad ambiental de tercera generación en la gestión ambiental sistémica. Caso páramo de Guerrero, Cundinamarca*. (1°). Bogotá: IDEA - Universidad Nacional de Colombia.
- Asner, G.P, Elmore, A.J., Olander L.P., Martin R.E., & Harris A.T. (2004). Grazing systems, ecosystem responses and global change. *Annual Review of Environmental and Resources*, 29, 261-299.
- ASTM. (2012). ASTM D6751-12. Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuel. American Society For Testing and Materials.

- Audsley, E. (1997). *Harmonisation of Environmental Life Cycle Assessment for Agriculture: Final Report, Concerted Action AIR3-CT94-2028*. CE DG VI-Centre de documentation.
- Azapagic, A. (1999). Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation. *Chemical Engineering Journal*, 73(1), 1–21.
- Balat, M. (2006). Sustainable transportation fuels from biomass materials. *Energy Educ Sci Technol*, 17, 83-103.
- Basiron Y. (2007). Palm oil production through sustainable plantations. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), 289 – 295.
- Boons F., & Mendonza A. (2010). Constructing sustainable palm oil: how actors define sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17), 1686–1695.  
<https://doi.org/doi:10.1016/j.jclepro.2010.07.003>
- BP. (2015, junio). BP Statistical Review of World Energy. Recuperado a partir de <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Buitrago R. (2014). *Evaluación de los efectos ambientales de la gasolina, diesel, biodiesel y etanol carburante en Colombia por medio del análisis de ciclo de vida* (Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/50031/1/02300580.2014.pdf>
- Cárdenas, D. (2015). Pacific Rubiales en Puerto Gaitán. Las historias de la violación a los derechos humanos se repiten. *Revista Semillas*, 48-49.
- Cardeño, F., Gallego, L. J., & Rios, L. (2011). Refinación de la Fase Glicerina del Biodiesel de Aceite de Palma empleando Ácidos Minerales. *Inf. Tecnol*, 22(6).  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000600003>
- Carere, R. C., Sparling, R., Cicek, N., & Levin, B. D. (2008). Third Generation Biofuels via Direct Cellulose Fermentation. *Int. J. Mol. Sci.*, 9(7), 1342-1360.



- Castiblanco, C. (2014). *Scenarios of the future expansion of Oil Palm in Colombia: impacts generated by the biofuels sector* (Doctoral). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Castiblanco C., & Hortúa S. (2012). El paradigma energético de los biocombustibles y sus implicaciones: Panorama mundial y el caso Colombiano. *Gestión y Ambiente*, 15(3), 5-26.
- CENIPALMA. (2014). Manejo de insectos plagas de la palma de aceite, con énfasis en control biológico y sus relaciones con el cambio climático. Presentado en XII Reunión técnica Nacional de palma de aceite, Bogotá.
- Center for Culture, History, and Environment. (2010). Responding to Crisis. Recuperado 18 de marzo de 2016, a partir de <https://nelson.wisc.edu/che/events/place-based-workshops/2010/project/energy-perspectives/crisis.php>
- Consortio CUE. (2012). *Sostenibilidad de los Biocombustibles en Colombia. Capítulo II: Estudio ACV – Impacto Ambiental*. Medellín, Colombia.: Ministerio de Minas y Energía.
- Constanza, R., & Patten, B. C. (1995). Defining and predicting sustainability. *Ecological Economics*, 15, 193-196.
- Contraloría General de la Nación. (2014). *Estudio de Caso: Despojo y abandono de tierras en el municipio de Mapiripán - Meta*. Colombia.
- Cowell, S., & Clift, R. (1997). Impact assessment for LCAs involving agricultural production. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2(2), 99-103.
- DANE. (2005). COLOMBIA. Necesidades Básicas Insatisfechas - NBI, por total, cabecera y resto, según municipio y nacional. Resultado Censo 2005. Recuperado a partir de <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-sociales/necesidades-basicasinsatisfechas-nbi>

- DANE. (2013). *Pobreza Monetaria por Departamentos* (Comunicado de prensa). Bogotá.
- DANE. (2015). *Cuentas anuales Departamentales - Colombia Producto Interno Bruto (PIB) 2014*. Bogotá.
- Davidson, M. (2009). Social sustainability: a potential for politics? *Local Environ*, 14(7), 607-619.
- de Souza S.P., Pacca S., Turra M., & Borges J. (2010). Greenhouse gas emissions and energy balance of palm oil biofuel. *Renewable Energy*, 35, 2552–2561.
- DEFRA. (2000). *The Government's Response to the Royal Commission on Environmental Pollution's* (No. 21). United Kingdom.
- Delucchi, M. A. (2006). *Energy Balance of Bioethanol: A Synthesis*, Swiss Federal Institute of Technology & ENERS Energy Concept (No. UCD-ITS-RR-06-08). Institute of Transportation Studies, University of California.
- DNP. (2011). Índice de Pobreza Multidimensional (IPM-Colombia) 1997-2008 y meta del PND para 20141.
- Dragone, G. (2010). Third generation biofuels from microalgae. *Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology*. A. Mendez-Vilas (Ed.).
- Duke, J. M., & Aull-Hyde, R. (2002). Identifying public preferences for land preservation using de analytic hierarchy process. *Ecological Economics*, 42, 131-145.
- Ebert, U., & Welsch, H. (2003). Meaningful environmental indices: a social choice approach. *Journal Environmental Economics and Management*, 47, 270-283.
- Eisberg, N. (2006). Harvesting Energy. *Chemical Industries*, 17, 24-25.
- Empleado palmero. (2016, septiembre 27). Recolección de información primaria en el marco del proyecto «Evaluación de la política de biocombustibles de primera generación en Colombia» [Grabación de sonido].

- Escobar C., Lora E., Venturini O., Yañez E., Castillo E., & Almazan O. (2009). Biofuels: Environment, technology and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6-7), 1275-1287.
- Esty, D. C., Levy, M. A., Srebotnjak, T., & Sherbinin, A. (2005). 2005 Environmental Sustainability Index: benchmarking national environmental stewardship. *Yale Center for Environmental Law and Policy*.
- Ewing M., M. S. (2009). Biofuels production in developing countries: assessing tradeoffs in welfare and food security. *Environmental Science & Policy*, 12(4), 520-528.
- FAO, O. de las N. U. para la A. y la A. (2008). *El estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación. BIOCOMBUSTIBLES: perspectivas, riesgos y oportunidades*. Roma, Italia.
- FAO, O. de las N. U. para la A. y la A. (2009). La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Presentado en Foro de expertos Cómo alimentar al mundo 2050, Roma, Italia.
- Fedebiocombustibles. (2016). Producción de Biocombustibles. Recuperado a partir de <http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-produccion-titulo-Biodiesel.htm>
- FEDEPALMA. (2003). *Anuario estadístico 2003: La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y el mundo. 1988 - 2002*. Bogotá.
- FEDEPALMA. (2011a). *Anuario estadístico 2011: La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y el mundo. 2006- 2010*. Bogotá.
- FEDEPALMA. (2011b). *Guía Ambiental de la Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia*. Bogotá.
- FEDEPALMA. (2013). *La Agroindustria de la Palma de Aceite en Colombia*. Bogotá.
- FEDEPALMA. (2014). *Anuario estadístico 2014: La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y el mundo. 2009- 2013*. Bogotá.

- FEDEPALMA. (2015). *Minianuario estadístico 2015: Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia*. Bogotá.
- FEDEPALMA. (2016a). *Anuario estadístico 2016: La agroindustria de la palma de aceite en Colombia y el mundo. 2011 - 2015*. Bogotá.
- FEDEPALMA. (2016b). Desempeño del sector palmero colombiano. Recuperado a partir de [http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/18072016\\_Desempen%CC%83o\\_sector\\_2015\\_2016.pdf](http://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/18072016_Desempen%CC%83o_sector_2015_2016.pdf)
- Flores, J., & Gómez-Limón J. A. (2006). Planificación multicriterio de explotaciones agrarias en áreas tropicales protegidas. El caso de la zona protectora Guanare-Masparro (Venezuela). *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 6(11), 81-108.
- García H., & Calderón E. (2012). Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia. Recuperado a partir de <http://www.fedesarrollo.org.co/wpcontent/uploads/2011/08/Evaluación-de-la-política-de-Biocombustibles-enColombia.pdf>
- García P. (2014). Tierra, palma africana y conflicto armado en el Bajo Atrato chocoano, Colombia. Una lectura desde el cambio en los órdenes de extracción. *Estudios Socio-jurídicos*, 16(1), 209-244. <https://doi.org/dx.doi.org/10.12804/esj16.1.2014.05>
- Garzón S., H. C. (2009). *Estudio comparativo para la producción de etanol entre: Saccharomyces cerevisiae silvestre, Saccharomyces cerevisiae ATCC 9763 Y Candida utilis ATCC 9950* (Pregrado). Universidad Tecnológica de Colombia, Pereira, Colombia.
- Gasca V., & Salinas E. (2009). Los Biocombustibles. *El cotidiano*, 157, 75-82.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entrophy Law and the Economic Process*. Cambridge: Harvard University Press.

- German Agency for Technical Cooperation. (2003). *Sostenibilidad energética en América Latina y el Caribe: el aporte de las fuentes renovables*. CEPAL.
- Gnansounou, E., & Dauriat, A. (2005). Energy balance of bioethanol: a synthesis. Presentado en European Biomass Conference, Paris, Francia.
- Gómez-Limón J. A., & Atance, I. (2004). Identification of public objectives relatives to agricultural sector support. *Journal of Policy Modeling*, 26(8-9), 1045-1071.
- Gonzales, F., & Martín, F. (2003). Medición del Desarrollo Sostenible a través de índices sintéticos: diseño y aplicación a la Unión Europea. *Revista Estudios de Economía Aplicada*.
- González A., Jiménez I., Susa M., Restrepo S., & Gómez J. (s. f.). Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes*, 28, 70-82.
- Hansen, J. W. (1996). Is agricultural sustainability a useful concept? *Agricultural Systems*, 50(2), 117-143.
- Harman, J. F. (2015). Petróleo y Saqueo. *Revista Semillas*, 48-49.
- Hueting, R., & Reijnders, L. (2004). Broad sustainability contra sustainability: the proper construction of sustainability indicators. *Ecological Economics*, 50(3-4).
- ICESI. (s. f.). Glosario: Necesidades Básicas Insatisfechas (Índice NBI). Recuperado a partir de <http://www.icesi.edu.co/cienfi/images/stories/pdf/glosario/necesidades-basicas-insatisfechas.pdf>
- IGAC. (2012). *Atlas de la Distribución de la Propiedad Rural en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- Infinita Renovables. (2005). *Informe Sectorial del Biodiesel 2015* (p. 12). Recuperado a partir de <http://www.infinita.eu/>

- IUCN, UNEP, & WWF. (1991). *Caring for the earth: A strategy for sustainable living*.  
Oxford: Oxford University Press.
- Jacobs, M. (1999). *Sustainable development: a contested concept*. In: Dobson, A. (Ed.),  
*Fairness and Futurity: Essays on Environmental Sustainability and Social Justice*.  
Oxford, UK.: Oxford University Press.
- Jiménez, L. M. (2000). *Desarrollo Sostenible: Transición hacia la Coevaluación Global*  
(Ediciones Pirámide). España.
- Kates, R. W. (2001). Sustainability Science. *Science*, 292(5517), 641-642.  
<https://doi.org/10.1126/science.1059386>
- Koh L. P., & Ghazoul J. (2010). Spatially explicit scenario analysis for reconciling  
agricultural expansion, forest protection, and carbon conservation in Indonesia.  
*PNAS*.
- Krawczyk T. (1996). Biodiesel. Alternative fuel makes inroads but hurdles remain.  
*International News on Fats, Oils, and Related Materials*, 7(8), 801-815.
- Laursen, W. (2006). Students take a green initiative. *Chemical Engineering*, 32-34.
- Leal, W. (2000). Dealing with misconceptions on the concept of sustainability.  
*International Journal of Sustainability in Higher Education*, 1(1), 9-19.
- Lee, R. A., & Lavoie, J. M. (2013). From first- to third-generation biofuels: challenges of  
producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*,  
3(2), 6-11.
- López A., & Botero V. (2014). Estimación de conflictos de uso de la tierra por la dinámica  
de cultivo de Palma africana usando sensores remotos en el Cesar, Colombia.  
*DYNA*, 81(186).
- Luque, R., & Melero, J. A. (2012). *Advances in biodiesel production. Processes and  
technologies* (1.<sup>a</sup> ed.). Woodhead Publishing.

Márquez L., & Shlosser J. (1995). El programa de sustitución energética en Brasil.

*Agricultura: Revista agropecuaria*, 753, 300-304.

Martín, M. A. (1979). *Del folclor Llanero*. Villavicencio: Lit. Juan XXIII.

Martinez - Alier, J. (1999). *Introducción a la Economía Ecológica*. Barcelona: Rubes Editorial.

Mas-Colell, A. (1994). *Elogio del crecimiento económico*. Madrid.

McKenzie, S. (2004). Social Sustainability: Towards Some Definitions. *Hawke Research Institute, Working Paper Series*, 27.

Milà, L. (2003). *Contributions to life cycle analysis for agricultural systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment* (Doctoral). Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra.

Mingorance F., Milleni F., & Le Du H. (2004). *EL CULTIVO DE LA PALMA AFRICANA EN EL CHOCÓ Legalidad Ambiental, Territorial y Derechos Humanos*. 1.

Missimer, M., Broman, G., & Robert, K. H. (2017). A strategic approach to social sustainability - Part 2: a principle based definition. *J. Clean. Prod.*, 140, 42-52.

Missimer, M., Robert, K. H., & Broman, G. (2016). A Strategic Approach to Social Sustainability - Part 1: Exploring the Social System. *J. Clean. Prod.*, 140.

Mitchell, B. (1998). *La Gestión de los Recursos y del Medio Ambiente*. Madrid: Mundi-Prensa libros.

MME. Resolución 181120 de 2010. Por la cual se modifica la Resolución 182142 de 2007, en relación con el programa de mezcla de biocombustibles para uso en motores diésel. (2010).

Mohammed, M. (2000). The ISO 14001 EMS implementation process and its implications: A case of study of Central Japan. *Environmental Management*, 25(2), 177-188.

Molano, A. (2015). De los llanos y selva. *Revista Semillas*, 48-49.

- MRCBG. (2001). Sustainability Science Program. Recuperado a partir de <https://www.hks.harvard.edu/centers/mrcbg/programs/sustsci>
- Msangi S., Sulser T., Rosegrant M., & Valmonte-Santos R. (2007). Global Scenarios for Biofuels: Impacts And Implications For Food Security And Water Use. Presentado en Conference on Global Economic Analysis special session on «CGE Modeling of Climate, Land Use, and Water: Challenges and Applications», Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Munasinghe, M. (1993). *Environmental economics and sustainable development*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Naik, S. N. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 578–597.
- Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., & Tarantola, S. (2005). *Tools for composite indicators building*. Italy: Joint Research Center - European Commission.
- Nardo, M., Saisana, M., Tarantola, S., Hoffman, A., Giovannini, E., & Saltelli, A. (2005). *Handbook of constructing composite indicators: methodology and user guide*. Paris, Francia: Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE).
- Naredo J. (1994). *Fundamentos de la economía ecológica*. Barcelona: Fuhem e Icaria.
- Ocampo S. (2009). Agroindustria y conflicto armado El caso de la palma de aceite. *Colombia Internacional*, 70, 169-190.
- Oil World. (2014). *Oil World Statistic Update: 2014*. Germany.
- Ospina B., & Martha L. (2001). *La palma africana en Colombia. Apuntes y memorias* (segunda, Vol. 1). Bogotá: FEDEPALMA.
- Paruelo J. M., Guerschman J.P., & Verón S.R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*, 15, 14-23.
- Pater L. R., & Cristea S. L. (2016). Systemic Definitions of Sustainability, Durability and Longevity. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221, 362 – 371.



- Phillis, Y. A., & Andriantiatsaholiniaina, L. A. (2001). Sustainability: an ill-defined concept and its assessment using fuzzy logic. *Ecological Economics*, 37(3), 435-456.
- Pimentel D., & Patzek T.W. (2005). Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Research*, 14, 65–76.
- PNUD. (2014a). *Estrategia territorial para la gestión equitativa y sostenible del Sector de Hidrocarburos. Diagnóstico Socioeconómico del Meta*. Colombia.
- PNUD. (2014b). *Informe sobre Desarrollo Humano 2014. Sostener el Progreso Humano: reducir vulnerabilidades y construir resiliencia*. New York: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Pöyhönen, M., & Hämäläinen, R. P. (2001). On the convergence of the attribute weight methods. *European Journal of Operational Research*, 129(3).
- Queiroz, A., França, L., & Ponte, M. (2012). The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dendê”) in the Amazon. *Biomass Bioenergy*, 36, 50–59.
- Queiroz, A.G. (2011). *Avaliação do Ciclo de Vida de Biodiesel de Bendê produzido na Amazônia* (Doctoral). Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil.
- Quiroga, R. (2007). *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Rehman K., Jawaid M., & Alothman O. (2015). *Agricultural Biomass based Biomaterials*. Suiza: Springer International Publishing AG.
- Robles, R. M. (2012). *Eficiencia energética sostenible: método para la toma de decisiones* (Doctoral). Universidad de Córdoba.
- Rodríguez Gonzáles, I. (2013). Despojo, baldíos y conflicto armado en Puerto Gaitán y Mapiripán (Meta, Colombia) entre 1980 y 2010. *Estudios Socio-Jurídicos*, 16(1).

- Romero, B. I. (2013). El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental Gestión Ambiental. *Tendencias tecnológicas*, 91.
- Rueda A., & Ahumada M. (2013). *De la ficción Energética a la realidad de un negocio: Biodiésel de palma colombiano*. Bogotá: FEDEPALMA.
- Rueda, A., & Pacheco, P. (2015). *Políticas, mercados y modelos de producción: Un análisis de la situación y desafíos del sector palmero colombiano*. Indonesia: Center for International Forestry Research.
- Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234-281.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw.
- Salinas Y., Alvarez P., & Fajardo D. (2010). *La Colombia de los Agrocombustibles* (Grupo Semillas). Bogotá: Afro Impresores LTDA.
- Sánchez E. (2010). *Shocks del precio del petróleo y su impacto en el crecimiento y la inflación de la economía colombiana* (Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6673/1/4074612010.pdf>
- Sánchez, G. (2009). *Análisis de la Sostenibilidad Agraria mediante Indicadores Sintéticos: Aplicación empírica para sistemas agrarios de Castilla y León* (Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Sánchez O., Cardona C., & Sánchez D. L. (2007). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa. *Revista Universidad EAFIT*, 43(146), 59-79.
- Schuschny, A., & Soto, H. (2009). *Guía metodológica – Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible* (CEPAL – Colección Documentos de proyectos). CEPAL.

- Serageldin, I. (1996a). *Sustainability and the wealth of nations : first steps in an ongoing journey*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Serageldin, I. (1996b). Sustainability as opportunity and the problem of social capital. *Brown Journal of World Affairs*, 3(2).
- Stewart, T. J. (1992). A critical survey on the status of multiple criteria decision making theory and practice. *Omega*, 20(5-6).
- Texo J., Betancur C., & Duque J. (2009). *Perspectivas generales del desarrollo de la industria de los Biocombustibles en Uruguay*. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Tukker, A. (2000). Life cycle assessment as a tool in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 20(4), 435-456.  
[https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00045-1)
- UPRA. (2014). *Consolidación de la Metodología de Evaluación de Tierras para Zonificación con fines Agropecuarios a escala Semidetallada (1:25.000)*. Unidad de Planeación Rural Agropecuaria.
- Vargas, C. (2009). Life Cycle Analysis of Carbon for Palm Oil in Colombia. *Científica*, 13(2), 69-75.
- Weber, M., & Borchering, K. (1993). Behavioral influences on weight judgments in a multiattribute decision making. *European Journal of Operational Research*, 67(1).
- Wegener, S. (1996). Modelling fate for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1(4), 237-240.
- World Energy council. (2011). *Policies for the future 2011 Assessment of country energy and climate policie*. London, U.K.

Yáñez E., Silva E., Da costa E, & Torres E. (2009). The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia.

*Renewable Energy*, 34(12), 2905–2913.

Zerbe J. (1988). Biofuels: Production and Potential. *Forum for Applied Research and*

*Public Policy*, 3, 38-47.