

Life cycle analysis of biodiesel production from used vegetal oil

Ana Isabel Vidal-Benavides ^a, Juan Carlos Quintero-Díaz ^b & Israel Herrera-Orozco ^c

^a Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. anitavidalb@gmail.com

^b Grupo de Bioprocesos, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. carlos.quintero@udea.edu.co

^c Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos. CIEMAT. Madrid, España. israel.herrera@ciemat.es

Received: November 30th, 2015. Received in revised form: July 12th 2016. Accepted: December 12th, 2016

Abstract

Colombia has become a major producer of biodiesel South American level, making it necessary to study the environmental viability of this type of fuel using tools such as Life Cycle Analysis, which provides quantitatively the potential environmental impacts of any process in the whole production chain. In this research the production of biodiesel from used vegetable oil was analyzed in order to assess their environmental performance in terms of various categories of impact. They have been evaluated different impact categories, such as climate change and ozone depletion. Following the recommendations of the existing international standards for assessing the impact of the life cycle, a method of impact assessment which includes various impact categories used in this study. In the case of climate change, it was found that the stage that generates greater environmental impact is the transesterification stage, due energy and raw materials consumption.

Keywords: Biodiesel; life cycle analysis; biofuels; used vegetal oil

Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado

Resumen

Colombia se ha consolidado como un importante productor de biodiesel a nivel suramericano, lo que hace necesario estudiar la viabilidad ambiental de este tipo de combustibles mediante herramientas como el Análisis del Ciclo de Vida, que establece cuantitativamente, impactos ambientales de cualquier proceso. En esta investigación se analizó la producción de biodiesel de aceite vegetal usado, con el fin de evaluar su desempeño ambiental, en términos de diversas categorías de impacto. Han sido evaluadas diferentes categorías de impacto, tales como cambio climático y agotamiento del ozono. Siguiendo las recomendaciones de la normativa internacional existente para la evaluación del impacto del ciclo de vida, en este estudio se utilizó un método de evaluación de impacto que incluye diversas categorías de impacto. En el caso de cambio climático, se encontró que la etapa que genera mayor impacto ambiental es la transformación de aceite en biodiesel, dado lo intensivo en energía y materias primas.

Palabras clave: Biodiésel; análisis de ciclo de vida; biocombustibles; aceite vegetal usado

1. Introducción

En 2013 cerca del 80% el consumo mundial de energía fue suministrado por los combustibles fósiles, mientras que al rededor del 20% fue derivado de energías renovables. La tendencia de los últimos cien años en el uso de energía fósil parece estar cambiando, ya que en muchos países la proporción en el uso de energías renovables ha crecido de manera importante en las últimas décadas Esta tendencia se

puede observaren un dato relevante: mientras que en el año 2005 55 países tenían políticas tendientes a la promoción y uso de energías renovables, en 2011 la cifra alcanza a 118 y 144 en 2015 [1,2].

Colombia ha venido incursionado progresivamente en el campo de los biocombustibles, dicha incursión se vio reflejada en la expedición de la Ley 693 del 2001 que promueve la producción y utilización de alcoholes carburantes en el territorio nacional, y de la Ley 939 de 2004

How to cite: Vidal-Benavides, A. I., Quintero-Díaz, J. C., and Herrera-Orozco, I., Análisis de ciclo de vida de la producción de biodiesel a partir de aceite vegetal usado. DYNA 84(201), pp. 155-162, 2017.

que pretende estimular la producción y comercialización de biocombustibles de origen vegetal o animal para uso en motores diésel. Estas políticas estuvieron orientadas a diversificar la canasta energética con criterios de sostenibilidad ambiental, desarrollo agroindustrial y autosuficiencia energética [3]. El uso de biocombustibles supone algunos beneficios como la mejora de la combustión interna de los motores y la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, existe una evidente discrepancia respecto a ambientales perjudiciales sobre el suelo y la biodiversidad, debido a la extensión de la frontera agrícola generada por cultivos utilizados en los biocombustibles de primera generación, tales como caña de azúcar y palma de aceite. Uno de los argumentos expresados por los escépticos, es el riesgo que se puede generar sobre la seguridad alimentaria, debido al incremento en el precio de los cereales [4], tales indicios han generado una dudosa reputación de estos combustibles respecto a sus beneficios ambientales.

Con el fin de no utilizar materias primas alimenticias para producción de combustibles, se han considerado alternativas tales como el reciclaje de materiales residuales, lo que ha sido considerado como una importante estrategia en el campo de la innovación ambiental de productos [5]. Un claro ejemplo de material residual potencialmente reutilizable es el aceite vegetal usado (AVU), también llamado aceite de fritura o de cocina. El Aceite de cocina usado provoca graves problemas ambientales, a modo de ejemplo, un litro de aceite vertido en un curso de agua puede contaminar hasta 500.000 litros [6]. Es por ello que dicho residuo se presenta como una adecuada materia prima para la producción de biodiésel. Las experiencias llevadas a cabo en diversos países, han mostrado excelentes resultados, tal es el caso de España, donde existen sistemas de recolección de AVU tanto en hogares, como restaurantes, hoteles e industrias de alimentos [7]. En el caso de Colombia, existe un problema claramente identificado y es que la cultura del reciclaje de AVU es aún incipiente. Adicionalmente, no existe una legislación que regule la disposición de este residuo al no estar clasificado como una sustancia peligrosa para la salud humana y el ambiente, aun teniendo las características para ser considerado como tal [6].

Lo anterior genera un interesante espectro de posibilidades que permite pensar que existe en Colombia, el potencial para producir biodiésel a partir de AVU. Para ello, es necesario establecer sus ventajas ambientales.

Con la finalidad de conocer el impacto ambiental de la fabricación de biodiésel a partir de AVU, es necesario analizar toda la cadena productiva de este proceso desde la adquisición del aceite usado, su limpieza y transformación y su uso final como combustible. Este análisis se realiza por medio de la herramienta conocida como Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV constituye una de las principales herramientas para valorar el desarrollo sostenible de los productos y servicios. Es una herramienta de gestión ambiental que evalúa de modo sistemático los impactos ambientales de un producto a través de su ciclo de vida desde la adquisición de la materia prima hasta el uso final [8].

Esta herramienta de gestión ambiental se encuentra desarrollada a través de las normas ISO 14040 e ISO 14044 (Organización Internacional de Normalización) sobre gestión

ambiental [9], donde se presenta la metodología, los principios y conceptos básicos para realizar el análisis. El ACV está definido por las fronteras del sistema en estudio y consiste en llevar la contabilidad de los impactos ambientales más significativos (gases de efecto invernadero, acidificación, eutrofización, etc.) asociados a los materiales y la energía consumida y generada dentro de los límites de ese sistema para obtener el producto deseado. A través de la identificación de la función del sistema en estudio, se establece la unidad funcional, la cual es una magnitud física que describe una propiedad del producto, cantidad (1L, 1Kg) energía contenida (1KJ), servicio que presta (1Km), etc. con el fin de cuantificar, referida a esta unidad, las corrientes de materia y energía que entran y salen de los límites del sistema [10].

Existe un reciente e importante número de estudios sobre la producción de biodiésel a partir de AVU, donde se evalúa su viabilidad técnica demostrando que se pueden alcanzar rendimientos hasta del 90% empleando catalizadores alcalinos, relaciones metanol/aceite entre 7/8 y temperaturas entre 30 y 50°C [11-14]. Sin embargo, son significativamente pocos y recientes, los trabajos encontrados donde se evalúen los impactos ambientales generados por el biodiésel derivado de este novedoso proceso [15,16]. La mayoría de estudios de ACV para la producción de biodiésel se han realizado a partir de otras fuentes de materias primas [17,18].

En este trabajo, se desarrolla un ACV de la producción de biodiésel proveniente de AVU, teniendo en cuenta las condiciones y características de las tecnologías de producción que se vienen desarrollando en el país. Teniendo como motivación principal, suplir parte de la información que hace falta sobre los aspectos ambientales de mayor relevancia en el proceso en estudio.

2. Metodología

La metodología desarrollada, está orientada hacia dos áreas claramente identificadas, por una parte, el análisis de procesos y por otra, la evaluación ambiental. En el caso del análisis de procesos, teniendo en cuenta que no siempre se cuenta con información de todas las etapas del proceso en estudio, fue necesario simular con ayuda de la herramienta computacional Super Pro designer® 4.5, aquellas etapas de las cuales no se contó con información. Por otra parte, la evaluación ambiental, se basó en el procedimiento establecido en la Norma ISO 14040, que contiene los principios y marco de referencia para el ACV [8,9]. El desarrollo del ACV, estuvo soportado, al igual que en el caso del análisis de procesos, en una herramienta informática SIMAPRO™.

Los pasos desarrollados como parte de la metodología, iniciaron con una búsqueda exhaustiva de información relacionada con el proceso, posteriormente se desarrollaron los balances de materia y energía, y finalmente se llevó a cabo el ACV del biodiésel de AVU, aplicando las diversas etapas de la metodología.

2.1. Búsqueda de información

Incluyó la descripción detallada de las etapas que comprende la producción de biodiésel de AVU, a partir de la

revisión bibliográfica de documentos sobre experiencias reales de producción de biocombustibles y en artículos de investigación. Se determinaron características específicas y datos cuantitativos de los materiales utilizados en cada etapa del proceso, y sobre las fuentes de energía necesaria para la transformación de los mismos. Se dio prioridad a datos de investigaciones realizadas en Colombia y cuando no fue posible obtener datos cuantitativos para este país, se utilizaron de otros países. También fue necesario realizar suposiciones referentes a datos técnicos de los cuales no fue posible obtener información específica.

El proceso estudiado comprende la recolección de AVU en camiones, para ser transportado hacia la planta. En la etapa de limpieza el aceite usado, se filtra y se disminuye su acidez para posteriormente ser conducido al proceso de transesterificación, donde el aceite usado reacciona en presencia de un alcohol (metanol) y un catalizador básico (metóxido de sodio) para generar biodiesel. El proceso termina con la distribución y uso del biocombustible.

2.2. Balances de materia y energía

Se realizó la identificación de entradas y salidas de materiales y energía utilizada en las diferentes etapas de producción.

2.3. Análisis del ciclo de vida

Se desarrollaron las cuatro etapas que comprende el ACV.

2.3.1. Definición del objetivo y alcance del estudio

Esta fase de la metodología establece el objetivo buscado con el estudio y el alcance esperado, así mismo, el nivel de detalle que permite alcanzar el objetivo propuesto. En la Fig. 1, se presentan en forma esquemática los límites del sistema estudiado.

El alcance, garantiza que se obtenga información de las etapas de producción de biodiesel a partir de AVU, de una forma tan cercana a la realidad como sea posible. El enfoque de este estudio, se denomina “de la cuna a la tumba” [19], cuantificando entradas y salidas del proceso, desde la extracción de materias primas hasta el uso del producto.

2.3.2 Análisis de inventario

Se determinaron los flujos de entrada y salida de materiales y energía y se calcularon los requerimientos para

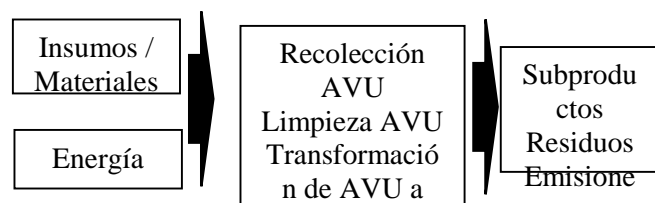


Figura 1. Límite del sistema de producción de biodiesel de AVU.
Fuente: Elaboración propia.

la producción de biodiesel y las emisiones producidas con el fin de establecer las principales fuentes de emisión de GEI y/o sustancias contaminantes.

2.3.3. Evaluación de impacto

Se seleccionó el método de cálculo Environmental Product Declarations (EPD) o Declaración ambiental de productos, el cual aporta información cuantitativa de impactos ambientales de un producto en su ciclo de vida. El método EPD incorporado en SimaPro 8.0.1, analiza las categorías de impacto Energía no renovable, Cambio climático, Agotamiento del ozono, Acidificación, Formación de oxidantes fotoquímicos, Eutrofización [20,21].

2.3.4. Interpretación de resultados

De acuerdo con los impactos y emisiones del proceso, la interpretación de los resultados permitió establecer las conclusiones respecto al potencial de deterioro medioambiental generado por el mismo y la conveniencia de realizar mejoras en el proceso de producción para reducir los impactos.

2.4. Herramientas informáticas utilizadas

Tal como se describió en apartados anteriores, fue necesario el uso de herramientas informáticas para desarrollar por una parte, el análisis del inventario del ciclo de vida y por otra la evaluación de los impactos. En el primer caso, los inventarios de las etapas de las cuales no se contaba con información del proceso, fueron realizados utilizando el software SuperPro Designer® 4.5 comercializado por Intelligent, Inc., el cual la simulación, evaluación y optimización de procesos integrados en una amplia gama de industrias biotecnológicas. En este estudio en concreto, se desarrolló la simulación de procesos en estado estacionario. Para realizar los cálculos de la energía, se utilizó la teoría básica para el cálculo de la potencia de las operaciones que requieren sistema de mezclado por agitación mecánica [22].

Por otra parte, para la evaluación de los impactos del ciclo de vida, se usó la herramienta informática comercial denominada SIMAPRO™ (<http://www.pre.nl/simapro>). SimaPro es una herramienta desarrollada por Pré Consultants analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto o proceso de una manera sistemática y consistente cumpliendo las recomendaciones de las normas ISO 14040 e ISO 14044. El software cuenta con la base de datos Ecoinvent que proporciona datos a nivel mundial sobre variedad de procesos. Una vez desarrollados los inventarios de las diferentes etapas del proceso, esta información se ingresó en el software y se obtuvieron los datos de los impactos evaluados, a partir de los factores de caracterización de las corrientes identificadas en el inventario.

3. Resultados

Los resultados que se describen a continuación presentan de manera detallada los inventarios cada una de las etapas del proceso, los impactos generados de acuerdo a las categorías de impacto evaluadas y los factores que más peso tienen en este resultado.

Tabla 1.
Entradas y salidas etapa de recolección de AVU.

Sub Proceso	Entrada			Salida	
	Insumo	Materia (kg)	Fuente de energía	Insumo	Salida/Emisión (kg)
Recolección	Gasolina	4,87*	Gasolina	Gasolina	Emisiones calculadas por SimaPro

* Kg corresponden al consumo para la distancia total estimada.
Fuente: Elaboración propia.

3.1. Análisis de inventario

Los resultados del análisis de inventario contienen la información detallada de las entradas y salidas de materia y energía de cada uno de los cuatros subprocesos evaluados. En la Tabla 1 se presentan las entradas y salidas calculadas del subproceso de recolección del aceite en donde se observa que el factor principal que aporta al impacto es el combustible.

En la Tabla 2 se presentan las entradas y salidas de materia y energía calculadas para el subproceso de limpieza del aceite vegetal usado obtenido en la etapa de recolección. Se observa que las principales fuentes de energía son la eléctrica y la fósil, siendo esta última fuente empleada de manera intensiva para el calentamiento en las etapas de secado, mientras que el agua y el hidróxido de sodio son los materiales más importantes que se involucran en el proceso, diferentes a los componentes de la misma materia prima.

En la Tabla 3 se presentan las entradas y salidas de materia y energía calculadas para el subproceso de transformación del AVU en biodiesel. De la misma manera

Tabla 2.
Entradas y salidas etapa de limpieza AVU.

Sub Proceso	Insumo	Entrada		Salida		
		Materia (kg)	Energía (kJ)	Fuente de energía (kJ)	Salida. atm (kg)	Salida al proceso (kg)
Secado 1	Ácido Oleico	5,00	-	-	-	5,00
	Sólidos	4,00	-	-	-	4,00
	Triglicéridos	84,00	-	-	-	84,00
	Agua	5,00	-	-	-	-
	Agitación	-	7,37	Eléctrica	-	-
	Calentamiento	-	50.000	Diésel-Caldera	-	-
	Vapor de agua	N.A.	-	-	5,00	-
Filtración	Ácido Oleico	5,00	-	-	0,04	4,96
	Sólidos	4,00	-	-	4,00	-
	Triglicéridos	84,00	-	-	0,67	83,33
Neutralización	Ácido Oleico	4,96	-	-	-	-
	Triglicéridos	83,33	-	-	-	83,33
	NaOH	0,71	-	-	-	-
	Agua	0,71	-	-	-	1,03
	Agitación	-	6,11	Eléctrica	-	-
	Jabón	-	-	-	-	5,35
Centrifugación	Jabón	5,35	-	-	5,35	-
	Triglicéridos	83,33	-	-	-	83,33
	Agua	1,03	-	-	0,97	0,05
	Triglicéridos	83,33	-	-	-	83,33
Secado 2	Agua	0,05	-	-	0,05	-
	Agitación	-	5,63	Eléctrica	-	-
	Calentamiento	-	42.180	Diésel-Caldera	-	-

Fuente: Elaboración propia.

que en la etapa de limpieza, la energía fósil es la fuente más empleada para el calentamiento en las etapas de transesterificación y secado del biodiesel, mientras que la energía eléctrica es principalmente empleada para operaciones de agitación y mezcla. En esta etapa, el metanol, el hidróxido de sodio y el agua son los principales materiales empleados diferentes de los componentes de la materia prima.

Finalmente, en la Tabla 4 se presentan las entradas y salidas de materia y energía calculadas para el subproceso de distribución del biocombustible. Acá, al igual que en la etapa de recolección el principal insumo es el combustible empleado en el transporte.

Tablas 3.
Entradas y salidas etapa de transformación de AVU

Sub Proceso	Insumo	Entrada		Salida		
		Materia (kg)	Energía (kJ)	Fuente de energía (kJ)	Salida. atm (kg)	Sal. proceso (kg)
Mezcla Metóxido	Hidróxido de sodio	1,00	-	-	-	1,00
	Metanol	32,80	-	-	-	32,80
	Agitación	-	1,10	Eléctrica	-	-
	Bombeo	-	-	-	-	-
Trans-esterificación	Metanol	32,80	-	-	-	21,87
	Hidróxido de sodio	1,00	-	-	-	1,00
	AVU	100,00	-	-	-	-
	Agitación	-	5,30	Eléctrica	-	-
	Calentamiento	-	66.900	Diésel-Caldera	-	-
	Biodiesel	-	-	-	-	99,70
Destilación	Glicerina	-	-	-	-	11,23
	Biodiesel	99,70	-	-	0,01	99,69
	Glicerina	11,23	-	-	0,001	11,22
	Metanol	21,87	-	-	21,86	0,002
	Hidróxido de sodio	1,00	-	-	-	1,00
	Biodiesel	99,69	-	-	0,35	99,33
Decantación	Glicerina	11,22	-	-	11,23	0,35
	Metanol	0,002	-	-	-	0,002
	Hidróxido de sodio	1,00	-	-	0,99	0,01
Lavado	Biodiesel	99,33	-	-	-	99,33
	Metanol	0,002	-	-	-	0,002
	Hidróxido de sodio	0,01	-	-	-	0,01
	Glicerina	0,35	-	-	-	-
Decantación	Agua	50,00	-	-	-	50,00
	Agitación	-	9,89	Eléctrica	-	-
	Biodiesel	99,33	-	-	0,005	99,32
Decantación	Metanol	0,002	-	-	-	0,002
	Hidróxido de sodio	0,01	-	-	0,01	-
	Agua	50,00	-	-	0,50	49,50
	Biodiesel	0,005	99,32	-	-	99,32
Secado	Metanol	0,000	-	-	0,002	-
	Hidróxido de sodio	0,01	-	-	-	-
	Agua	49,50	-	-	-	0,50
	Agitación	-	10,13	Eléctrica	-	-
Secado	Calentamiento	-	49.915	Diésel-Caldera	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Entradas y salidas etapa distribución de AVU.

Sub Proceso	Entrada				Salida	
	Insumo	Materia (kg)	Energía (kJ)	Fuente de energía	Insumo	Salida/Emisión (kg)
Carga y transporte de biodiesel	Gasolina (Carro tanque)	5,44	-	Gasolina	Gasolina (Carro tanque)	Emisiones calculadas por SimaPro

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Evaluación de impacto

Aquí se presentan los principales impactos encontrados sobre los cuatro subprocesos, con respecto a las categorías de impacto: Calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, acidificación, eutrofización y fósiles no renovables. Se encontró que para los subprocesos de recolección y distribución, la principal fuente de impacto es el combustible, pues fue el único elemento considerado. Este combustible, trae una carga ambiental asociada a su proceso de producción, que impacta todas las categorías mencionadas.

En la Fig. 2, se presentan los impactos ambientales asociados a cada una de las categorías para los subprocesos de limpieza y de transformación. Se puede observar que en todas las categorías el factor que presenta el mayor peso en la generación de impactos es nuevamente el combustible, en este caso empleado para la generación de vapor. El hidróxido de sodio tiene asociados unos impactos que inciden en las categorías de calentamiento global, acidificación, eutrofización, no renovables y en menor proporción para la categoría de oxidación fotoquímica.

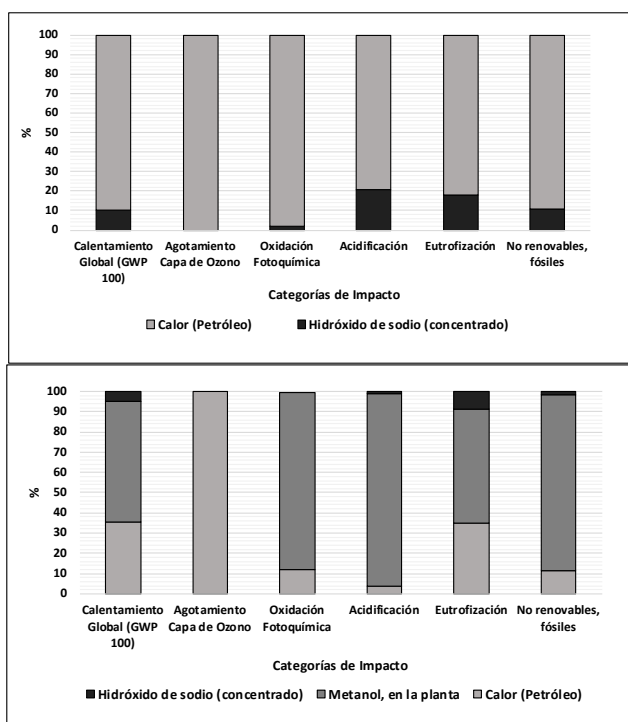


Figura 2. Impactos ambientales asociados a los subprocesos de limpieza (arriba) y transformación (abajo) del aceite vegetal usado. Fuente: Elaboración propia.

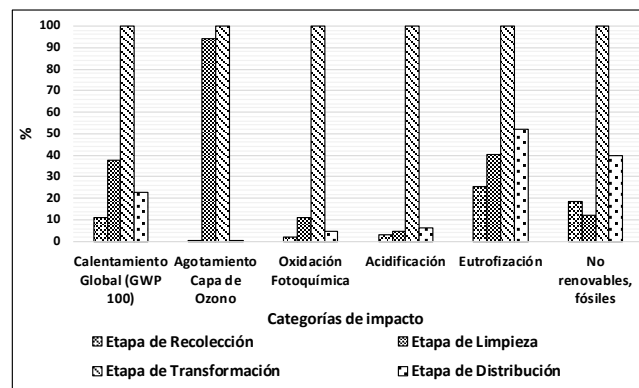


Figura 3. Comparación de impacto ambiental producción de biodiesel de AVU.

Fuente: Elaboración propia.

Los impactos asociados el subproceso de transformación del biodiesel tienen como una de las fuentes principales el uso de energía fósil, tal como se ha observado en los demás subprocesos.

Sin embargo, el metanol se presenta como el factor de mayor impacto en este subproceso incidiendo en las categorías de oxidación fotoquímica, acidificación y no renovables, principalmente. El hidróxido de sodio también se presenta como una fuente de impactos ambientales en las categorías de calentamiento global y eutrofización.

La Fig. 3 muestran los impactos relacionados con las diferentes categorías, asociados a cada uno de los cuatro subprocesos estudiados. Se observa que el subproceso de transformación o transesterificación es el que impacta en mayor medida al proceso global en todas las categorías evaluadas. En segundo orden de impacto sobre el proceso se encuentra el subproceso de limpieza, incidiendo sobre las categorías de agotamiento de la capa de ozono, eutrofización y calentamiento global.

Estos resultados correlacionan con el número de elementos materiales y energéticos que se involucraron en cada subproceso.

3.3. Eficiencia energética del proceso de producción de biodiesel

La eficiencia energética del proceso se determinó empleando la información de energía consumida presentada en el análisis de inventario de flujos de materia y energía. Estos valores sintetizados se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Consumo energético proceso de producción de biodiesel de AVU.

Etapa / Uso de energía		Masa (Kg)	Energía (KJ)	Elemento energético	Poder Calorífico (KJ/Kg)	Consumo Energético (KJ)
Recolección AVU	Combustible	4,87	-	Gasolina	43550	212088,5
Limpieza AVU	Agitación	-	19,12	Electricidad	-	19,12
Transformación AVU	Calentamiento	-	92180	Diésel	42700	92180
Distribución Biodiesel	Agitación	-	26,43	Electricidad	-	26,43
	Calentamiento	-	116815	Diésel	42700	116815
	Combustible	10,26	-	Gasolina	43550	446823
Total consume energético del proceso (KJ)						867952,0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.
Energía del biodiesel de AVU producido

Masa Biodiesel (Kg)	Poder Calorífico (KJ/Kg)	Energía biodiesel producido (KJ)
99,3	37200	3695076

Fuente: Elaboración propia.

Tomando una base de cálculo de 100 Kg de AVU, estequiométricamente en el proceso se producen 99,33 kg de biodiesel. Con este valor se calculó la energía contenida en esta cantidad de biodiesel, tal como se muestra en la Tabla 6.

La relación entre contenido energético de biodiesel (3.695.076 KJ) y el consumo energético de todo el proceso (867.952 KJ), arrojó un valor de 4,25 mostrando una ganancia energética que está principalmente asociada al contenido energético del AVU, que fue acumulado mediante el proceso de fotosíntesis de las oleaginosas.

3.4. Interpretación de resultados

Se encontró que, en la categoría de cambio climático, el mayor porcentaje de contribución se presenta en la etapa de limpieza del AVU (89,5%); en esta etapa se generan emisiones de gases de efecto invernadero originados por la producción y combustión del diésel utilizado en el calentamiento (caldera) y en menor proporción por la emisión que genera la producción del hidróxido de sodio (10,5%). Sin embargo, en la etapa de transformación del AVU, el subproceso de calentamiento que se realiza con el mismo combustible fósil que en la etapa de limpieza, contribuye con 37,5% en esta categoría de impacto. El metanol contribuye con un porcentaje de 59,6% y en menor porcentaje, el uso del hidróxido de sodio con 4,63%. Según estos porcentajes, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en el proceso analizado está dada por la producción y uso de combustible fósil (aceite), hidróxido de sodio y metanol. Respecto al hidróxido de sodio y el metanol, se puede decir que la contribución al impacto ambiental de estos insumos podría estar relacionada directamente a su proceso de producción, más que al uso en la producción de biodiesel. Estos insumos traen consigo una carga ambiental propia de su fabricación en la que se utiliza combustible fósil como energía para las unidades de proceso.

En la categoría de impacto agotamiento de la capa de ozono, se encontró que existe una contribución al impacto ambiental de 100% en las etapas de limpieza y transformación del AVU, lo que indicaría que en dichas etapas se presentan emisiones de clorofluorocarbonados (CFC), sin embargo debido a que estas sustancias se utilizan generalmente como refrigerantes en el sector industrial, estas emisiones no corresponden directamente al proceso de producción del biodiesel sino a la fabricación de los insumos utilizados en el proceso, como se mencionó anteriormente estas son las cargas ambientales atribuibles a etapas previas del proceso.

La formación de oxidantes fotoquímicos tiene una contribución del 98,1% en la etapa de limpieza del AVU dado por el uso de energía para calentamiento, sin embargo, en la etapa de transformación del AVU, no es éste el insumo que contribuye mayormente a la formación de estas sustancias.

En la etapa de transformación, es la producción y uso del metanol con una contribución de 88% el principal contribuyente para la generación de oxidantes fotoquímicos. La transesterificación de aceites para producir biodiesel se ha relacionado con emisiones de hidrocarburos, de los cuales el metano es capaz de reaccionar con radicales libre hidroxilo, oxígeno y óxidos de nitrógeno, para producir formaldehído y monóxido de carbono, compuestos denominados oxidantes fotoquímicos, que tiene la capacidad de afectar las propiedades de materiales orgánicos, la reproducción y el crecimiento de plantas y producir en el hombre y animales, dolor de cabeza y daños en el aparato digestivo [23].

En la categoría de impacto acidificación, también se presenta la mayor contribución por parte de la etapa de transformación de AVU (95%), específicamente por la producción y uso del metanol y en menor porcentaje en la etapa de limpieza por el uso de energía para calentamiento (79,4%). Según los resultados, en estas etapas se producen emisiones de dióxido de azufre (SO₂). Este compuesto puede reaccionar con radicales libre hidroxilos y vapor de agua y convertirse en ácido sulfúrico que se disuelve en el agua de la atmosfera y puede transportarse hacia la superficie terrestre en forma de lluvia acida, llamada recientemente *deposición ácida* que produce la alteración de las características químicas del medio que la recibe, disminuyendo el pH y ocasionando efectos negativos sobre los ecosistemas asociados [24].

En las etapas de recolección de AVU y distribución de biodiesel se utilizó un único insumo representado por el combustible para los vehículos recolector y distribuidor respectivamente, por lo cual la contribución para cada categoría de impacto siempre fue del 100%. Según la comparación por etapas, la mayor contribución al impacto por la producción y uso de combustibles fósiles, se presenta en la categoría de impacto cambio climático. Se considera que el uso de combustibles fósiles es la principal causa del cambio climático, debido a que las actividades de suministro (extracción, transporte y distribución), utilización y quema de combustibles contribuyen en aproximadamente el 75% de este fenómeno.

Como es evidente en todas las categorías de impacto, la mayor contribución está dada por la etapa de transformación de AVU y de forma predominante en la categoría de formación de oxidantes fotoquímicos y en acidificación; esta carga ambiental se atribuye principalmente a la producción y uso del metanol en el proceso. Se ha atribuido a la industria química dedicada a la producción de metanol a gran escala la emisión de residuos conformados por cobre (síntesis), níquel (generación de gas) y cobalto y molibdeno (desulfurización) [25] y en algunos casos se han evidenciado residuos altamente contaminantes como el glifosato.

El resultado de rendimiento energético en el proceso de producción de biodiesel, está sobrevalorado dado que no se contabilizó la energía consumida para la síntesis de los insumos químicos consumidos en el proceso (metanol e, hidróxido de sodio). Sin embargo, dado que el AVU es un residuo, no se incluyó el consumo energético para su producción, debido a que este es un residuo sin carga ambiental ni energética asociada dentro de los límites del sistema. A pesar de la sobrevaloración mencionada, este

valor de eficiencia energética encontrado para la producción de biodiesel a partir de ACV en cercano al encontrado en estudios similares realizados en procesos de producción de biodiésel, donde se encontró un valor de 3 [26].

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados es posible establecer que la etapa que genera mayor contribución al impacto ambiental es la transformación de AVU en biodiesel. En el caso de la categoría de cambio climático, la contribución a este impacto por parte de esta etapa es del 58%, representado por una emisión de 0,308 kg de CO₂ equivalente.

El ACV permitió evidenciar los impactos ambientales relacionados con la producción de biodiesel a partir de AVU, aun cuando su uso evita el impacto generado por la inadecuada disposición del aceite usado. Los impactos ambientales están asociados principalmente a las cargas ambientales que trae la producción de los insumos.

Las etapas de recolección de AVU y distribución de biodiesel son las que reflejan la menor contribución del impacto ambiental al proceso.

El rendimiento energético del proceso es positivo, lo que pone de manifiesto la viabilidad del proceso puesto que convierte un residuo altamente contaminante en un materia prima con menores cargas ambientales para un proceso que va camino de convertirse en fundamental desde el punto de vista de demanda de energía para el transporte.

Bibliografía

- [1] Cerdá, E., Economía de las energías renovables. Cuadernos de Economía de ICE. Universidad Complutense de Madrid. 83, pp. 5-9, 2012.
- [2] Renewables Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2015. [online]. [Date of reference: October 28th, of 2015]. Available at: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf
- [3] Consejo Nacional de Política Económica y Social. CONPES 3510. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. Bogotá. D.C.: Departamento Nacional de Planeación. República de Colombia., 2008.
- [4] Cardona-Alzate, C.A., Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: Contextos latinoamericano y mundial. Revista de Ingeniería. 29, pp. 190-120, 2009.
- [5] Canakci, M., The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. Bioresource Technology. 11, pp. 1-8, 2005.
- [6] Guerrero, C.A., Guerrero-Romero, A. and Sierra, F.A., Biodiesel production from waste cooking oil, biodiesel - feedstocks and processing technologies, Dr. Margarita Stoytcheva (Ed.), InTech, ISBN: 978- 953-307-713-0, [online]. Available at: <http://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies/biodiesel-production-from-waste-cooking-oil>.
- [7] Recoil recogida de aceite. Recogida integral de aceite vegetal usado de origen doméstico. Madrid. [en línea]. [consulta, 28 de octubre de 2015]. Disponible en: <http://www.recoils.com/RecogidaMunicRecoil.pdf>.
- [8] Avendaño, G., Campos, G. Herrera I, León, E. y Almanzar, G., Análisis de ciclo de vida como herramienta para el diseño inteligente de productos y la mejora de procesos. Optimización de procesos en ingeniería. Dirección Gestión del Conocimiento. Ed. EAN., 2015.
- [9] Comité Técnico AEN/CTN 150 Gestión ambiental. UNE-EN ISO 14044 Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices. (ISO 14044:2006). Madrid, España: AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación, 29 P., 2006.
- [10] ECOIL Project, Life cycle assessment as a decision support tool for the eco production of olive oil. Crete: European Commission's environmental instrument, the LIFE programme, 4 P., 2006.
- [11] Caldeira, C., Queirós, J. and Freire, F., Biodiesel from Waste cooking oils in Portugal: Alternative Collection Systems. Waste and Biomass Valorization. 6(5), pp. 771-777, 2015. DOI: 10.1007/s12649-015-9386-z
- [12] Bulla, E., Sierra, A. Emiro, F. y Guerrero, C., Producción de biodiésel usando aceites residuales de fritura y etanol por catálisis alcalina. Ingeniería Solidaria. 10(17), pp. 61-69, 2014.
- [13] Phan, A. and Phan, T., Biodiesel production from waste cooking oils. Fuel, 87(17-18), pp. 3490-3496, 2008. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.07.008
- [14] Font-de Mora, E., Torres, C. and Valero, A., Thermo-economic analysis of biodiesel production from used cooking oils. Sustainability, 7(5), pp. 6321-6335, 2015. DOI: 10.3390/su7056321
- [15] Junya, Y., Tatsuki, A., Nakamura, K., Yamada, K. and Sakaia, S., Life cycle assessment of hydrogenated biodiesel production from waste cooking oil using the catalytic cracking and hydrogenation method. Waste Management, 38, pp. 409-423, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.01.014
- [16] Hong-Chua, C., Mien-Lee, H. and Choong-Low, J., Life cycle emissions and energy study of biodiesel derived from waste cooking oil and diesel in Singapore. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(4), pp. 417-423, 2010. DOI: 10.1007/s11367-010-0166-5
- [17] Sanz-Requena, J.F., Guimaraes, A.C., Quirós-Alpera, S., Relea-Gangas, E., Hernandez-Navarro, S., Navas-Gracia, L.M., Martin-Gil, J., Fresneda-Cuesta, H., Life Cycle Assessment (LCA) of the biofuel production process from sunflower oil, rapeseed oil and soybean oil. Fuel Processing Technology, 92(2), pp. 190-199, 2010. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.03.004
- [18] Sander, K. and Murthy, G., Life cycle analysis of algae biodiesel. International Journal of Life Cycle Assessment. 15(7), pp. 704-714, 2010. DOI: 10.1007/s11367-010-0194-1
- [19] IHOBE, Sociedad pública de gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. [en línea]. [consulta, 28 de octubre de 2015]. Disponible en: <http://www.euresp-plus.net/sites/default/files/resource/An%C3%A1lisis%20de%20Ciclo%20de%20Vida%20y%20Huella%20de%20Carbono.pdf>
- [20] SimaPro Software and Sustainability Consulting. [en línea]. [consulta, 28 de Octubre de 2015]. Disponible en: <http://www.pre-sustainability.com/>.
- [21] International EPD® Cooperation. EPD® supporting annexes for Environmental Product Declarations, EPD. Version 1.0 dated 2008-02-29 <http://www.environdec.com>.
- [22] Perry, R. and Green, D., Perry's Chemical Engineers' Handbook. 7. New York, McGraw-Hill, 1999.
- [23] Pérez-Cortes, A.J. y Dumar-Oyola, K.J., Análisis de ciclo de vida para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera y etanol. Tesis de Grado, Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia, 83 P., 2011.
- [24] European Environment Agency. El Medio ambiente en Europa: Segunda evaluación. Capítulo 4. Acidificación. Madrid, España: European Environment Agency, 38 P., 2001.
- [25] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía 25. Guías para manejo seguro y gestión ambiental de 25 sustancias químicas. [en línea]. [consulta, 28 de octubre de 2015]. Disponible en: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosAmbientalesySectorial/Urbana/pdf/sustancias_qu%C3%ADmicas_y_residuos_peligrosos/guia_25_sustancias.pdf
- [26] Lechón, Y., Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. Fase II Análisis de ciclo de vida comparativo de biodiésel y diésel. CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Madrid: s.n., 2006. N° Doc CIEMAT/ASE/05-E0221/2.

A.I. Vidal-Benavides, received the BSc. Eng in Environmental Engineering in 2009 from the Universidad del Cauca, Colombia and the MSc. degree in

Environmental Sciences in 2016, from the Universidad de Antioquia in Medellín, Colombia. From 2010 to present, she had worked for environmental utilities and consulting companies in the area of environmental impact assessment of infrastructure and hydroelectric projects.

ORCID: 0000-0001-9376-3530

J.C. Quintero-Díaz, received the BSc. Eng in Chemical Engineering in 1993, the MSc. degree in Chemical Engineering in 1997 both from Universidad Nacional de Colombia, and the PhD degree in Chemical and Environmental Engineering in 2005, from Universidad de Santiago de Compostela, Spain. From 1998 to present, he had worked in environmental projects oriented to biodegradation of Persistent Organic Pollutants in soil and water sources and worked in the bioprocesses development like biofuels production and pharmaceutical products. He is currently researcher of Bioprocess Group and associate professor of Chemical Engineering Department, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia.

ORCID: 0000-0003-4727-7392

I. Herrera-Orozco, is researcher of the Energy System Analysis Unit at the Energy department in CIEMAT. BSc in 1997 and PhD in 2004 on Chemical Engineering, with emphasis on environmental assessment, by the Industrial University of Santander, Colombia and Rovira & Virgili University, Spain. He has taken part in several national and international events (courses, congresses, seminars, colloquia), on life cycle analysis (LCA), environmental evaluation, integral management of residues, cleaner production, and environmental and socioeconomic aspects of the energy, some of them supported by the organizing organisms in diverse national and international institutions (Colombia, Mexico, Ecuador and Spain). He is author or co-author of more than forty articles, communications and collective works, related to his specialty. In the LCA area application, he collaborates with different international institution (SETAC, SPLCA)

ORCID: 0000-0003-1864-152X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Medio Ambiente

Oferta de Posgrados

Especialización en Aprovechamiento de
Recursos Hidráulicos

Especialización en Gestión Ambiental

Maestría en Ingeniería Recursos Hidráulicos

Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo

Doctorado en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Doctorado Interinstitucional en Ciencias del Mar

Mayor información:

E-mail: acma_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 5105