

Análisis del ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir del descarte proveniente de la industria de la curtiduría

Life cycle analysis of biodiesel production from flesh from the tannery industry

José de Jesús Rodríguez Ibarra*, Juan T. Frías Hernández**, Víctor Hugo Rangel Hernández***

RESUMEN

La industria de la curtiduría es un foco de contaminación debido a la generación de residuos peligrosos y de manejo especial. Entre estos elementos se encuentra el descarte. Sobre este elemento, el actual estudio busca determinar si puede contar con un valor agregado para nuevas fuentes de empleo y la reducción de la contaminación: la producción de biodiésel promete ser la alternativa sustentable, económica y socialmente viable. El sistema de estudio se dividió en 3 procesos unitarios con una base de 1 kg de biodiésel: a) recolección del descarte, b) cocido y rendido, c) esterificación y transesterificación. Las categorías de impacto evaluadas fueron el consumo de energía primaria no renovable y el potencial de emisiones de gases de efecto invernadero. Como resultado del estudio se tuvo que la curtiduría resulta ser una fuente de producción de biodiésel económica y ambientalmente viable gracias a su menor impacto ambiental producido. Con la disponibilidad de descarte anual (79 200 000 kg) se pueden reducir las emisiones de combustión a 11 980 300 kg de CO₂ en el aire anuales.

ABSTRACT

The tanning industry is a source of contamination by hazardous waste generation and special handling. One of these elements is the flesh, which help this study to determine if fleshing is able to add value to a source of employment and a reduction of pollution: production of biodiesel promises to be the sustainable alternative, economically and socially viable. The study was divided into 3 unit processes with a base of 1 kg of biodiesel: a) flesh collection, b) cooked and rendered, c) esterification and transesterification. The impact categories evaluated were the primary energy consumption and the potential nonrenewable emissions of greenhouse gases. As a result of this article, it is had that the tanning is a source of biodiesel economically and environmentally feasible for the least environmental impact occurred. With the availability of annual flesh (79 200 000 kg) can be reduced combustion emissions of CO₂ from the air to 11 980 300 kg per year.

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de las curtidurías en México se encuentran localizadas en la zona metropolitana de la Ciudad de México y en los estados de Nuevo León, Jalisco y Guanajuato. Este último es el mayor productor a nivel nacional, ya que genera alrededor del 65 % del curtido y acabado de cuero. En la ciudad de León, la industria de la curtiduría representa un rubro económico importante para la región; existen alrededor de 500 tenerías [1]. Sin embargo, estas actividades acarrearán problemas de contaminación, particularmente en los sitios donde se almacenan y procesan los residuos llamados "sebaderos". En la industria de la curtiduría, al proceso que consiste en limpiar la piel por el lado de la carnaza, dejándola libre de grasa y carne excedente se le conoce

Recibido: 27 de abril de 2012
Aceptado: 23 de octubre de 2012

Palabras clave:

Metil-éster; biodiésel; descarte; sebo; esterificación; transesterificación; potencial de calentamiento.

Keywords:

Methyl ester; biodiesel; fleshing; tallow; esterification; transesterification; warming potencial.

*Departamento de Ingeniería Ambiental. División de Ciencias de la Vida. Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato. Recife n. 218, colonia La Carmona, León, Guanajuato, México. Correo electrónico: cjesus_57@hotmail.com

** Departamento de Ingeniería Ambiental. División de Ciencias de la Vida. Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato. Km 9,6, Carretera Irapuato-León, Ex-Hacienda El Copal, C. P. 36500. Correo electrónico: juanfrias1956@hotmail.com

*** Departamento de Ingeniería Mecánica. División de Ingenierías. Campus Irapuato-Salamanca. Universidad de Guanajuato. Comunidad Palo blanco s/n, Salamanca, Guanajuato, C. P. 36885. Correo electrónico: vrangel@ugto.mx

como “descarne”. El descarne aparece listado como residuo de manejo especial en la Normatividad Mexicana [2], lo cual obliga a su aprovechamiento para su reutilización y reciclado de materiales secundarios, de acuerdo a un plan de manejo por una empresa autorizada. No obstante, esto no se cumple y la mayoría de los desechos tienen como destino final el drenaje municipal, los tiraderos clandestinos -tales como el Arroyo Hondo que desemboca en el Río Turbio-, los tiraderos particulares y, en el mejor de los casos, el parque de lodos o el relleno sanitario. Para comprender el impacto ambiental de esto, basta tener en cuenta que 1 L de aceite contamina 10 000 L de agua [3]. Se considera que los descarnes representan contenidos de grasas del 12 % al 40 % y de proteínas entre 10 % y 20 % de su peso, entonces, estos desechos -tratándolos adecuadamente- representan un valor económico para la industria del sebo y la proteína.

En México, actualmente no existe un proceso adecuado que permita el tratamiento de estos residuos, pero sobre todo que represente un negocio, por ello es importante promover la investigación y el desarrollo tecnológico que fomenten la factibilidad técnica y económica de diversas opciones de manejo.

La producción de biodiésel promete ser una alternativa viable para el manejo de estos residuos ya que tanto el proceso de producción como las emisiones de combustión, en comparación con el diésel, son significativamente favorables. Cabe mencionar que México ratificó en 1993 la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático; del mismo modo, en 1998 firmó el Protocolo de Kioto, ratificándolo en el 2000 [4].

Este estudio presenta los resultados obtenidos en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del biodiésel, en comparación con el diésel, respecto al consumo de energía primaria no renovable y las emisiones de gases de efecto invernadero.

El proceso de curtido de pieles consiste en 4 operaciones básicas:

A. Ribera. Se recibe la piel fresca, se lleva a cabo un remojo para lavar las pieles de impurezas (puede usarse una solución alcalina para disolver las proteínas). Se efectúa la etapa del pelambre, encalado y depilado para remover pelo, la epidermis y destruir proteínas, nervios, vasos sanguíneos. Se realiza un descarnado: una operación mecánica o manual para retirar la endodermis (formado por tejido proteico y grasa).

B. Curtido. En éste se logra impartir estabilidad química y física a la piel evitando su putrefacción y haciéndola resistente a cambios de temperatura y humedad. Se emplean materiales de origen vegetal (curtido vegetal) o sales inorgánicas, especialmente sales de cromo (curtido al cromo).

C. Recurtido, Teñido y Engrase (RTE). Se logra que el cuero adquiera suavidad, color y otras características que son necesarias para fabricar artículos comerciales.

D. Acabado. Se imparten al cuero las características específicas que el mercado impone a cada tipo de producto (como grabado, color, tacto). [5]

La cantidad y composición de los residuos que se generan dependen principalmente de la técnica de curtido utilizada, pero también del tipo de operaciones, por lo que el ACV parte de estos residuos por la variedad que pueda presentar y la distinta procedencia.

Rudolf Diesel realizó pruebas de motor con aceites vegetales. Así, uno de los prototipos de su nuevo motor presentado en la exhibición mundial de París en 1900 funcionó con aceite de cacahuete y lo hizo tan suavemente que pocos espectadores se dieron cuenta. Diesel decía: “El aceite vegetal podrá convertirse, con el tiempo en algo tan importante como lo es hoy el petróleo”. [6]

La transesterificación con alcoholes de cadena corta ha hecho que actualmente la denominación “biodiésel” se use para productos obtenidos por esta tecnología. La reacción entre triglicéridos y alcoholes de cadena corta, produciendo glicerina (también llamada “glicerol”) y los ésteres de ácido graso correspondientes al alcohol respectivo, fue descrita en primer lugar en 1852 [6].

Las mezclas al 20 % de biodiésel son las más relevantes en la comercialización de este biocombustible en los Estados Unidos [6]. En la Unión Europea se prevé que las ventas de biodiésel aumentarán aún más en un futuro próximo debido a la Directiva Europea para la Promoción del Uso de los Biocombustibles, publicada por el Consejo Europeo y el Parlamento Europeo en 2003.

Cabe mencionar que el uso del biodiésel en motores diésel no supone cambios significativos al motor: solo afecta a sellos, juntas, empaquetaduras, manguitos y conductos, particularmente aquellos anteriores a 1993; del mismo modo, el cambio atañe a conductos fabricados en goma natural o nitrilo, materiales que se encuentran principalmente en el sistema de combustible (sellos de las bombas de inyección y tuberías del sistema) puesto que el biodiésel es un disolvente medio.

Ahora bien, el biodiésel se puede usar en forma pura B100 o puede ser combinado con el diésel en la mayoría de la maquinaria moderna. Una ventaja de lo anterior es que contribuye a la larga vida del inyector del combustible por su mayor lubricidad, que reduce el ruido en el motor y que ofrece una mayor facilidad en el inicio de la combustión (todo en proporción a la cantidad de biodiésel usado). [7]

Composición de la materia prima para la producción de biodiésel

Las materias primas que se pueden utilizar en el proceso son tan variadas que van desde aceite de semilla de colza, aceite de semilla de girasol, aceite de soja, aceite de palma, aceite de cacahuete, aceites comestibles alternativos, aceites no comestibles y las grasas y aceites animales; además, una materia potencial para estos efectos es el sebo del ganado infectado que no se puede usar para consumo humano (aún está en prueba de

investigación si con las etapas de purificación del biodiésel se destruyen o desactivan los priones contenidos en el material) [6].

Las grasas animales contienen hasta 14 tipos diferentes de ácidos grasos (tabla 1), entre ellos se dan elevados contenidos de ácidos grasos saturados que generan metil ésteres con malas propiedades en frío, lo que conlleva problemas en una operación invernal. Por otro lado, estos metil ésteres hacen que tales ácidos sean unos excelentes combustibles por lo que respecta a su poder calorífico y el número de cetano. Así, altos niveles de ácidos grasos saturados (láurico, mirístico, palmítico, esteárico, araquídico) elevan el punto de enturbiamiento, elevan el número de cetano, reducen los NOx y mejoran la estabilidad a la oxidación. Más poliinsaturados (linoleico, linolénico) reducirán el punto de enturbiamiento y el cetano, así como la estabilidad (excepto que se utilicen aditivos de estabilidad), pero elevarán los NOx [7].

Tabla 1.
Composición en porcentaje de ácidos grasos de distintas grasas y aceites [8].

Ácidos grasos	Sebo	Manteca de cerdo	Coco	Fruto de palma	Palma	Azafrán	Cacahuete	Maíz	Girasol	Semilla de soja
Caprílico (C ₈ H ₁₆ O ₂)	-	-	5 a 9	2 a 4	-	-	-	-	-	-
Cáprico (C ₁₀ H ₂₀ O ₂)	-	-	4 a 10	3 a 7	-	-	-	-	-	-
Láurico (C ₁₂ H ₂₄ O ₂)	0,2	-	44 a 51	45 a 52	-	-	-	-	-	-
Mirístico (C ₁₄ H ₂₈ O ₂)	2,3	1	13 a 18	14 a 19	1 a 6	-	0,5	0 a 2	-	0,3
Palmítico (C ₁₆ H ₃₂ O ₂)	25 a 30	25 a 30	7 a 10	6 a 9	32 a 47	5,2	6 a 11	8 a 10	6	7 a 11
Palmitoleico (C ₁₆ H ₃₀ O ₂)	2 a 3	2 a 5	-	0 a 1	-	-	1 a 2	1 a 2	-	0 a 1
Esteárico (C ₁₈ H ₃₆ O ₂)	21 a 26	12 a 16	1 a 4	1 a 3	1 a 6	2,2	3 a 6	1 a 4	4,2	3 a 6
Oleico (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	39 a 42	41 a 51	5 a 8	10 a 18	40 a 52	76,3	39 a 66	30 a 50	18,7	22 a 34
Linoleico (C ₁₈ H ₃₂ O ₂)	2	4 a 22	1 a 3	1 a 2	2 a 11	16,2	17 a 38	35 a 56	69,3	50 a 60
Linolénico (C ₁₈ H ₃₀ O ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	2 a 10
Araquídico (C ₂₀ H ₄₀ O ₂) y Eicosenoico (C ₂₀ H ₃₈ O ₂)	0,4 a 1	-	-	1 a 2	-	-	5 a 10	-	1,4	5 a 10
Behénico (C ₂₂ H ₄₄ O ₂) y eureico (C ₂₂ H ₄₂ O ₂)	0,3	2 a 3	-	-	-	-	-	0 a 2	-	-
Otros	0,5	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-

Reacciones

• Esterificación

En los materiales de alta acidez, los ácidos grasos libres se pueden transformar en jabones en presencia de soluciones básicas y causar un bajo rendimiento de reacción, por lo cual se debe realizar una catálisis ácida en presencia de un alcohol (esterificación) antes de la transesterificación. Se producen dos reacciones

en la esterificación: por un lado, los ácidos grasos libres se transforman en metil ésteres y agua (figura 1), por otro, los triglicéridos se transforman en metil ésteres y glicerina (figura 2). Esta segunda reacción no convierte un porcentaje mínimo de triglicéridos. Las fases que se separan luego de la catálisis ácida son una fase rica en metanol y otra rica en triglicéridos. En la primera se concentra el agua formada y el exceso de metanol; en la segunda fase se concentran los ésteres metílicos formados y los triglicéridos [9].

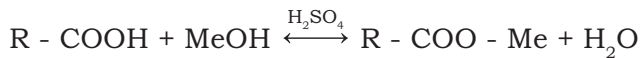


Figura 1. Esterificación, reducción de los ácidos grasos libres.

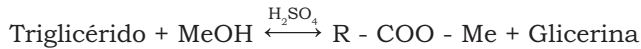


Figura 2. Esterificación, conversión de triglicéridos a ésteres metílicos.

Transesterificación o alcoholólisis

Es la reacción de un mol de triglicérido con tres moles de un alcohol para formar un mol de glicerol y tres moles de ésteres de ácidos grasos. El proceso consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles, en las que la molécula de triglicérido se convierte paso a paso en diglicérido, monoglicérido y glicerina (figura 3). Para eficientar la reacción, la mayoría de las plantas de producción comercial de biodiésel añaden un exceso de metanol por encima de la relación estequiométrica. Otra ventaja es que los dos productos, glicerina y Metil Éster de Ácido Graso (FAME, Fatty Acid Methyl Ester), son inmiscibles y, por tanto, forman dos fases: una superior de éster y una inferior de glicerina. Independientemente del alcohol utilizado, debe estar presente un tipo de catalizador para conseguir altos rendimientos en éster en condiciones de reacción relativamente suaves. La solubilidad del metanol en aceites y grasa es baja, de manera que tienen que ser mezclados intensamente para que se produzca la transesterificación [6].

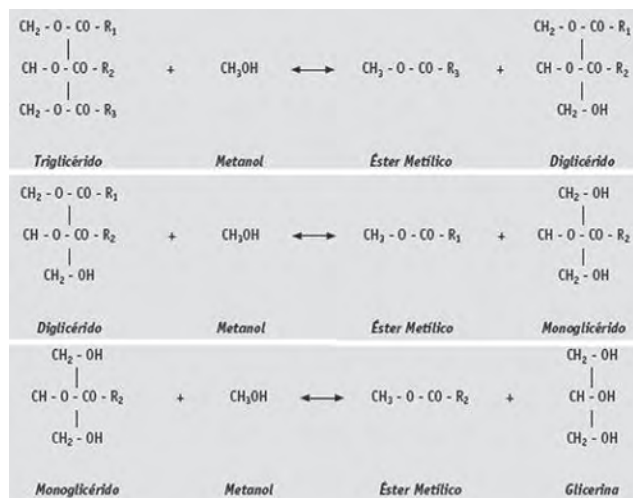


Figura 3. Reacción de transesterificación de triglicéridos con metanol.

Evaluación de impactos

Considerando los impactos negativos de la producción, conversión y transporte del combustible, se han desarrollado propuestas para evaluar los riesgos eco-

lógicos del biodiésel y del diésel convencional. A principios de los años 1980 se introdujeron balances de energía para este fin y, debido a los impactos negativos -comparando las distintas fuentes de energía según su relación de gasto energético fósil para su producción contra energía obtenida-, este método se extendió en los años 1990. El objetivo de ello era crear el ACV o ecoequilibrio como un medio eficiente de comparar la demanda de recursos finitos y las emisiones de ciertos compuestos ecológicamente relevantes a través del ciclo completo de la vida del combustible. En 1997, las actividades para estandarizar los procedimientos para los ACV dieron como resultado las normas ISO 14040 e ISO/DIS 14041 [6].

El propósito de un ACV es comparar ciertas categorías de impacto ecológico de una fuente de energía renovable y la fuente finita de energía que se puede sustituir; la base de comparación es la producción de la misma energía útil [10]. Las etapas que se incluyen en el balance de biodiésel a partir de descarte procedente de la curtiduría son producción de grasa (transporte y cocido del descarte), separación de la grasa y conversión (esterificación y transesterificación). Para el diésel fósil se consideran la exploración y extracción, el transporte (tierra, oleoductos o transporte marítimo), la refinería, la distribución regional y la combustión en el vehículo. En el caso del descarte de la curtiduría, no se puede hacer un análisis antes de la recolección del descarte por ser multifuente y porque cada fuente utiliza un proceso propio de curtido de la piel para dar un acabado. Tales procesos le dan propiedades características al descarte desechado, con lo que cada fuente tendría balances de energía diferentes dependiendo de éstos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el transporte y recolección del descarte se analizó el gasto en combustible del recorrido para recolectar 100 t de descarte y los kilómetros recorridos por un camión de motor diésel con capacidad óptima de carga de 10 t con el programa informático Google Earth para determinar distancias de traslado. Al final modelar el gasto necesario para producir 1 kg de biodiésel según (1).

$$MJ \text{ combustible} = L \text{ combustible} \times PC \text{ combustible} \quad (1)$$

(1) describe el cálculo de energía en el transporte.

En ésta: MJ combustible: MJ gastados de combustible en el recorrido;

L combustible: litros de combustible gastados;

PC: poder calorífico del combustible en MJ/L.

Antes de cualquier análisis se debe determinar el contenido de humedad en el aceite ya que el sebo puede presentar una reacción indeseable que se produciría en lugar de biodiésel jabones según el catalizador utilizado (figura 4). La humedad se determinó según la norma NMX-F-211-1987 [11].

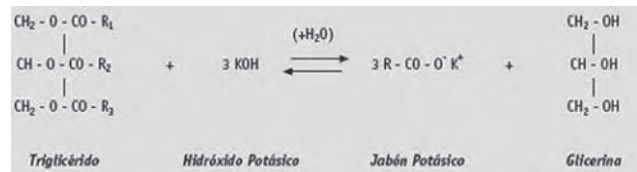


Figura 4. Reacción de saponificación.

La caracterización de la grasa se realizó para determinar la composición de los ácidos grasos y el peso molecular del sebo o grasa, efectuándose ésta en el Laboratorio Químico Industrial y Agrícola, S. A. de C. V. (LAQUIMIA). Este análisis determina el balance estequiométrico de las reacciones de conversión.

Para el proceso de cocido del descarte y separación de la grasa se hicieron pruebas en la planta de procesamiento de descarnes de la empresa Procesadora de Descarnes La Viga S. A. de C. V., la cual en su actual estado se encuentra en operación para la compra-venta de grasa (según el proceso de cocido adoptado con vapor, generado por el consumo de gas LP, agua y electricidad). La separación de la grasa se hace acidificando en otra etapa el descarte para separar la grasa del agua (rendido); en estos procesos se analizará el impacto ambiental que tiene cada uno.

En el proceso de esterificado y de transesterificado, los gastos de reactivos, los rendimientos y el análisis de los productos acoplados se hicieron en pruebas piloto en laboratorio equipado y en condiciones para realizar los procesos (comparables con el análisis estequiométrico de las reacciones). Además de esto, se buscó en el mercado el precio de los productos utilizados y el precio tentativo de venta de los obtenidos para ver lo redituable que puede presentarse un proyecto a partir de esta materia prima.

Se analizó la literatura conveniente respecto al gasoil y los procesos que se implican, así como los del biocombustible a comparar y a determinar sus impactos ambientales para así completar el ACV.

Se utilizaron 2 métodos de análisis de impactos comparables entre diésel y biodiésel:

1. Relación de energía fósil. Mide el rendimiento energético; se determina según el poder calorífico del combustible por unidad de energía para obtenerlo -ver (2)-, en el cual entre mayor sea la relación mayor es el beneficio medioambiental. Otra manera de interpretar este valor es con las unidades de energía que se producen por cada unidad de energía fósil utilizada en la producción. La relación de energía fósil para el diésel es de 0,968 [7].

$$\text{Relación de energía fósil} = \frac{\text{Energía contenida en el combustible (PCI)}}{\text{Energía consumida para producirlo y distribuirlo}} \quad (2)$$

Para la energía consumida se consideran los factores de la tabla 3.

2. Potencial de Calentamiento Global (GWP). Define el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación instantánea de 1 kg de un gas de efecto invernadero, en comparación con el causado por el CO₂. En la tabla 2 se muestran los potenciales de calentamiento para cada sustancia analizada.

Tabla 2. Potencial de calentamiento para diferentes gases de efecto invernadero [10].

Gas	Potencial
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

La determinación de las cantidades de gases de efecto invernadero se hace según los factores de emisión, para lo cual se dispone de las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3. Factores de emisión y gasto energético para reactivos [12].

Factor	Unidad	Metanol	Metóxido de sodio	NaOH	H ₂ SO ₄
CO ₂	g/g	0,401	0,966	0,923	0,6516
CH ₄	g/g	0,003	0,002	0	0
N ₂ O	g/g	3,90E-06	2,50E-06	0	0
Energía total	MJ/kg	20,0987	25,4267	10,2023	ND

Tabla 4. Factores de emisiones de gases de efecto invernadero promedio de electricidad [13].

Año	Factor de emisión de electricidad promedio [t de CO ₂ eq/MWh]
2005	0,5557
2006	0,5283
2007	0,5208
2008	0,4698
2009	0,5057
2010	0,4946

Tabla 5.
Factores de emisión de gases de efecto invernadero para combustibles [14].

Factores de emisión kg/TJ		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Industrias energéticas	Gas/diésel	74 100	3	0,6
	Gas natural	56 100	1	0,1
	Biodiésel	70 800	3	0,6

Se estimó la cantidad de gases evitados con el uso del biodiésel al 100 % para un escenario con la disponibilidad de materia prima.

RESULTADOS

Composición de la grasa

Los resultados de la composición de ácidos grasos (tabla 6) muestran que el peso molecular (g/mol) del sebo proveniente de la curtiduría es 269,62 y con el análisis estequiométrico se obtiene un metil éster con peso molecular de 91,273.

Tabla 6.
Perfil de ácidos grasos del sebo proveniente del descarte de la curtiduría [15].

Ácidos grasos	Clasificación	%	Peso molecular	(%)(PM)	PM metil éster	% PM metil éster
Láurico	Saturado	0,14	200	0,28	68,0	0,098
Mirístico	Saturado	4,01	228	9,14	77,3	3,105
Miristoleico	Monoinsaturado	1,36	226	3,07	76,7	1,044
Pentadecanoico	Saturado	0,64	242	1,55	82,0	0,528
Palmitico	Saturado	30,22	256	77,36	86,7	26,206
Palmitoleico	Monoinsaturado	4,50	254	11,43	86,0	3,873
Margárico	Monoinsaturado	1,24	270	3,35	91,3	1,135
Cis-10-heptadecanoico	Monoinsaturado	1,04	270	2,81	91,3	0,953
Esteárico	Saturado	13,68	284	38,88	96,0	13,145
Oleico	Cis-n9-Monoinsaturado	40,71	282	114,77	95,3	38,835
Linoleico	Cis-n6-Poliinsaturado	1,76	280	4,93	94,7	1,664
Araquídico	Saturado	0,14	312	0,44	105,3	0,142
Gadoleico	Monoinsaturado	0,23	310	0,71	104,7	0,245
Linoléico	n3-Monoinsaturado	0,32	278	0,89	94,0	0,300
	Total	100		269,62		91,273

Para la determinación del índice de acidez y del porcentaje de ácidos grasos libres se hace una determinación por titulación. En un análisis de 19 muestras dieron como promedio un índice de acidez de 34,7 y un 24 % de ácidos grasos libres [16]. Esto para hacer los cálculos correspondientes a las cantidades de reactivos necesarios en la esterificación y transesterificación englobados en el balance general de materia (tabla 12).

Descripción cuantitativa de la recolección del descarte hasta la planta de producción de biodiésel

Las necesidades para la recolección del descarte calculadas para un camión motor diésel de 20 t en un recorrido de 180 km para la recolección de 100 000 kg de descarte son las que se muestran en la tabla 7 (que en el análisis posterior se acoplará para la producción de 1 L de biodiésel).

Tabla 7.
Energía consumida para la recolección de 100 000 kg de descarte.

	L diésel	Poder Calorífico MJ/L	Energía MJ
Recolección	45	36,55	1 644,75

El rendimiento del biodiésel a partir del descarte, como se verá en la tabla 10, es de 6,8 %, por lo cual, para 1 kg de biodiésel el consumo de energía de recolección en la materia prima es de 0,2419 MJ = 1 644,75 MJ (100 000 kg descarte × 6,8 %).

Descripción cuantitativa del proceso de cocido y rendido del descarte

De los límites del análisis, que se muestran en la figura 5, quedan excluidos los procesos de fabricación de maquinaria usada en el proceso, ya que las cargas ambientales relativas tienen una contribución muy pequeña al balance global (menor al 1 %) [8].

En la tabla 8 se muestra el consumo de energía del proceso de obtención del sebo; se considera que el vapor del proceso se obtiene a partir del gas natural. Para el factor de conversión a MJ de la electricidad se utilizan los valores de equivalencia energética; para el del gas natural se consultó la hoja de seguridad del gas natural de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

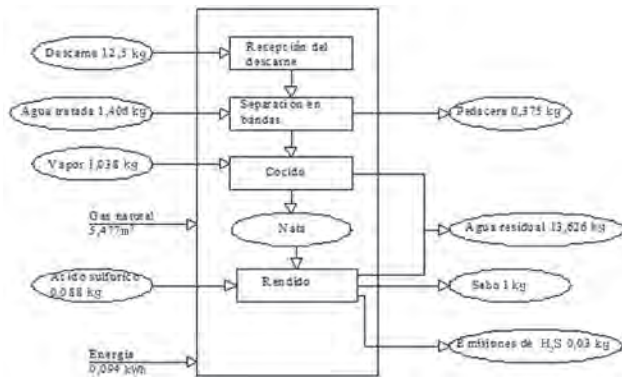


Figura 5. Balance de materia y energía del proceso de extracción del sebo.

Tabla 8. Consumo de energía en el proceso de obtención de 1 kg sebo.

	Gasto	Factor de conversión a MJ	MJ/kg sebo
Electricidad	0,094 kWh	3,6	0,338
Gas natural	5,477 m ³	36,3	197,726
		total	198,064

Descripción cuantitativa del proceso de esterificación y transesterificación para obtención del biodiésel

En el proceso de obtención de biodiésel se añaden como principales materias primas sebo y metanol, y -en cantidades menores- potasa, metanol y acido fosfórico. En la figura 6 se muestran los balances de entrada y salida para producir una base de 1 L de biodiésel.

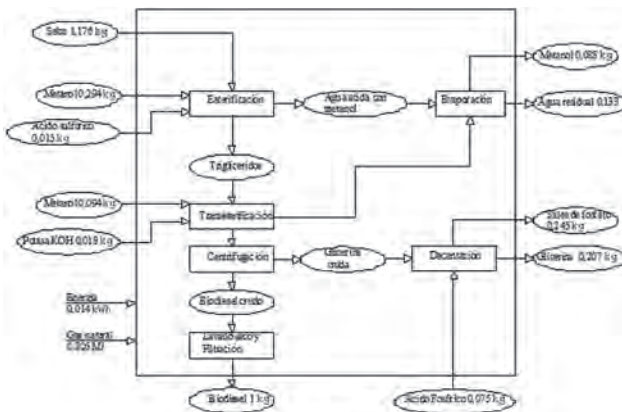


Figura 6. Balance de materia y energía del proceso de esterificación y transesterificación del sebo.

Los consumos de energía para la obtención de una base de 1 kg de biodiésel se muestran en la tabla 9. Para el factor de conversión a MJ de la electricidad se utilizan los valores de equivalencia energética; para el del gas natural se consultó la hoja de seguridad del gas natural de PEMEX; para determinar la densidad y el poder calorífico se tomó el promedio de los límites que se establecen en la NOM-001-SECRE-2003 [17].

Tabla 9. Consumos de energía en el proceso de obtención de biodiésel.

Concepto	Gasto	Factor de conversión a MJ	MJ/kg sebo
Electricidad	0,014 kWh	3,6	0,0496
Gas natural	0,022 m ³	36,3	0,8054
		total	0,855

Costos y ganancias estimados para la viabilidad económica

En la tabla 10 se estima el costo en pesos mexicanos para obtención de 1 kg de biodiésel y sus productos acoplados a un mercado. Los gastos son determinados por un análisis del mercado. En la tabla 11 se pueden analizar las ganancias de los productos en el posible mercado, colocando el biodiésel a un costo similar al del diésel y sus subproductos en estimaciones según los parámetros más bajos.

Tabla 10. Costos de producción

Materia	Cantidad	Costo unitario	Gasto en \$
Diésel kg	0,0056	12,08	0,068
Descarne kg	14,706	0,1	1,471
Agua tratada kg	1,654	0	0,000
Vapor kg	1,956	0,017	0,033
Acido sulfurico kg	0,118	3,5	0,414
Metanol kg	0,300	11,6	3,480
Potasa kg	0,018	29,6	0,522
Acido fosfórico kg	0,075	16,82	1,266
Gas natural MJ	0,805	0,124	0,100
Energía MJ	0,916	0,833	0,763
		Total	8,12

Tabla 11. Ganancias de productos y coproductos.

Materia	Cantidad	Costo unitario	Ganancia en \$
Cachete kg	0,441	2	0,882
Biodiésel kg	1	10	10
Glicerina kg	0,207	13	2,692
Sales de fosfato kg	0,245	9	2,202
		Total	15,776

El costo-beneficio del proceso de producción de biodiésel, restando los costos por cada kilogramo de biodiésel (\$ 8,12) producido con 14,7 kg de descarte para una planta con capacidad anual de 72 200 t de materia prima, implicaría obtener más de 41,2 millones de pesos mexicanos de ganancias de compra-venta.

Impacto ambiental de la producción

Para la producción de 1 kg de biodiésel por los métodos de potencial de calentamiento y la relación de energía fósil, se utilizó el cuadro donde se determinan tanto la energía utilizada en el proceso como las emisiones a la atmósfera.

Tabla 12.
Gasto energético y emisiones de gases de efecto invernadero del proceso global de producción de biodiésel.

		Factor energético	MJ	kg CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O	GWP
Recolección y transporte							
Diésel kg	0,0066	36,55 MJ/L	0,2419	0,0179	7,3E-07	1,45E-07	0,018
Proceso de cocido y rendido							
Gas natural m ³	0,1775	36,3 MJ/m ³	6,4433	0,3615	6,4E-06	6,44E-07	0,362
electricidad kWh	0,1103	3,6 kJ/kWh	0,3971	0,0545	0	0	0,055
Ácido sulfúrico kg	0,1029	ND		0,0671	0	0	0,067
Esterificación y transesterificación							
Acido sulfúrico kg	0,0153	ND		0,0100	0	0	0,010
Metanol kg *	0,3	20,099 MJ/kg	6,0296	0,1203	0,0009	1,17E-06	0,140
Potasa kg	0,0176	10,202 MJ/kg	0,1800	0,0163	0	0	0,016
Acido Fosfórico kg	0,0753	ND					
Gas natural m ³	0,0222	36,3 MJ/m ³	0,8054	0,0452	8,1E-07	8,05E-08	0,045
Energía kWh	0,0138	3,6 kJ/kWh	0,0496	0,0068			0,007
Total			14,1469				0,719

* Se considera el metanol menos la recuperación después del evaporador.

De (2) se determina la relación de energía fósil del biodiésel:

$$\text{Relación de energía fósil} = \frac{32,8 \text{ MJ/L}}{14,145 \text{ MJ/L}} = 2,32$$

La relación de energía fósil del diésel es de 0,968 [12].

El potencial de calentamiento de la producción de biodiésel es 0,719, comparado con el del diésel que varía entre 18-49 dependiendo del autor.

Emisiones de gases de efecto invernadero evitadas en un escenario en la combustión de uso urbano

Con la base de 1 L de diésel con capacidad calorífica de 36,55 MJ/L -y sabiendo que el biodiésel tiene 32,8 MJ/L-, se necesita 1,114 L de biodiésel para sustituirlo. Según los factores de la tabla 5, es posible evitar la emisión de 2,587 kg de CO₂ (1,14 L × 32,8 MJ/L × 0,0708 kg CO₂/MJ). Para una planta con capacidad de procesamiento de 79 200 t anuales de descarte se producen 5 385,6 t de biodiésel (4 631 m³), por lo que al sustituirlo en el transporte urbano se evita la emisión de 11 980,3 t de CO₂. Lo anterior se entiende

considerando que el balance de emisiones de CO₂ de la producción de biodiésel es nulo, como se muestra en la figura 7 (la fotosíntesis capta el CO₂, con la alimentación animal se genera sebo que se convierte en biodiésel y, al ser utilizado, se devuelve al aire como CO₂ que vuelve a ser captado).

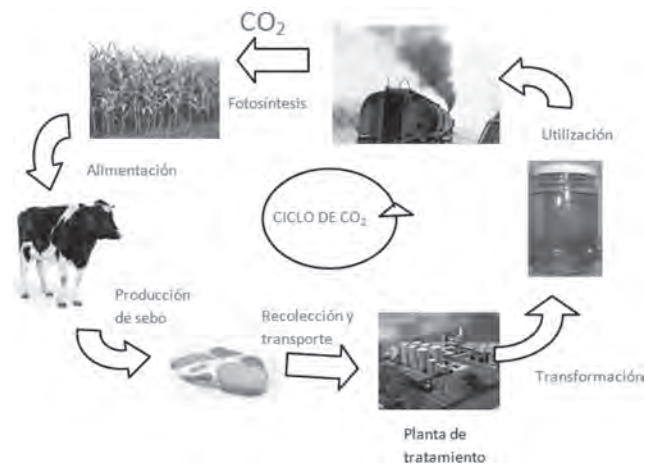


Figura 7. Balance nulo de emisiones de CO₂ para la producción de biodiésel.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La composición de la grasa del descarte procedente de la curtiduría tiene un perfil típico de ácidos grasos de una grasa animal con un peso molecular de 269,62 g/mol, índice de acidez de 34,7 y un porcentaje de ácidos grasos libres de 24, por lo cual se necesita un proceso de separación y dos procesos de reacción para obtención de biodiésel.

Para un proyecto de este tipo se estima un costo de proceso y energía de \$ 8,12 en una base de 1 L de biodiésel. Las ventas de los productos se estimaron en \$ 15,77, por lo que la utilidad es de \$ 7,65; con estos datos se estima que el proyecto tiene una viabilidad económica con ganancias costo-beneficio de más de 41,2 millones de pesos mexicanos anuales sin contemplar gasto inicial de planta, mantenimiento y mano de obra.

El potencial de calentamiento de la producción de biodiésel es de 0,719 en contra del rango del diésel de 18-46 (dependiendo de la fuente bibliográfica manejada [12, 18-19]). Así, el potencial obtenido es más que favorable.

La relación de energía fósil del biodiésel es de 2,322, un 240 % más favorable que el del diésel de 0,968.

Una planta con capacidad de procesar anualmente 79 200 000 kg de descarte y produciendo 5 385 600 kg de biodiésel reducirá 11 986 600 kg de CO₂ anuales de la combustión en su uso urbano.

Todo ello hace de la producción de biodiésel a partir de la grasa procedente del descarte de la curtiduría un proyecto redituable y socialmente aceptable para el desarrollo del sector transporte.

AGRADECIMIENTOS

A Procesadora de Descarnes La Viga S. A de C. V. por proporcionar los datos convenientes para el análisis del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional Ecología. (1999). *Manual de curtiduría*. Instituto Nacional Ecología. Distrito Federal, México. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/122.pdf>
- [2] NOM-161-SEMARNAT-2011. (2011). NOM-161-SEMARNAT-2011. *Norma que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuales están sujetos a plan de manejo*. Disponible en: http://www.seduma.yucatan.gob.mx/residuos-solidos/documentos/marco_juridico/8_Proj_NOM_161_SEMARNAT_2011.pdf
- [3] Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina. (2009). *Clarín (Suplemento zonal Morón)*. Argentina. Disponible en: http://www.inti.gov.ar/upt/pdf/clarin_Biodiesel.pdf
- [4] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010). *Acciones de México para el cambio climático*. SEMARNAT. Disponible en: <http://www.cambioclimatico.gob.mx/index.php/es/acciones-de-mexico.html>
- [5] Comunidad virtual del cuero. (2012). *Flujograma de curtiembre*. Disponible en: <http://www.cueronet.com/flujograma/index.htm>
- [6] Mittelbach, M. y Remschmidt, C. (2007). *Biodiésel. El manual completo*. Asociación Catalana del Biodiésel. Graz, Austria.
- [7] López Díaz, M. A. (2005). *El biodiésel, una alternativa al transporte*. Volumen 1. Madú Ediciones. España.
- [8] Tyson Shaine, K. (2001). *Biodiésel, Handling and Use Guidelines*. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-580-30004.
- [9] Dalla Costa, B. O., Pisarello, M. y Quireni, C. A. (2005) *Procesos de producción de biodiésel: uso de materias primas alternativas y de alta acidez*. Instituto de investigaciones en catálisis y petroquímica (INCAPE)-Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.
- [10] Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas. (2006). ACV de Combustibles Alternativos, Fase II. *ACV comparativo del Biodiésel y del Diésel, Energía y cambio climático*. Ministerio de Educación y Ciencia. España.
- [11] NMX-F-211-1987. (1987). *Alimentos. Determinación de humedad y materia volátil*. Disponible en: <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-211-1987.PDF>
- [12] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2010). *Renewable Fuel Standard Program (RFSP2) Regulatory Impact Analysis*. EPA. EPA-420-R-10-006.
- [13] Programa Nacional Gases de Efecto Invernadero (GEI), México. (2010). *Contabilidad y reporte de gases de efecto invernadero y promoción de proyectos de reducción de emisiones GEI*. Programa Nacional GEI.
- [14] Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Volumen 2, energía. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- [15] NMX-F-490-NORMEX-1999. (1999). *Alimentos. Aceites y grasas—Determinación de la composición de ácidos grasos a partir de C6 por cromatografía de gases*. Método de prueba. Disponible en: <http://www.colpos.mx/bancode-normas/nmexicanas/NMX-F-211-1987.PDF>
- [16] NMX-F-101-1987. (1987). *Alimentos. Aceites y grasas vegetales o animales. Determinación del índice de acidez, método de prueba*. Disponible en: <http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-211-1987.PDF>
- [17] NOM-001-SECRE-2003. (2003). *Calidad del gas natural de la comisión reguladora de energía*. Disponible en: http://www.sener.gob.mx/res/Acerca_del/NOM-001-SECRE-2010.pdf
- [18] Niederl, A. and Narodslawsky, M. (2004). *Life cycle Assessment—Study of biodiesel from tallow and used vegetable oil*. Institute for Resource Efficient and Sustainable systems. Graz, Austria.
- [19] Ozata, I, and Ciliz, N. (2009). *Comparative life cycle Assessment approach for sustainable transport fuel production from waste cooking oil and rapessed*. Istanbul Technical University. Turkey.