



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO DE PRODUCCION DE BIODIESEL A PARTIR DE UN MIX DE MATERIAS PRIMAS GRASAS EN LA EMPRESA ALCOHOLES DEL URUGUAY (ALUR)

Israel Herrera
Cristina de la Rúa
Natalia Caldés
Yolanda Lechón

Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos
Departamento de Energía
CIEMAT

21/07/2016

TABLA DE CONTENIDO

SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN.....	3
1 CONTEXTO	3
2 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	3
SECCIÓN II. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).....	7
1. OBJETIVO DEL ESTUDIO	7
2. ALCANCE DEL ESTUDIO	8
Función del sistema estudiado	8
Unidad funcional.....	8
Sistemas estudiados.....	8
Límites de los sistemas	11
Descripción de los productos estudiados	12
Cuantificación de la unidad funcional.....	15
Reglas de asignación	15
3 DATOS NECESARIOS. REQUISITOS DE CALIDAD DE LOS MISMOS.....	16
4 HERRAMIENTA INFORMÁTICA UTILIZADA.....	17
SECCIÓN III. ANÁLISIS DE INVENTARIO	19
1 INTRODUCCIÓN	19
2 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A1. CULTIVO DE CANOLA Y SOJA.....	20
Labores agrícolas	21
Otros procesos	21
Vinculación con la unidad funcional	24
3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A2. EXTRACCIÓN DE ACEITE.....	25
Proceso de extracción de aceite	25
Transporte de las semillas.....	26
Generación de electricidad de la red Uruguaya.	26
Vinculación con la unidad funcional	26
4 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A3. RECOLECCIÓN DE ACEITE USADO	29
5 ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A4. RECUPERACIÓN DE GRASA ANIMAL.....	29
Vinculación con la unidad funcional	31

6	ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A5. MIX DE MATERIA PRIMA GRASA	31
	Vinculación con la unidad funcional	32
7	ANÁLISIS DE INVENTARIO DEL SISTEMA A6. PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	32
	Vinculación con la unidad funcional	34
SECCIÓN IV. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA.....		36
1	IMPACTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO	37
	Sistema A1. Cultivo de oleaginosas (canola y soja).....	38
	Sistema A2. Extracción de aceite	41
	Sistema A3. Recuperación de aceite usado	43
	Sistema A4. Recuperación de grasa animal	43
	Sistema A5. Adecuación del mix de materia grasa	44
	Sistema A6. Producción de biodiesel	45
2	BALANCE ENERGÉTICO	48
	Sistema A1. Cultivo de oleaginosas (canola y soja).....	48
	Sistema A2. Extracción de aceite	50
	Sistema A3. Recuperación de aceite usado	51
	Sistema A4. Recuperación de grasa animal	51
	Sistema A5. Adecuación del mix de materia grasa	52
	Sistema A6. Producción de biodiesel	53
SECCIÓN V. INTERPRETACIÓN		56
1	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	56
2	ÁREAS DE MEJORA	62
	Etapa de producción agrícola de canola y soja	63
	Etapa de extracción de aceites	64
	Etapa de recuperación de grasas animales.....	65
	Etapa de producción de biodiesel.....	65
SECCIÓN V. CONCLUSIONES		67
REFERENCIAS.....		68

SECCIÓN I. INTRODUCCIÓN.

1 Contexto

El biodiesel es un biocombustible que se produce al combinar los triglicéridos de materia grasa con un alcohol, mediante una reacción de transesterificación. Puede mezclarse con diesel de origen fósil en diferentes proporciones, pudiendo incluso utilizarse de forma exclusiva en este tipo de motores [ARPEL ICA6, 2009].

En Uruguay el biodiesel está presente desde el 1 de Enero de 2012 en todo el Gasoil que se comercializa a través de las estaciones de servicio, en un porcentaje mínimo de 5% [Ley Nº 18.195, 2007]. Este Biodiesel se produce a partir de aceites vegetales y grasas de origen vegetal o animal. Las materias primas son variadas contándose entre ellas:

- Aceite virgen obtenido de la molienda de semillas oleaginosas (soja y canola)
- Aceites usados de fritura y
- Grasa animal (sebo vacuno), proveniente del sacrificio de ganado.

Teniendo en cuenta el interés creciente en Uruguay respecto a la producción de biodiesel como combustible y como continuación de los estudios realizados por parte del CIEMAT para la empresa ALUR, se desarrolla el actual apoyo técnico para la realización del Análisis de Ciclo de Vida de la cadena de transformación de diversas materias primas grasas en biodiesel y otros productos.

2 Introducción al Análisis de Ciclo de Vida

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida es una herramienta de gestión medio ambiental de “recopilación y evaluación de las entradas, resultados y los impactos ambientales potenciales de un sistema o producto durante su ciclo de vida” (ISO, 2006a).

Esta metodología describe y analiza las corrientes que entran desde la naturaleza al sistema estudiado y las que salen del sistema a la naturaleza a lo largo del ciclo de vida,

es decir, desde la extracción de materias primas y su agotamiento hasta emisiones al aire, agua y suelo así como los cambios de uso del terreno.

Por lo tanto, el ACV es una herramienta adecuada para:

- identificar las oportunidades de reducción de impactos ambientales o bien de consumos energéticos y materiales en un producto o proceso dentro de las distintas etapas de su ciclo de vida
- informar a los responsables de tomas de decisiones tanto a nivel industrial como público
- mejorar el posicionamiento en el mercado de ciertos bienes y servicios mediante la difusión de sus beneficios ambientales asociados.

Un ACV consta de 4 fases:

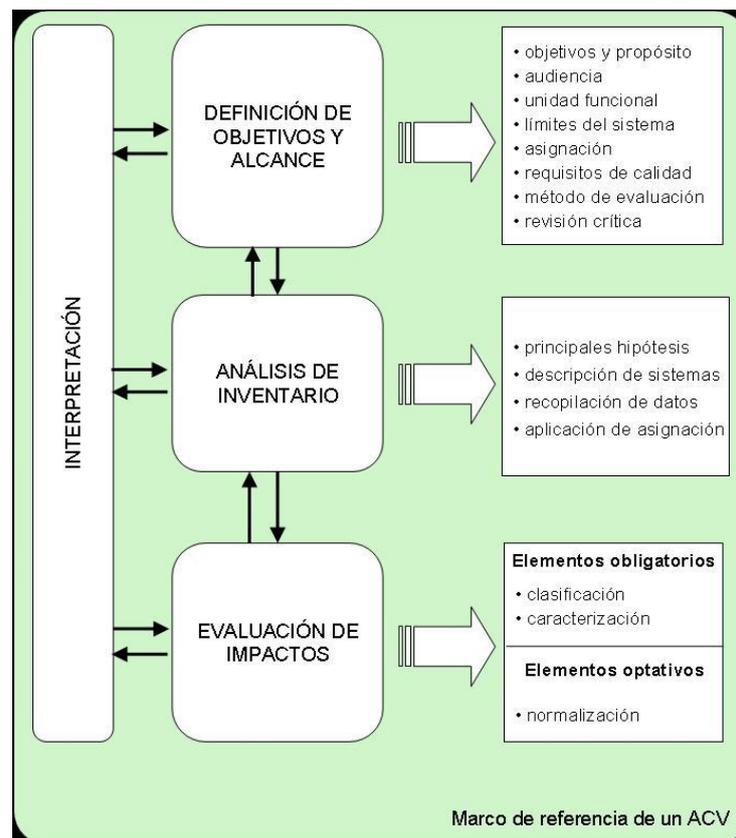


Figura 1: Etapas del ACV. Fuente: Elaboración propia

1. Definición del objetivo y alcance del estudio. En esta fase se definen:
 - Objetivo y propósito del estudio

- Sistemas estudiados, límites del sistema y unidad funcional
- Reglas de asignación
- Requisitos de calidad y método de evaluación
- Audiencia y grupo revisor

2. Análisis de inventario del ciclo de vida

En esta etapa se recopilan todos los datos tanto cualitativos como cuantitativos que van a ser necesarios para alcanzar los objetivos que se han definido anteriormente.

3. Evaluación de los impactos del ciclo de vida (EICV)

Según la norma ISO 14040:2006, esta etapa tiene por objeto evaluar la importancia de los impactos ambientales potenciales a partir de los resultados del análisis de inventario.

La norma ISO 14040:2006 distingue dos elementos en esta etapa: (i) elementos obligatorios, que comprende la clasificación de impactos y la caracterización de impactos, y (ii) elementos optativos- la normalización de los impactos. En la Figura 2 me muestra un esquema de los elementos de esta etapa.

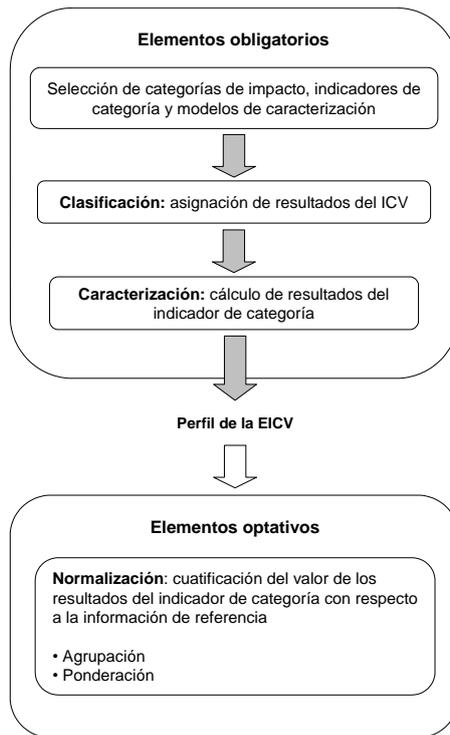


Figura 2: Elementos de la fase de EICV. Fuente: ISO 14040:2006

4. Interpretación del ciclo de vida

En esta fase se analizan los resultados de las etapas anteriores así como todos los supuestos e hipótesis que se han realizado a lo largo del estudio. Se deben identificar los supuestos principales y comprobar la robustez de los resultados. En este sentido, el análisis de sensibilidad analiza cómo pueden variar los resultados cuando los datos, las hipótesis y supuestos que se han escogido para el ACV varían. El último paso de la etapa de interpretación es la formulación de conclusiones y de recomendaciones. Éstas se harán teniendo en cuenta la audiencia a la que va dirigido el estudio y en basadas en los resultados obtenidos en las etapas previas.

SECCIÓN II. Definición del objetivo y alcance del Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

1. Objetivo del estudio

El presente estudio de ACV ha sido solicitado por la empresa Alcoholes de Uruguay (ALUR) y la Dirección Nacional de Energía de Uruguay (DNE) a la Unidad de Análisis de Sistemas Energéticos del CIEMAT.

Los sistemas evaluados en este estudio, corresponden a los productos generados en toda la cadena de transformación de las materias primas grasas en biodiesel.

El objetivo del estudio puede resumirse en:

- Cuantificar y evaluar los impactos ambientales potenciales generados en la transformación de las diversas materias primas grasas, desde el cultivo de las materias primas y el tratamiento de residuos grasos, hasta la obtención de biodiesel y otros co-productos (harinas y glicerina).
- Cuantificar los impactos asociados la cadena de transformación para las categorías de **cambio climático** y **balance energético**.
- Identificar y evaluar las oportunidades para reducir dichos impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida, una vez detectados los impactos en cada etapa de la cadena de transformación (obtención de materias primas, transformación, distribución y fin de vida)

La audiencia esperada para este ACV está formada en principio por los responsables de la empresa ALUR y de la Dirección Nacional de la Energía en Uruguay, que darán a los resultados del estudio la difusión y utilización que consideren oportuna. Por su parte el CIEMAT pretende publicar los resultados obtenidos en revistas científicas de difusión internacional y en congresos nacionales e internacionales.

2. Alcance del estudio

En el alcance del estudio se define la función del sistema, la unidad funcional y los límites establecidos.

Función del sistema estudiado

El sistema estudiado cumple la función de, a partir de diferentes materias primas grasas (cultivo de oleaginosas y residuos grasos) y de su posterior adecuación, producir harinas, glicerina y biodiesel.

Unidad funcional

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. La unidad funcional seleccionada debe estar definida y ser mensurable. Teniendo en cuenta los procesos estudiados, la unidad funcional que se ha elegido es la siguiente:

1 MJ de biodiesel

Sistemas estudiados

Una vez establecida la función del sistema y la unidad funcional, es necesario definir los sistemas y subsistemas que conforman la cadena a analizar. En la Figura 3 se han representado esquemáticamente las etapas principales de los sistemas estudiados:

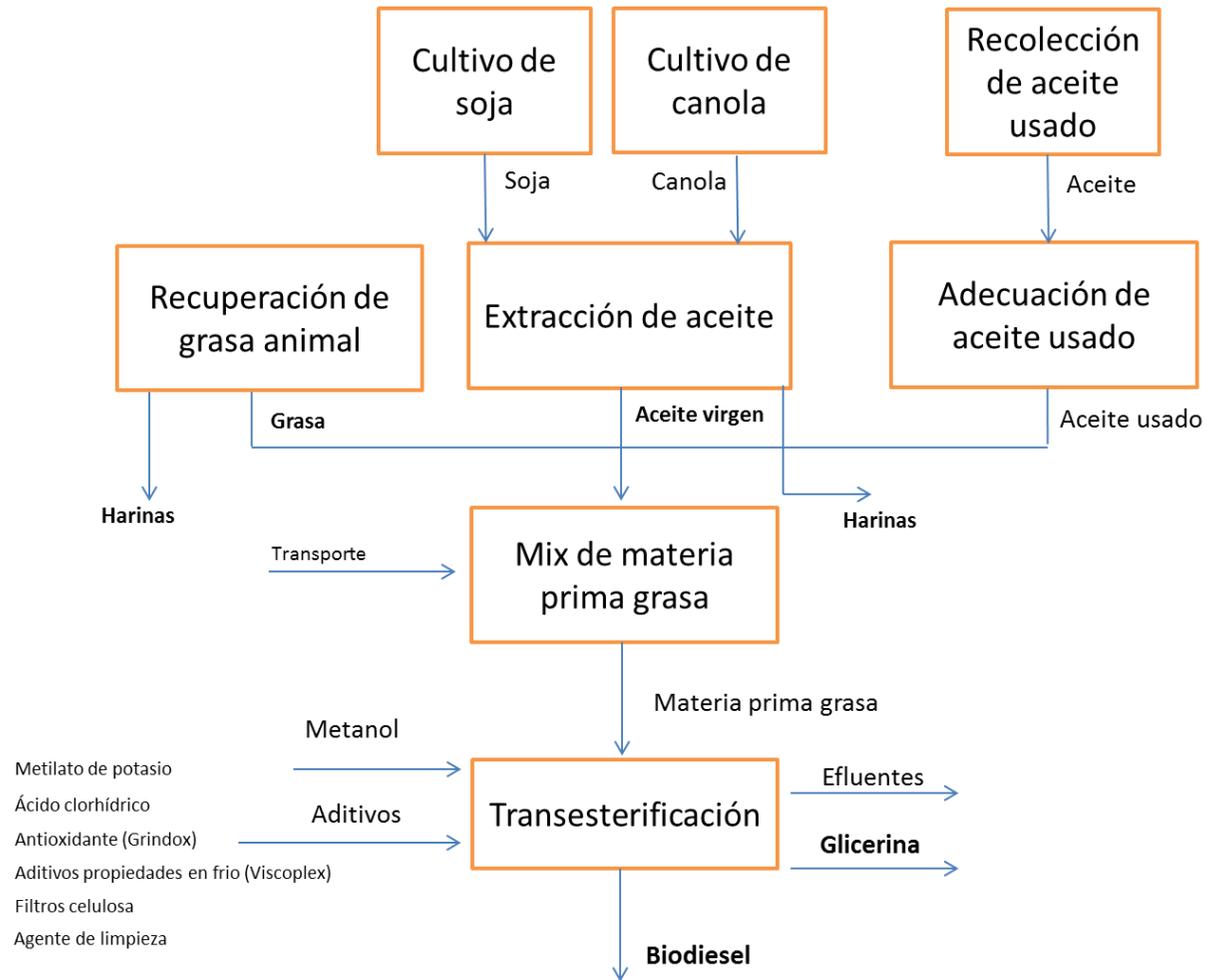


Figura 3. Diagrama general de la cadena de transformación del mix de materias primas grasas en biodiesel.

Los sistemas estudiados en el Análisis de Ciclo de Vida son los siguientes:

- Sistema A1: Cultivo de oleaginosas (canola y soja)
- Sistema A2: Extracción de aceite.
- Sistema A3: Recolección de aceite usado
- Sistema A4: Recuperación de grasa animal
- Sistema A5: Mix de materia prima grasa
- Sistema A6: Producción de biodiesel

Estos sistemas conforman todas las etapas del ciclo de vida de la transformación de un mix de materias primas grasas en tres productos de interés: el biodiesel como producto principal y las harinas y la glicerina como subproductos. En los sistemas estudiados se incluyen el cultivo, el transporte de la materia prima hasta la planta de transformación y la transformación en la misma para obtener los productos y los subproductos. Asimismo, se considera el transporte de productos terminados, productos intermedios (co-productos) y residuos.

El estudio, se ha realizado según la metodología normalizada de Análisis de Ciclo de Vida, siguiendo para ello la serie de normas internacionales UNE-EN-ISO 14040/44 y las recomendaciones de la Plataforma Europea de Análisis de ciclo de vida (ILCD Handbook, 2010). Así mismo, se han seguido las instrucciones de la metodología descrita en la **Directiva 2009/28/CE** relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (en su anexo V) y la Directiva 2009/30/CE, relativa a la Calidad de Carburantes (en su anexo IV).

Límites de los sistemas

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle.

Límites geográficos. El ACV realizado se limita a la transformación de un mix de materias grasas conformado por aceite virgen proveniente de la molienda de canola y soja, grasa animal a partir del sacrificio de ganado vacuno (rendering) y aceite de cocina usado, recolectado y posteriormente tratado para su posible uso, en dos productos comercializables: biodiesel y glicerina. El ciclo de vida de estos productos, incluye todas las etapas involucradas en su extracción, producción, transporte y

transformación, por lo tanto los límites geográficos se ven expandidos al tener en cuenta insumos producidos fuera del territorio nacional.

Para la mayor parte de las operaciones se han usado, en la medida de lo posible, información primaria aportada por ALUR y, cuando han estado disponibles, datos originales de los procesos reales. Para las operaciones no controladas por la empresa se ha usado datos medios de la industria o datos reportados en bases de datos (BD) de reconocido prestigio internacional y que representan los escenarios de los procesos estudiados.

Límites temporales. El límite temporal considerado es el año 2015, aunque esto no excluye procesos o etapas desarrolladas con anterioridad.

Etapas excluidas del análisis. Para este estudio, las cargas ambientales relativas a la producción de la maquinaria e infraestructuras necesarias para el desarrollo de los procesos involucrados, se han excluido del análisis porque su contribución al balance global es muy pequeña, menor del 1%, tal como se desarrolló en los estudios anteriores.

Descripción de los productos estudiados

Las características de los productos estudiados utilizadas en el presente estudio se describen a continuación:

Biodiesel.

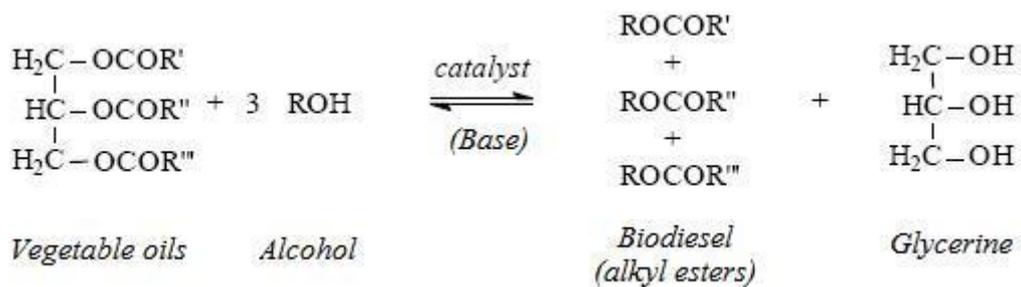
El biodiesel, o FAME (por sus siglas en inglés Fatty Acid Methyl Ester) también llamado éster metílico, de acuerdo con la definición propuesta por las especificaciones de la asociación internacional de normativa de calidad (American Society for Testing and Material Standard ASTM) corresponde a ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión [Herrera et al, 2012]. El término bio, hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diesel tradicional derivado del petróleo; por su parte, diesel alude a su uso en motores de este tipo.

El proceso más utilizado es la transesterificación. En este proceso, los aceites vegetales y una cadena corta de alcohol (metanol o etanol principalmente) en la presencia de un catalizador (usualmente NaOH o KOH) se convierten en esteres alquílicos y glicerina.

Este no es solamente el método más económico, además:

- Tiene una proporción alta de conversión (98%) con tiempo lento de reacción y mínima proporción de reacciones paralelas.
- Presenta conversión directa a esteres alquílicos sin pasos intermedios.
- La reacción se lleva a cabo a temperatura baja (aprox. 65°C) y presión baja (aprox. 1.4 bar).
- No existe necesidad de utilizar materiales de construcción avanzados o especializados.

El biodiesel se obtiene principalmente mediante la reacción de transesterificación de un triglicérido con un alcohol, generalmente metanol o etanol, utilizando algún catalizador (Pedrero, 2008). La reacción química se presenta a continuación:



El biodiesel presenta características similares al diesel de origen fósil, evidentemente estas propiedades no se refieren a una especificación formal, sino a las características que los definen como materiales carburantes. La Tabla 1 resume las principales características del biodiesel y de un diesel fósil típico.

Tabla 1. Propiedades del biodiesel y diesel

Parámetro	Biodiesel	Diesel
Composición del combustible	Ester metílico ac.grasos C12-C22	Hidrocarburo C10-C21
Poder calorífico inferior, kcal/kg	39.9	45
Viscosidad cinemática, cst (a 40°C)	3.5 – 5.0	3.0 – 4.5
Peso específico, g/cm ³	0.875 – 0.900	0.850
Azufre, % P	0	0.2
Punto ebullición, °C	190 - 340	180 - 335
Punto inflamación, °C	120 - 170	60- 80
Punto escurrimiento, °C	-15 / +16	-35 / -15
Número cetanos	48 - 60	46
Relación estequiometría Aire/comb. p/p	13.8	15

Fuente: Uribe Gómez, 2010

Harinas proteicas provenientes de la extracción de aceite.

Durante el proceso de extracción de aceite, se produce harinas proteicas provenientes de oleaginosas, que son un excelente alimento animal para las cadenas cárnicas y lácteas.

El proceso de **extracción por solventes** se refiere a la difusión de disolvente en las células que contienen aceite de la materia prima y que resulta en una solución del aceite. Así como su nombre indica, la extracción con solventes se refiere a la extracción de los materiales que contienen aceite por medio de los diversos solventes que se pueden utilizar para la extracción. En este estudio se han considerado aspectos tales las propiedades físicas del solvente, especialmente su punto de ebullición bajo. El hexano es el mejor y se utiliza habitualmente en el proceso de extracción con solventes.

Harinas provenientes de la recuperación de grasa animal

En cuanto al uso de grasa animal en la producción de biodiesel, a pesar de existir una gran cantidad de estudios, los existentes apuntan hacia el hecho de que este material al tener mayor contenido de ácidos grasos saturados, proporciona mayor estabilidad al producto final, independientemente del catalizador empleado. Una desventaja

identificada es que estos productos pueden aumentar la temperatura de fusión del biodiesel obtenido. Sin embargo, esto no es un problema en el caso de climas tropicales [Rivera et al, 2009]

Durante el proceso de recuperación de grasa de origen animal, se produce harinas proteicas. Dichas harina es elaborada mediante digestores continuos a partir de subproductos frescos provenientes del sacrificio de ganado vacuno.

Cuantificación de la unidad funcional

La obtención de 1 t de biodiesel, implica la producción de 0.18 t de glicerina y 3.34t de harinas de origen vegetal (de las cuales 3.15t provienen de la extracción del aceite de soja y 0.19t de la canola) y 0.37t de harinas de origen animal. Durante la etapa de análisis de inventario, serán establecidas las relaciones de estos productos respecto a la unidad funcional definida (1MJ de biodiesel)

Reglas de asignación

De acuerdo con la normativa relacionada [ISO 2006a, ISO 2006b], “asignación” es la distribución de los flujos de entrada y salida de un proceso o sistema de producto, entre el sistema y los productos generados por él. Para los sistemas que tienen más de un producto siempre que sea posible se evitará la asignación por medio de:

- División del proceso en dos o más procesos
- Extensión de los límites del sistema o cargas evitadas

Si no se puede evitar, se realiza **asignación de cargas** a través de los siguientes procedimientos:

- Basado en la relación física (de forma que se refleje como se modifican las entradas y salidas por cambios cuantitativos en los productos).
- Basado en otras medidas como el valor económico, la masa o la energía

En este análisis de ciclo de vida, se ha realizado en primer lugar una división del proceso en sistemas unitarios que se han analizado de forma separada y se han vinculado posteriormente para la producción final del biodiesel.

El producto principal analizado en el estudio es el biodiesel. Sin embargo, a lo largo de las etapas que componen el ciclo de vida de la transformación de las materias grasas a

biodiesel, se obtienen otros productos, como las harinas proteicas de origen vegetal y animal y la glicerina. Esto hace necesario asignar las cargas ambientales generadas, en la proporción que corresponda, a todos los productos y co-productos. Como punto de partida, se ha establecido una asignación económica en todos los procesos que tienen como resultado más de un producto (extracción de aceite/grasa y transesterificación).

3 Datos necesarios. Requisitos de calidad de los mismos.

Una vez definido el objetivo y alcance de este ACV, es necesario definir las fuentes de información más importantes que se han utilizado y las bases de datos consultadas, de manera que de acuerdo con la normativa relacionada, los datos recopilados cumplan con los criterios de calidad establecidos.

Se ha partido de los datos proporcionados por la empresa ALUR, para cada una de las etapas que conforman la cadena productiva estudiada.

Se han seleccionado los procesos cuya contribución a los flujos de masa y energía se sabe que son importantes y cuyas emisiones son relevantes para el medio ambiente. Estos procesos son los incluidos en la producción agrícola de las materias primas, el transporte y tratamiento (en los casos que son necesarios), los procesos de producción de otras materias primas de origen diferente al agrícola (aditivos), necesarias en los procesos de transformación de las diferentes materias primas a los tres productos definidos. Para los procesos en los cuales no se dispone de datos primarios, se ha recurrido a la utilización de datos de fuentes ya publicadas.

Se han utilizado bases de datos publicadas y disponibles en la herramienta informática SIMAPRO™ (<http://www.pre.nl/simapro>) para los procesos más comunes como transportes, combustibles y productos químicos básicos. Las bases de datos usadas son las siguientes:

- ECOINVENT.

Ecoinvent, es la base de datos líder en el mundo con inventarios de ciclo de vida consistentes y transparentes de más de 10000 procesos. Incluye escenarios de agricultura, energía, transporte, biocarburantes y biomateriales, productos químicos a granel y de especialidad, materiales de construcción, materiales de embalaje, metales, procesamiento de metales, tecnologías de la información y electrónica, así como el

tratamiento de residuos. Los datos de los escenarios, se basan en información industrial y han sido recopilados por distintos institutos de investigación reconocidos internacionalmente y por consultores de Análisis de Ciclo de Vida. Los datos están disponibles en el formato de datos EcoSpold, y son compatibles con las principales herramientas informáticas de ACV y ecodiseño (www.ecoinven.ch)

- ETH-ESU

ETH Zurich, Ökoinventare von Energiesysteme [Frischknecht et al. 2004]. Inventario de datos para Suiza y Europa occidental de procesos relacionados con el suministro de energía. Contiene datos sobre materiales (construcción, sustancias químicas, metales, combustibles, plásticos, etc.), energía, transporte, tratamiento de residuos y otros.

En este estudio se utilizó para los procesos de generación de energía y en los procesos donde intervienen sustancias químicas. También para construir una base de datos, específica y actualizada del mix eléctrico Uruguayo.

- BUWAL 250.

BUWAL, Ökoinventare für Verpackungen [BUWAL 2012]. Inventario de materiales de embalaje realizado y soportado por EMPA para el Instituto Suizo de Embalaje.

Contiene datos sobre materiales (sustancias químicas, metales, combustibles, plásticos, etc), energía, transporte, tratamiento de residuos y otros. En el actual estudio se utilizará en los procesos donde intervienen aditivos, embalajes y transporte.

Además, para algunos procesos de las actividades agrícolas se ha utilizado la base de datos:

- AGRI-FOOTPRINT

Base de datos desarrollado por Blonk ConsultoresTM. Esta base de datos contiene datos de Análisis de ciclo de vida específicos para productos alimenticios y/o del sector agroalimentario (<http://www.agri-footprint.com/about/>)

4 Herramienta informática utilizada.

El presente estudio de ACV ha utilizado una herramienta informática comercial denominada SIMAPRO™ (<http://www.pre.nl/simapro>).

SimaPro v8.2 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.

SECCIÓN III. Análisis de inventario

1 Introducción

El análisis de inventario es un proceso de cuantificación de los flujos de energía y materiales que entran y salen de una actividad durante su ciclo de vida. Un análisis del inventario es fundamentalmente un balance de materia y energía del sistema, aunque también puede incluir otros parámetros como: utilización de suelo, radiaciones, ruido, vibraciones, biodiversidad afectada, entre otros aspectos [Herrera et al, 2011].

Los aspectos a tener en cuenta en la realización de un análisis de inventario de ciclo de vida, son aquellos que relacionan los flujos de materiales y energía con la unidad funcional, la necesidad de asignación y los métodos de asignación disponibles, y la disponibilidad de los datos. Estos aspectos se mencionan a continuación:

- Descripción de los procesos unitarios (Balance de materia y energía)
- Procedimientos de cálculo (Deben estar referidos a la unidad funcional)
- Criterios de asignación
 - Asignación de flujos a productos y co-productos según lo establecido en la definición de objetivo y alcance
- Procedimientos de recopilación de datos
 - Los datos deben recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema)
 - Realización de cálculos

La metodología seguida en este análisis de inventario, usa la aproximación conceptual del análisis de sistemas, en el sentido en que traza una frontera alrededor del sistema analizado y cuantifica las entradas y salidas a través de esa frontera [Lechón et al, 2011].

A continuación se detallan algunas de las principales hipótesis metodológicas que sustentan el desarrollo del inventario y facilitan su análisis.

Tal como se estableció en la definición de objetivo y alcance, la cadena productiva de producción de biodiesel, se compone de seis (6) sistemas: **Cultivo de oleaginosas (canola y soja)**, **Extracción de aceites vegetales**, **Recolección de aceite usado**, **Recuperación de grasa animal**, **Mix de materia prima grasa** y **Producción de biodiesel**. Para cada uno de estos sistemas se ha desarrollado un escenario que representa las principales corrientes de entrada y salida, y a partir de las cuales se definen las cargas ambientales asociadas.

2 Análisis de inventario del Sistema A1. Cultivo de canola y soja

Se elaboró el escenario del cultivo de las dos materias primas utilizadas en la obtención de aceite virgen (canola y soja), a partir de información primaria, reportada por la empresa ALUR y de información secundaria obtenida a través de una rigurosa revisión bibliográfica y de bases de datos relacionadas con los procesos productivos involucrados en dicho sistema. La **Figura 4**, representa esquemáticamente las entradas y las salidas del sistema cultivo de oleaginosas.

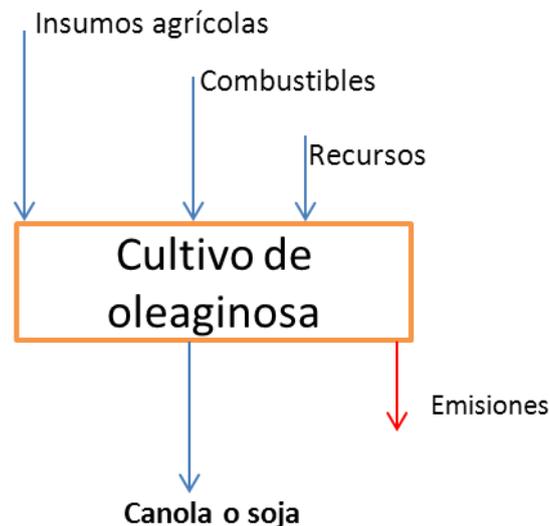


Figura 4. Diagrama esquemático de entradas y salidas del sistema cultivo.

Para la realización del inventario se han tenido en cuenta las labores agrícolas realizadas y los procesos asociados a la producción y transporte de las materias primas necesarias en el cultivo tales como fertilizantes y fitosanitarios.

Labores agrícolas

Las labores agrícolas consideradas en este estudio son las siguientes:

Labores del terreno. Incluye las tareas agrícolas de alzado y preparación del terreno realizadas con diferentes aperos.

Labores de fertilización. Se las labores de abonado realizado siempre con abonadora.

Labores de cultivo. Se han computado las labores de siembra y mantenimiento.

Tratamientos con fitosanitarios. Contempla las labores de aplicación de los productos herbicidas, insecticidas y otros agentes utilizados.

Cosecha. Se incluyen las labores de cosecha

Transporte insumos.- Se incluye el transporte local de los insumos: semillas, fertilizantes y fitosanitarios.

Otros procesos

Producción de fertilizantes. Los datos del proceso de producción de los fertilizantes, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final así como la realización de las infraestructuras necesarias para su producción han sido tomados de la base de datos de Ecoinvent.

Producción de fitosanitarios. Los datos del proceso de producción de los productos fitosanitarios aplicados, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final, así como la realización de las infraestructuras necesarias para su producción han sido tomados de la base de datos de Ecoinvent. Los datos para el transporte desde la zona de producción hasta la zona de almacenamiento también proceden de Ecoinvent. El transporte a nivel regional ha sido calculado y adaptado a partir de Nemececk y Kägi, 2007 y de los datos reportados por la empresa Alur.

Producción del Diesel. Esta etapa de proceso incluye la extracción de las primeras materias, los procesos de refinamiento del petróleo y el transporte del producto de la

refinería hasta el usuario final. Así mismo se consideran las operaciones de almacenamiento y las realizadas en gasolineras. También se considera las emisiones procedentes de las evaporaciones y tratamiento de efluentes. El proceso utilizado para la modelización de esta etapa es Diesel at refinery de la base de datos Ecoinvent. El transporte desde refinería hasta el sitio de uso ha sido reportado por ALUR.

Consumo de combustible y emisiones asociadas. Las emisiones asociadas a este consumo han sido calculadas de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$GR[g/ha]=CB[kg_{\text{combustible}}/ha]*FE[g_{GR}/kg_{\text{combustible}}] \quad [\text{Nemececk et Kägi, 2007}]$$

Dónde:

GR son los gases residuales

CB representa el consumo de combustible y

FE son los factores de emisión de los distintos gases.

El poder calorífico inferior utilizado en los cálculos procede de la norma UNE EN 590 para el diesel, cuyas características principales quedan recogidas en la

Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades Diesel

PROPIEDADES	DIESEL UNE EN 590
Densidad 20°C (kg/m ³)	820-845
Viscosidad 40°C (cSt)	2.0-4.5
PCI (MJ/kg)	42.8
NC	51 (mín)
POFF (°C)	-10
Azufre (ppm)	50 (máx)
Residuo carbonoso 10% (%)	0.30 (máx)
Punto inflamación (°C)	55 (mín)

Fuente: Norma UNE EN 590

Aplicación de fertilizantes. La aplicación de fertilizantes a los suelos de cultivo implica la producción de emisiones resultantes de la interacción entre los compuestos químicos y el propio suelo [Brentrup et al. 2001]. La utilización de fertilizantes produce

diferentes tipos de emisiones a los diferentes medios, en este análisis se cuantifican las emisiones al aire de óxido nitroso (N_2O).

Emisiones de N_2O en campo

Todos los suelos (agrícolas, forestales, en barbecho, debido a la actividad bacteriana del suelo) emiten N_2O , pero estas emisiones se ven incrementadas con la fertilización.

Las emisiones de N_2O a la atmósfera contribuyen de una manera significativa al cambio climático [Houghton et al, 1990] y participan también en la destrucción de la capa de ozono.

El N_2O emitido por los suelos se produce principalmente debido a la acción de los microorganismos que viven en él, mediante los procesos de nitrificación y desnitrificación. Son procesos muy complejos en los que tienen influencia el tipo de cultivo, el tipo de fertilizante y la dosis de aplicación del nitrógeno. Asimismo, diferentes factores relacionados con el tipo de suelo, como el contenido en carbono, el pH y la textura intervienen también en las emisiones de N_2O . Existen numerosas metodologías de cálculo, pero presentan un alto grado de incertidumbre en la actualidad, en parte debido a la gran cantidad de factores que intervienen en la generación de estas emisiones [Nemecek, t. & Kägi, t. 2007; Crutzen et al, 2007; Stehfest, e. & Bouwman, I. 2006].

No se cuenta con medidas experimentales en campo en Uruguay de los factores de emisión por aplicación del fertilizante en el cultivo de oleaginosas. Por lo anterior, las emisiones de N_2O del cultivo se han calculado mediante la Calculadora Global de óxido nitroso (Global Nitrous Oxide Calculator (GNOC)), que cuantifica las emisiones de N_2O de suelos de cultivos que sirven como materia prima para biocombustibles. En dicha calculadora, las emisiones indirectas están representadas por la deposición del N volatilizado, la lixiviación y la escorrentía [Köble, R, 2014].

Etapas y procesos no considerados en el estudio. Quedan fuera del sistema, los envases y embalajes de los agroquímicos aplicados en las operaciones de fertilización y sus ciclos de vida asociados, debido a la gran variedad de tipologías de envases detectadas y por considerar que su contribución relativa a las diferentes categorías de impacto es mínima en el sistema estudiado [Herrera et al 2012]. Tampoco han sido considerados los procesos de producción de la maquinaria agrícola, de acuerdo con lo

establecido en las directivas (2009/28/CE y 2009/30/CE) del Parlamento Europeo y del Consejo relativas a la promoción del uso de las energías renovables y de los biocarburantes en el transporte. Se considera la gestión de los residuos líquidos producidos en los diversos sistemas en estudio, pero no aquellos generados en los procesos de producción de los insumos utilizados.

Vinculación con la unidad funcional

El balance de entradas y salidas del sistema cultivo, a partir de los datos de cultivo y del análisis del inventario, se presenta de forma resumida en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Datos del cultivo de Canola y Soja.

Producto	Canola	Soja	Unidad
Rendimiento	1300	2200	Kg/ha
<i>Recursos naturales</i>			
Suelo	10000	10000	m ² a
<i>Materiales/Combustibles</i>			
Diesel	18.5	20.16	kg
Fertilizante P (P ₂ O ₅)	55,2	48	kg
Fertilizante N (urea)	80	NA	kg
Fertilizante N (Nitrato de amonio)	21.6	8.4	kg
Fertilizante K (K ₂ O)	48	72	kg
Productos fitosanitarios	4	4,47	kg
Transporte de insumos	60.75	33.6	tkm
Semillas	3.8	70	kg
<i>Emisiones al aire</i>			
N ₂ O por emisiones de la aplicación de Fertilizante N	1.07	1.32	kg
N ₂ O por combustión de diesel	0.002	0.003	kg
CO ₂ por combustión de diesel	48.48	62.9	kg
CH ₄ por combustión de diesel	2	2	g
CO ₂ por hidrólisis urea	146.67	NA	kg

3 Análisis de inventario del sistema A2. Extracción de aceite

Proceso de extracción de aceite.

Se elaboró el escenario del proceso de extracción de aceite virgen, a partir de información primaria, reportada por la empresa ALUR y de información secundaria obtenida a través de una rigurosa revisión bibliográfica y de bases de datos relacionadas con los procesos productivos involucrados en dicho sistema. La producción de aceite, a partir de las semillas de canola o soja, incluye, la producción de harina como subproducto. La Figura 5, representa esquemáticamente las entradas y salidas del Proceso de extracción de aceite.

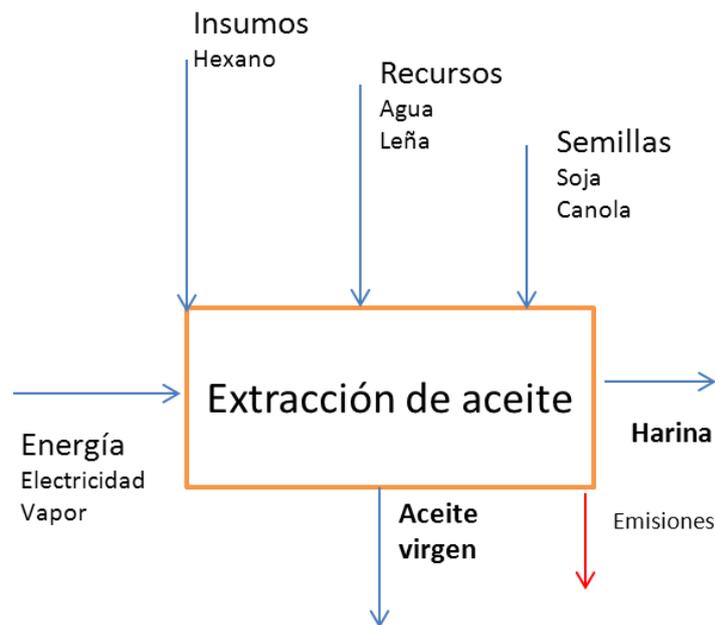


Figura 5. Diagrama esquemático del proceso de extracción de aceite

El escenario de extracción de aceite, incluye dos procesos a ser modelados como parte del proceso de extracción: el transporte de las semillas, desde el sitio de cultivo, hasta la planta de extracción y la generación eléctrica usada en Uruguay. Por lo tanto, a continuación se describen los aspectos más relevantes de estas dos corrientes del proceso.

Transporte de las semillas.

Adicional al proceso de producción, este escenario incluye el transporte de las semillas oleaginosas desde la zona de cultivo hasta la planta de transformación. Se ha considerado una distancia de transporte de 175 km para el caso de la soja y de 225 km para el caso de la canola.

Generación de electricidad de la red Uruguay.

En el caso de la electricidad, se ha desarrollado un escenario de generación eléctrica para Uruguay para el año 2013, a partir de datos del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM).

El escenario que representa el mix energético para el año de estudio es el siguiente se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Escenario eléctrico 2013.

Fuente	Participación (%)
Generación térmica	17
Generación hidráulica	77
Generación eólica	1.2
Generación con biomasa	4.8

Fuente: <http://www.miem.gub.uy/web/energia/-/series-estadisticas-de-energia-electrica>

Vinculación con la unidad funcional

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario del sistema producción de aceite vegetal y su vinculación con la unidad funcional. El escenario de la producción de aceite vegetal virgen y harina, incluye materias primas generadas por la propia empresa y otras generadas fuera de la misma.

Procedimiento de asignación

Como ya se mencionó en apartados anteriores, en el sistema de producción de aceite vegetal, además del aceite, se co-producen harinas. Estas harinas se usan para la producción de alimento animal, por lo que de acuerdo con la normativa relacionada, debe establecerse un procedimiento de asignación entre estos dos productos.

Para repartir las cargas ambientales correspondientes a los co-productos que tienen lugar en las etapas comunes al aceite y las harinas, se ha seguido un criterio de

asignación basado en la cantidad en masa producida y el precio de venta de ambos productos.

Las cantidades de aceite y harinas producidas en proceso de extracción, se han obtenido a partir de los datos de rendimiento de las semillas, datos reportados por la empresa Alur y que pueden verse en la Tabla 5.

Tabla 5. Factores de rendimiento para el aceite y las harinas

Rendimientos	Soja	Canola
% Materia Grasa	21.0%	49.0%
Aceite crudo a partir de grano (m/m)	19.0%	42.0%
NBS a partir crudo (m/m)	96.5%	96.5%
% Harina	78%	50%
B100 de NBS	94.5%	94.5%
TOTAL (Ton grano/Ton B100)	5.77	2.61

Fuente: reportado por la empresa Alur

Para el establecimiento de los porcentajes de asignación correspondientes en cada caso, es necesario conocer los datos de partidas de cada uno de los procesos en donde las cargas ambientales, serán asignadas en los co-productos. Dicha información, está relacionada con la masa producida, el contenido energético y el precio de mercado de dichos co-productos. La Tabla 6, recoge los principales datos relacionados con esta información.

Tabla 6. Datos para aceite y harina en la extracción

Producto	Soja			Canola		
	Aceite	Harina	Total	Aceite	Harina	Total
Masa (Kg/tsem)	183.35	780	963.35	405.3	500	905.3
PCI (MJ/kgp)	36.6	15.4		37.5	18.7	
Participación (MJt)	6710.61	12012	18723	15198.75	9350	24548.75

Fuente: cálculos propios a partir de distintas fuentes [Agri-footprint, 2015; Biograce, 2011; EC, 2012]

Con esta información, se establecen los porcentajes de asignación con base en cada criterio elegido. Ver Tabla 7.

Tabla 7. Factores de asignación para el aceite y la harina en la extracción

Materia prima	Asignación económica (%)	
	Harina	Aceite
Soja	63.96	36.04
Canola	22.06	77.94

Fuente: cálculos propios a partir de datos reportados y consultados.

El balance de entradas y salidas del sistema de extracción para las semillas oleaginosas consideradas
consideradas se presenta en la **Tabla 8** y la

Tabla 9.

Tabla 8. Balance de materia para la molienda de una tonelada de soja

Productos	Cantidad	Unidad	Asignación (%)
Aceite de soja	183.35	kg	36.04
Harina de soja	780	kg	63.96
Materiales/Combustibles			
Soja en parcela	1000	kg	
Transporte	175	tkm	
Agua de red	0.19	kg	
Hexano	1	kg	
Vapor	338	kg	
Leña	12.21	kg	
Electricidad	63.24	kWh	
Emisiones al aire			
Hexano	0.001	kg	
Vertidos a tratamiento			
Efluentes	0.0002	m3	

Tabla 9. Balance de materia para la molienda de una tonelada de canola

Productos	Cantidad	Unidad	Asignación (%)
Rapeseed oil, at oil mill/UR U	405.3	Kg	59.9
Rapeseed meal, at oil mill/UR U	500	Kg	40.1
Materiales/Combustibles			
Canola en parcela	1000	Kg	
Transporte	225	Tkm	
Agua de red	0.19	Kg	
Hexano	1	Kg	
Vapor	338	Kg	
Leña	12.21	Kg	
Electricidad	63.24	kWh	
Emisiones al aire			
Hexano	0.001	Kg	
Vertidos a tratamiento			
Efluentes	0.0002	m ³	

4 Análisis de inventario del Sistema A3. Recolección de aceite usado

La materia prima ‘aceite usado’ se ha considerado como un residuo al que no se ha asignado cargas ambientales hasta el punto en el que son recogidos para ser trasladados a planta. Según los datos proporcionados por la empresa ALUR, se ha asumido una distancia media de transporte de 50 km. Los consumos energéticos asociados a la adecuación de estos aceites para el proceso de producción de biodiesel se han contabilizado en la etapa de producción de biodiesel.

5 Análisis de inventario del Sistema A4. Recuperación de grasa animal

En este apartado se describe brevemente, el proceso de recuperación de grasa animal, a partir de residuos de la industria cárnica.

La materia grasa animal o sebo se obtiene a partir del tejido adiposo de ganado bovino. Se extraen por fusión de estas, mediante el aporte de calor en seco o en presencia de agua, que ayuda a la transferencia de calor, a facilitar la extracción y a limitar la temperatura [Gravalos I, 2008]. A continuación, en la Figura 6 se puede ver un esquema específico de la obtención de grasa animal.

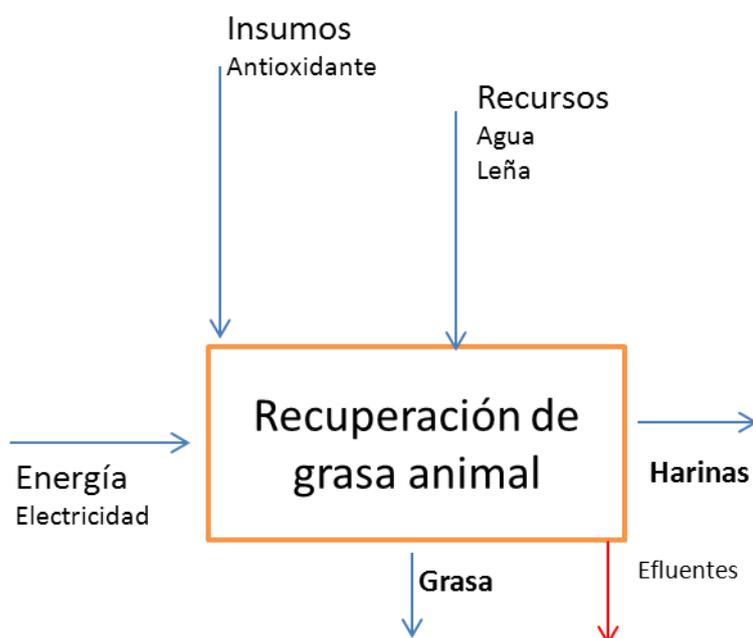


Figura 6. Diagrama esquemático de la Recuperación de grasa animal

Procedimiento de asignación

En el sistema de recuperación de grasa animal, además de la grasa (conocida como sebo), se producen también harinas [Vivas Castaño, 2010]. Estas harinas se usan como alimento animal, por lo que de acuerdo con la normativa relacionada, y en coherencia con el sistema anteriormente estudiado, debe establecerse un procedimiento de asignación entre estos dos productos para repartir las cargas ambientales correspondientes. Se ha seguido el mismo criterio de asignación económica, los datos de partida y los porcentajes de asignación establecidos, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Factores de asignación para la grasa y harina animal

Producto	Cantidad (ton/año)	Asignación Económica (%)
Sebo	14700	57.52
Harina	17640	42.48
Total	32340	100

Vinculación con la unidad funcional

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario del sistema de recuperación de grasa animal y su vinculación con la unidad funcional, y en la Tabla 11, se presenta las materias primas y los aditivos en las cantidades necesarias en el sistema producción de grasa animal.

Tabla 11. Balance de materia para la obtención de grasa animal

Productos	Cantidad	Unidad	% Asignación
Harina de origen animal	17640	ton	42.48
Grasa de origen animal	14700	ton	57.52
Materiales/Combustibles			
Antioxidante	5880	kg	
Transporte	9408000	tkm	
Electricidad de la red	2491646.4	kWh	
Leña	11052240	kg	

6 Análisis de inventario del sistema A5. Mix de materia prima grasa

El sistema A5, correspondiente al mix de materia prima grasa que, se refiere a la preparación de la corriente de entrada a la transesterificación, y cuantifica las corrientes de entrada y salida, necesarias para preparar la corriente de materia grasa. En este análisis dicha corriente, sólo incluye el transporte de las distintas materias primas que la conforman. A continuación, en la **Figura 7** se puede ver el esquema específico para la adecuación del mix de materia prima grasa, las materias primas y los aditivos para producir un kg de mezcla.

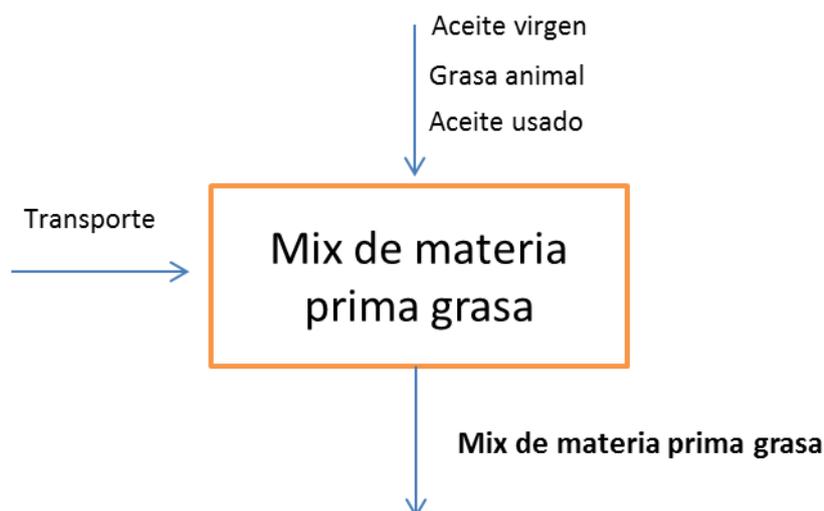


Figura 7. Diagrama esquemático de la adecuación del mix de materia prima grasa

Vinculación con la unidad funcional

La Tabla 12 presenta el balance de entradas y salidas del sistema de adecuación del mix de materia grasa.

Tabla 12. Balance de entradas y salidas en el sistema Mix de materia grasa

Productos	Cantidad	Unidad
Mix de materia prima grasa	1	kg
Materiales/Combustibles		
Aceite de soja (crudo y desgomado)	0.53	kg
Aceite de canola	0.15	kg
Grasa animal	0.3	kg
Aceite usado*	0.02	kg
Transporte	0.0135	tkm

* No se consideran cargas del aceite usado

7 Análisis de inventario del Sistema A6. Producción de biodiesel

En el sistema A6, la producción de biodiesel se da a partir de una reacción de transesterificación. En dicha reacción, la corriente de materia prima grasa, ingresa en un reactor en el que los triglicéridos de la materia grasa, reaccionan con el metanol en presencia de un catalizador [Garrain et al, 2010]. El producto de la reacción se compone básicamente de metiléster de ácido graso (FAME) y glicerina. El metanol en exceso y el catalizador deben ser neutralizados, por lo que se mezclan con ácido

clorhídrico (HCl) en la cantidad necesaria. En este caso como la glicerina sea purificada, su tratamiento consistiría en una instalación para eliminar los jabones y ácidos grasos libres que pudiera contener. Posteriormente se rectificaría, siendo necesario para alcanzar la calidad adecuada proceder a la decoloración y desodorización. La Figura 8 presenta un diagrama esquemático del sistema.

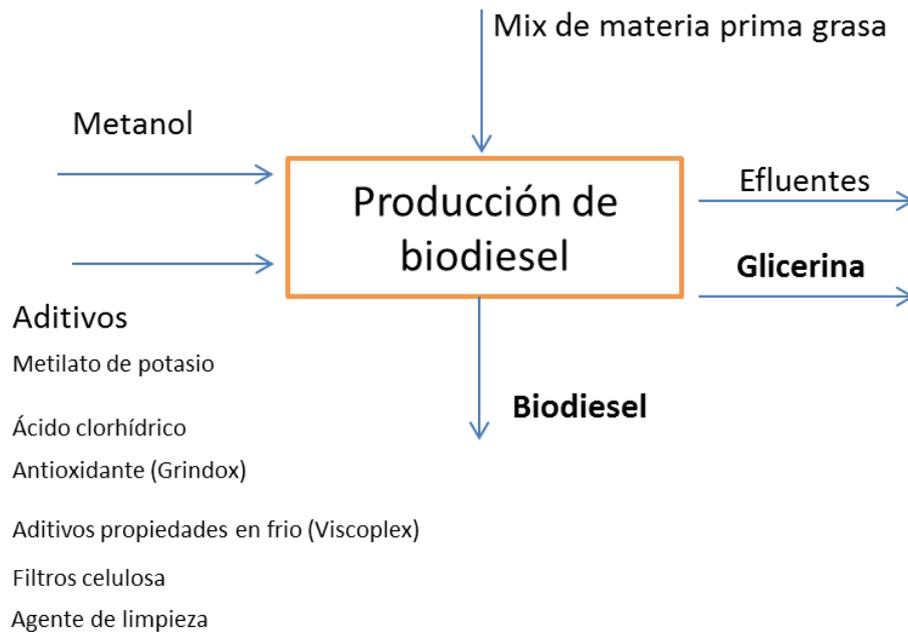


Figura 8. Diagrama esquemático de entradas y salidas del sistema producción de biodiesel.

Procedimiento de asignación

En el sistema de producción de biodiesel, además del biocombustible, se produce glicerina. Esta glicerina se usa para consumo local como combustible en una cementera y también como producto de exportación. Tal como se describe en la metodología, es necesario establecer el criterio de asignación para repartir las cargas ambientales entre estos dos productos. Se ha seguido el mismo criterio de asignación económica, los datos de partida y los porcentajes de asignación establecidos, se presentan en la Tabla 13 y la Tabla 14.

Tabla 13. Datos para Biodiesel y glicerina

Producto	Biodiesel	Glicerina*		Total
Masa (Kg/tBD)	1000	30% cementera	70% exportación	1180
		54	126	
PCI (MJ/kgprod)	37,2	16	16	
Part Energía (MJtotal)	37200	864	2016	40080

Tabla 14. Factores de asignación para biodiesel y glicerina

Asignación Económica (%)	
Biodiesel	Glicerina
98,18	1,82

Vinculación con la unidad funcional

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario del sistema de producción de biodiesel y su vinculación con la unidad funcional. Como unidad funcional de este sistema, se ha establecido una tonelada de biodiesel, aunque para el posterior análisis de resultados, se ha utilizado un MJ (1MJ) de biodiesel. La Tabla 15 presenta el balance de entradas y salidas del sistema.

Tabla 15. Balance de materia y energía en la producción de biodiesel

Productos	Cantidad	Unidad	% Asignación
Biodiesel	1	ton	97.66
Glicerina	180	kg	2.34
Materiales/Combustibles			
Mix de materia prima grasa	1058.2	kg	
Metanol	100	kg	
Electricidad de la red	59.32	kWh	
Catalizado (metilato de potasio)	24	kg	
Leña	38.37	kg	
Transporte de insumos	0.068	tkm	
Transporte de producto terminado	0.010	tkm	
Filtros de celulosa	0.816	kg	
Agua de la red (OSE)	115.48	kg	
Agua de osmosis	32.19	kg	
Antioxidante (Grindox)	0.3	kg	
Ácido Clorhídrico	0.04	kg	
Aditivo. propiedades en frio (Viscoplex)	3	kg	
Agente de limpieza (policloruro de aluminio)	1.5	kg	

Vertidos a tratamiento

Efluentes

0.08

m3

SECCIÓN IV. Evaluación del impacto del ciclo de vida

La fase de evaluación de impacto tiene como misión evaluar la magnitud de los impactos ambientales, a partir de las cargas identificadas en el inventario de los procesos implicados, a lo largo todo el ciclo.

La UNE-EN-ISO 14.040:2006 establece una serie de pasos en la etapa de evaluación de impacto:

- Clasificación: cada carga ambiental se asigna a una o varias categorías de impacto
- Caracterización: la contribución de cada carga ambiental a cada una de las categorías de impacto se calcula multiplicando las cargas por unos factores de caracterización. Los resultados dentro de cada una de las categorías de impacto se suman para dar un resultado de cada categoría
- Normalización. Cada resultado de cada categoría se normaliza para obtener una estimación de la importancia del resultado en las diferentes categorías.
- Valoración. El resultado normalizado se multiplica por un factor de ponderación que representa la importancia relativa de cada categoría de impacto. Los resultados ponderados se pueden entonces sumar para dar un resultado final del impacto ambiental del sistema estudiado.

La Norma señala una serie de elementos obligatorios y otros opcionales. Los elementos obligatorios son los siguientes:

- Selección de las categorías de impacto, de los indicadores de categoría y de los modelos de caracterización.
- Asignación de los resultados del Inventario de Ciclo de Vida a las categorías de impacto (clasificación)
- Cálculo de los resultados de los indicadores de categoría (caracterización) que es el perfil de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.

Como elementos opcionales señala los siguientes:

- Cálculo de la magnitud de los resultados de los indicadores con relación a una información de referencia (normalización)
- Agrupación: ordenación y posible clasificación de las categorías de impacto

- Ponderación. Conversión y posible agregación de resultados de los indicadores de categorías de impacto usando factores numéricos basados en valoraciones subjetivas

- Análisis de calidad de los datos

La Norma no señala ninguna metodología específica para realizar esta etapa de evaluación de impacto y en la literatura científica sobre el tema no existe un acuerdo unánime sobre cuál es la metodología más apropiada.

Considerando las recomendaciones de los diferentes métodos de evaluación de impacto (normativa ISO 14040/44 de 2006) se acordó para la realización de la evaluación de impacto:

- Realizar solamente las etapas de clasificación y caracterización, debido al enorme grado de subjetividad que conlleva las dos siguientes etapas; Normalización y valoración.
- Seleccionar las siguientes categorías de impacto y métodos de evaluación:

Tabla 16. Indicadores de impacto aplicados

Tipo de impacto	Categoría de impacto	Método y fuente
Recursos	Energía	Cumulative Energy Demand. [Frischknecht. R, et al 2003]
Contaminación	Cambio climático	ILCD, 2011. [EC, 2012]

1 Impactos sobre el cambio climático

Los impactos sobre el cambio climático están producidos por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En cuanto a estas emisiones, se presentan los resultados del inventario realizado para el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄), a lo largo de todo el ciclo de vida. Para el cálculo del impacto generado por estas emisiones, en equivalentes de CO₂ (CO₂eq), se han utilizado los siguientes factores de caracterización, que expresan el potencial de calentamiento global de cada una de las sustancias consideradas. Los potenciales usados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Potenciales de calentamiento global

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
100 años	1	28	265

Fuente: IPCC 2014

Sistema A1. Cultivo de oleaginosas (canola y soja)

Los resultados se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19 expresados en g de CO₂ eq/kg de canola y soja respectivamente.

Tabla 18. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de producción de canola (gCO₂equiv/kg canola).

Emisiones N ₂ O en campo	Combustible	Fertilizante fosfatado	Fertilizante nitrogenado	Fertilizante potásico	Fitosanitarios	Transporte insumos	Semilla de siembra	TOTAL
322.88	43.70	74.62	173.62	10.72	31.90	5.01	3.97	666.41

Tabla 19. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de producción de soja (gCO₂equiv/kg soja).

Emisiones N ₂ O en campo	Combustible	Fertilizante fosfatado	Fertilizante nitrogenado	Fertilizante potásico	Fitosanitarios	Transporte insumos	Semilla de siembra	TOTAL
159.00	32.82	32.01	1.91	9.52	21.10	1.64	49.48	307.48

De forma gráfica, la Figura 9 presenta la contribución porcentual de las diferentes etapas al calentamiento global.

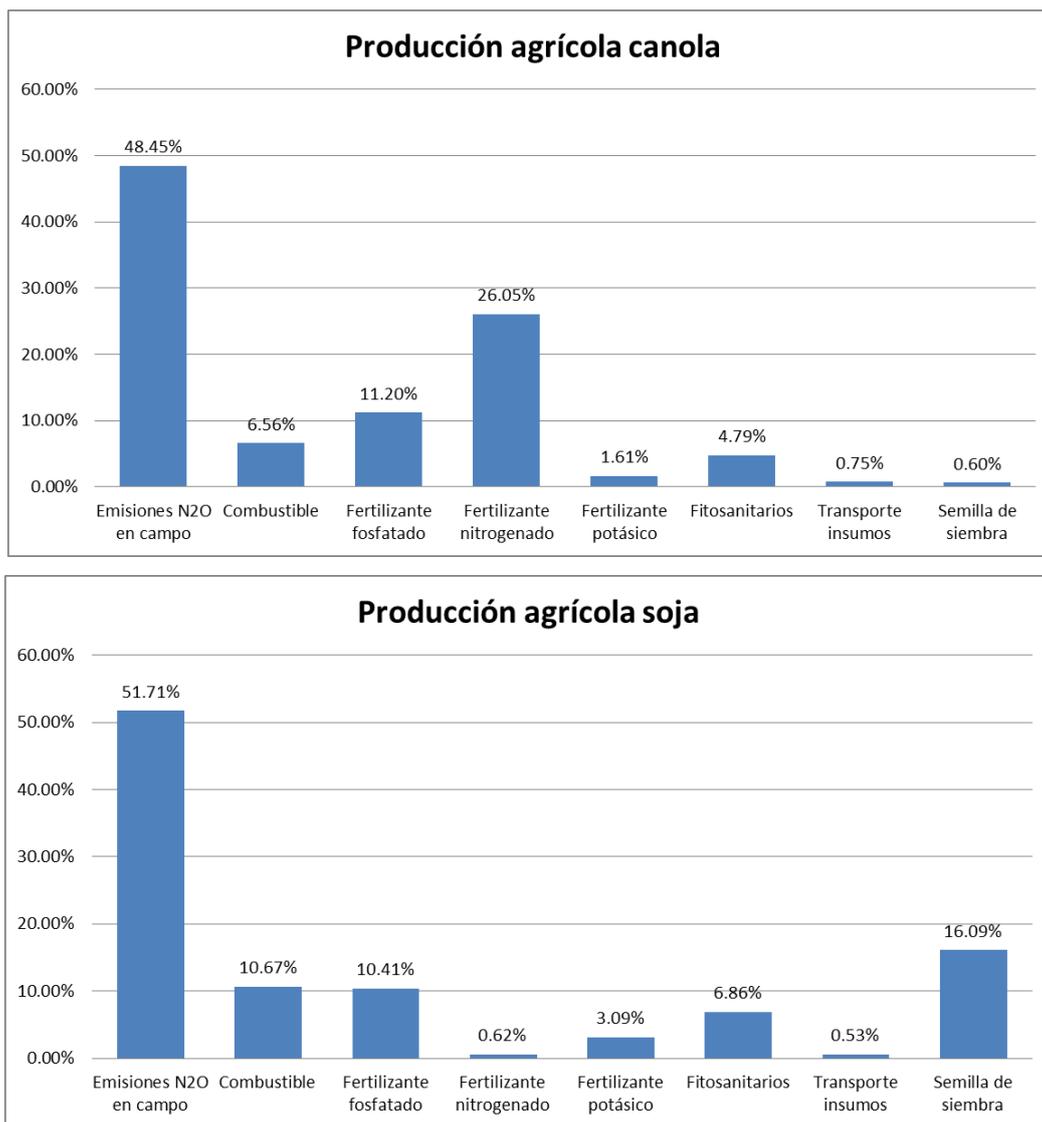


Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de canola y soja.
Contribución por etapas

Como se puede observar, las etapas que más contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero son la propia etapa de cultivo con las emisiones de óxido nitroso producidas tras la aplicación de los fertilizantes nitrogenados y los procesos de fabricación de fertilizantes especialmente nitrogenados en el caso de la canola y fosfatados en el caso de la soja. La fabricación y uso del combustible en las labores agrícolas es otra fuente importante de emisiones especialmente en el caso de la soja, como lo es la producción de semilla de siembra en el cultivo de la soja.

Las emisiones totales ascienden a un total de 666.41 gCO₂equiv/kg de canola y 307.48 gCO₂equiv/kg de soja. El valor de referencia considerado por la Comisión europea en

los valores por defecto de las emisiones de gases de efecto invernadero para la producción de biodiesel de canola (que podría compararse con el biodiesel de canola) es de 664,58 g/kg de canola, mientras que en el caso de la soja es de 365.27 g/kg de soja. Existe pues bastante acuerdo entre los resultados obtenidos en este estudio con los considerados en la Directiva de Renovables de la Comisión Europea (DER).

En el caso de la canola las principales diferencias observadas son el menor consumo de combustible (18,5 kg/ha en el cultivo en Uruguay frente 68.75 kg/ha en el caso de los valores de la DER) y el mayor consumo de fitosanitarios. Asimismo, los consumos de fertilizantes son mayores por kg de canola producida debido a que las producciones son sensiblemente menores en el caso del cultivo en Uruguay (1300 kg canola/ha., en Uruguay frente a 3113 kg canola/ha., en el caso de la DER). En conjunto, las emisiones en el cultivo en Uruguay son algo superiores a las consideradas en los datos de la DER.

En el caso de la soja destaca también el menor consumo de combustible (20.16 kg/ha en el cultivo en Uruguay frente 48.73 kg/ha en el caso de los valores de la DER). Es de destacar que el valor de la DER no tiene en cuenta las emisiones que vendrían arrastradas por la semilla de siembra que hemos visto que son bastante importantes en el caso analizado.

La Figura 10 muestra una comparación de los resultados obtenidos con otras referencias publicadas en las bases de datos para la producción agrícola de canola y soja.

Los resultados obtenidos en el caso analizado de Uruguay tanto de canola como de soja se sitúan en el rango inferior de los resultados publicados.

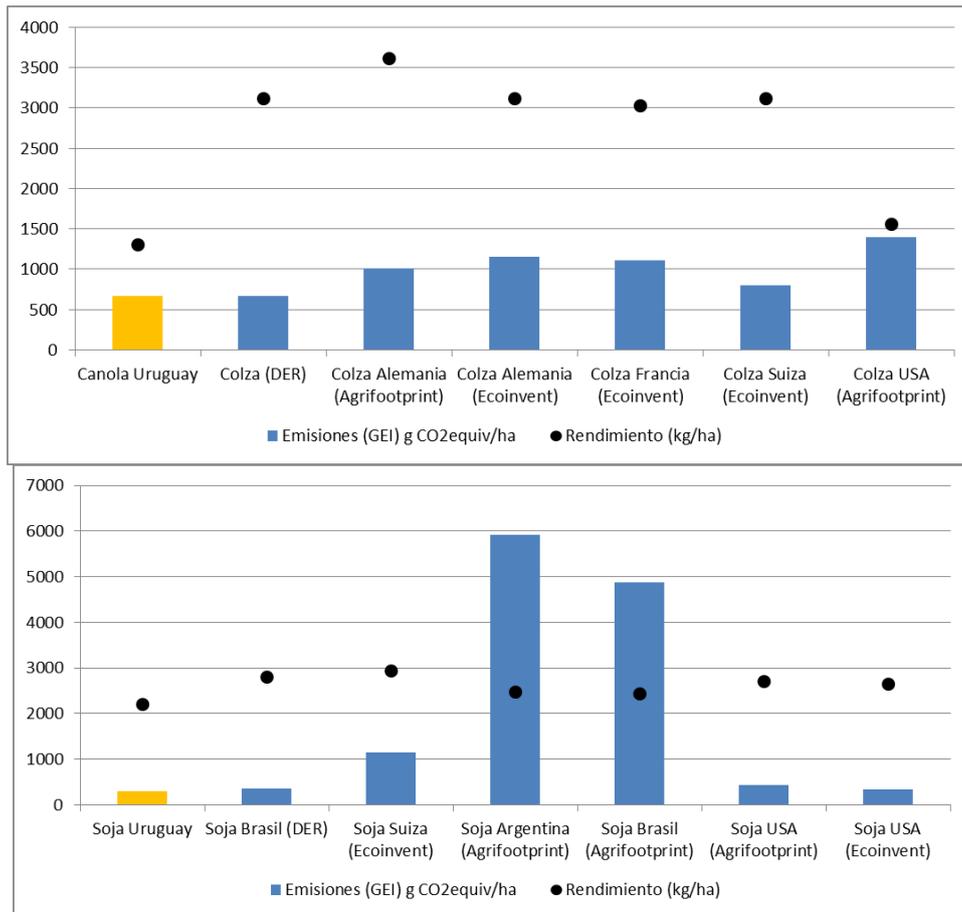


Figura 10. Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de canola y soja con otras referencias publicadas.

Sistema A2. Extracción de aceite

Las emisiones de gases de efecto invernadero originadas en el proceso de extracción de los aceites de canola y soja se muestran en la Tabla 20 y en la Figura 11.

Tabla 20. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa obtención de aceite de canola(kgCO₂equiv/kg aceite).

	Semilla	Transporte	Hexano	Vapor	Leña	Electricidad	Tratamiento de efluentes	TOTAL ACEITE
Canola	1.28	0.046	0.0014	0.0011	1.35E-04	0.021	4.83E-08	1.35
Soja	0.814	0.063	0.0019	0.0015	1.86E-04	0.029	6.67E-08	0.498

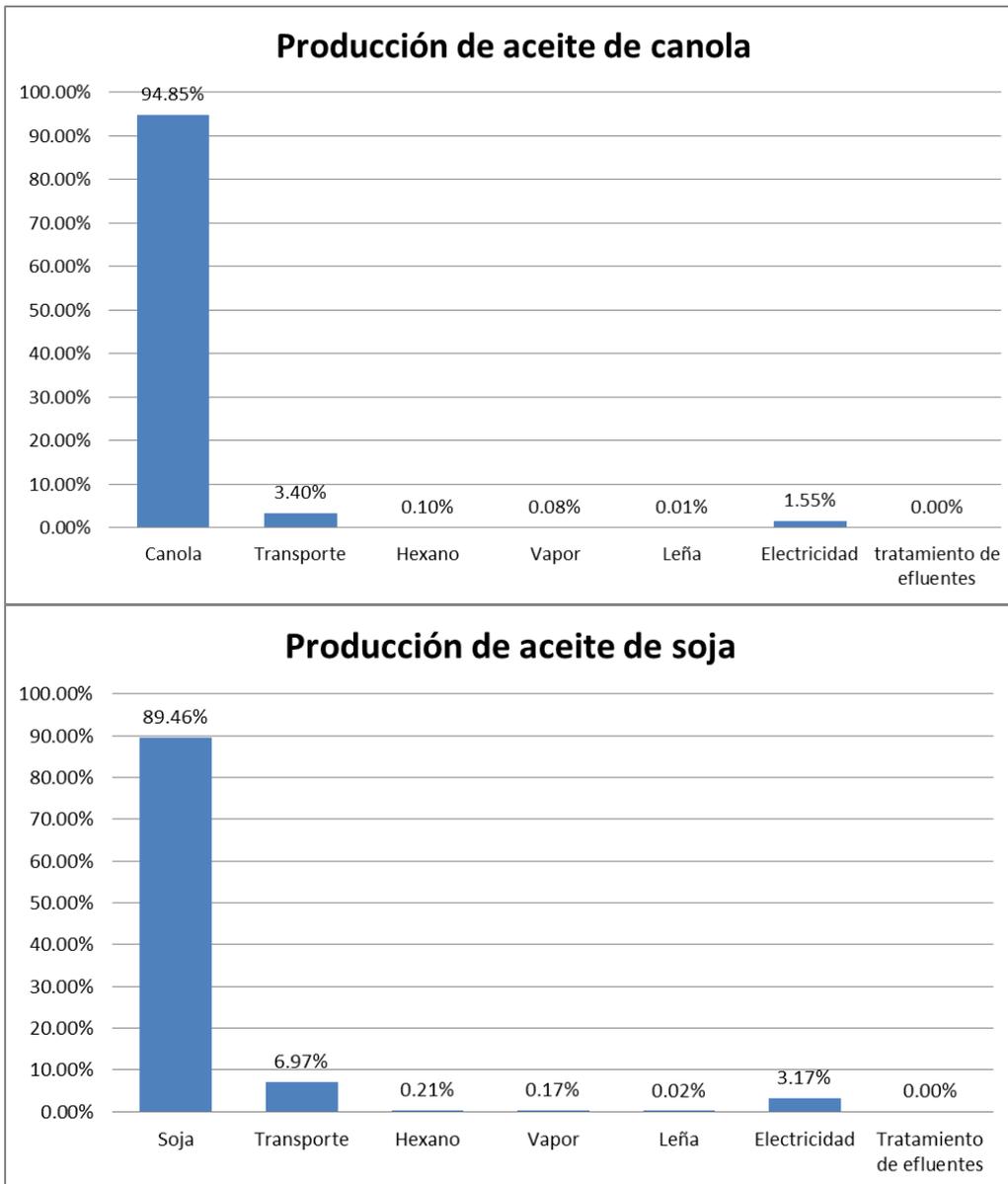


Figura 11. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de aceites de canola y soja. Contribución por etapas

Las emisiones de este proceso vienen determinadas en un 95% y un 90% por el proceso de producción agrícola de canola y soja respectivamente, que se han discutido anteriormente, en un 3-7% por el transporte de las semillas y en alrededor de un 2-3% por el consumo de electricidad del proceso.

Las emisiones procedentes de la electricidad suponen entre 21 y 29 g CO₂equiv/kg aceite de canola y soja respectivamente. Estas mismas emisiones alcanzan unos valores de 54 y 205 gCO₂ equiv/kg de aceite de canola y soja respectivamente en los cálculos realizados para la DER. Las diferencias son debidas a las diferencias en la

estructura del mix de generación uruguayo y el considerado por defecto en la DER. Los factores de emisión considerados son de 46.67 gCO₂equiv/MJ en el caso del mix de generación uruguayo y de 128 gCO₂equiv/MJ en el caso del mix europeo considerado en los cálculos de la DER.

Las emisiones que proceden del uso de hexano son de alrededor de 1-2 gr/kg de aceite de canola y soja respectivamente. Estas mismas emisiones se han calculado entre 13 y 19 g/kg aceite de canola y soja respectivamente en los valores de la DER. Las diferencias se deben a discrepancias en los factores de emisión de la producción de hexano que en el proceso considerado de Ecoinvent ascienden a 20.33 g CO₂equiv/MJ hexano mientras que el factor considerado por la DER asciende a 80.50 g CO₂equiv/MJ hexano.

Pero las diferencias más importantes están en las emisiones procedentes de los consumos de calor del proceso que en el caso analizado son de 1-2 g/kg de aceite mientras que en los cálculos de la DER ascienden a 150 y 559 g/kg aceite de canola y soja respectivamente. Estas emisiones proceden del uso de gas natural para producir el calor de proceso. En el caso de la producción de aceite en el caso analizado, el calor se obtiene a partir de leña cuyas emisiones de GEI son mucho más reducidas.

En conjunto, las emisiones de este proceso son mucho menores que los valores de referencia de la DER.

Sistema A3. Recuperación de aceite usado

Este proceso no tiene emisiones asociadas dado que las únicas emisiones son las que se producen en el transporte de estos aceites a la planta que se han tenido en cuenta en el sistema A5.

Sistema A4. Recuperación de grasa animal

Esta etapa comprende los procesos recuperación de grasa animal a partir de residuos de la industria cárnica. Como co-producto se obtienen harinas.

Los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero, asignados a la producción de estas grasas, se muestran en la Tabla 21 y en la Figura 12 expresado en gCO₂equiv/kg grasa animal.

Tabla 21. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de recuperación de grasa animal (gCO₂equiv/kg grasa animal).

Antioxidante	Transporte	Electricidad	Leña	TOTAL
4.35E-04	0.061	0.017	0.002	0.081

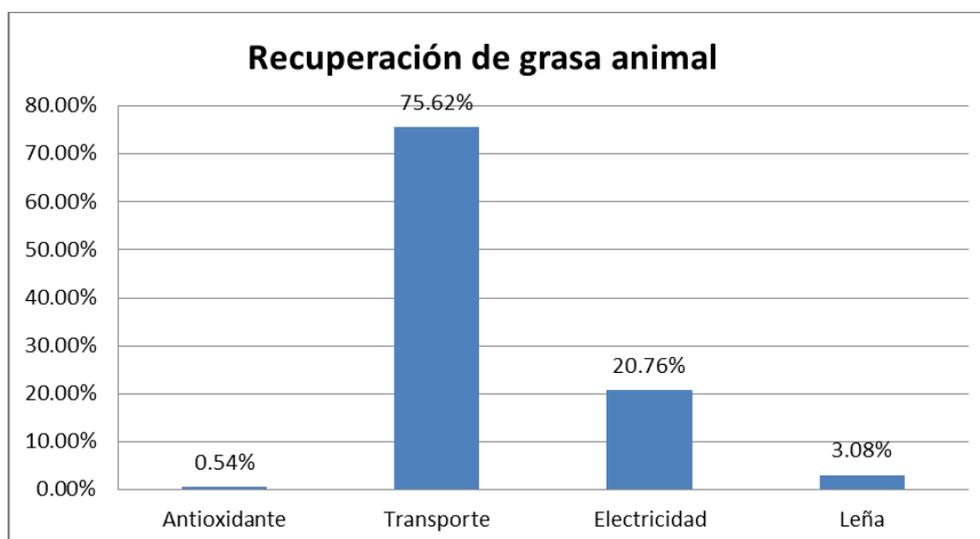


Figura 12. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de grasa animal.
Contribución por etapas

Las emisiones totales ascienden a 0.081 gCO₂equiv/kg grasa y se deben fundamentalmente al transporte de los residuos de matadero hasta la planta de rendering. El consumo de electricidad supone un 21% de las emisiones totales de este proceso y el consumo de calor producido a partir de leña un 3%.

Sistema A5. Adecuación del mix de materia grasa

Esta etapa comprende únicamente el transporte de todas las materias grasas (incluido del aceite usado) a la planta de biodiesel. Los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero de esta fase se muestran en la Tabla 22 y en la Figura 13.

Tabla 22. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de adecuación del mix de materia grasa (gCO₂equiv/kg materia grasa).

Aceite de soja	Aceite de canola	Grasa animal	Transporte	TOTAL
0.482	0.203	0.024	0.001	0.711

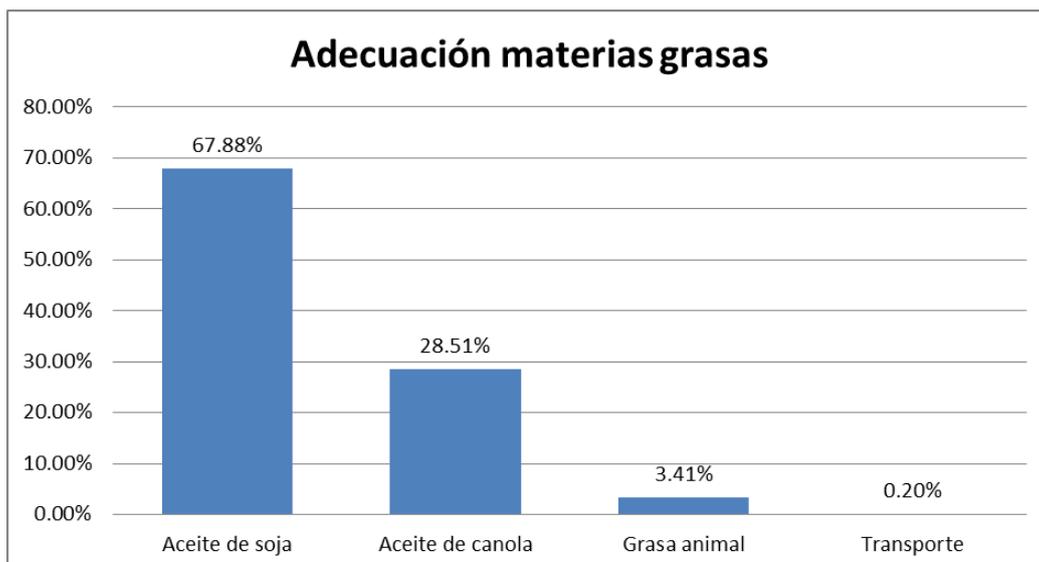


Figura 13. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de adecuación del mix de materia grasa. Contribución por etapas

Las emisiones de gases de efecto invernadero de esta etapa están dominadas por las emisiones que arrastran las diferentes materias grasas empleadas, y un 0.2% a los transportes de las materias grasas.

Sistema A6. Producción de biodiesel

Esta etapa comprende los procesos de obtención de biodiesel mediante la transesterificación de las materias grasas. Los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero de esta fase se muestran en la Tabla 22 y en la Figura 14.

Tabla 23. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de producción de biodiesel (gCO₂equiv/kg biodiesel y gCO₂equiv/MJ biodiesel).

	Mix materia prima grasa	Metanol	Catalizador	Otros insumos	Electricidad	Leña	Transporte	TOTAL
kg CO ₂ eq/kg	0.734	0.127	0.01	0.021	0.049	2.16E-04	2.99E-06	0.941
gCO ₂ eq/MJbd	19.74	3.417	0.27	0.553	1.305	5.81E-03	8.04E-05	25.29

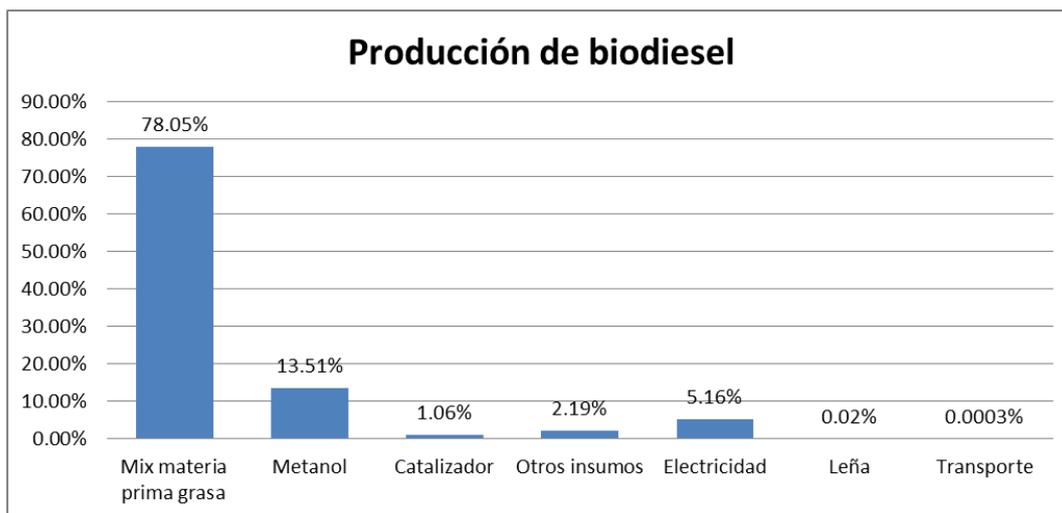


Figura 14. Emisiones de gases de efecto invernadero de la etapa de producción de biodiesel.
Contribución por etapas

Las emisiones del proceso de transesterificación (es decir descontando las emisiones que arrastran las materias grasas) se han calculado en 5.55 g CO₂equiv/MJ de biodiesel que son sensiblemente menores a las emisiones calculadas para los procesos de transesterificación de la DER. En estos últimos cálculos realizados por la CE, las emisiones del proceso de transesterificación ascienden a 17 gCO₂equiv/MJ de biodiesel. Una de las diferencias importantes encontradas es debida a las emisiones que arrastra el consumo de metanol. Las diferencias son debidas tanto al consumo de metanol del proceso que es significativamente menor, como al factor de emisión considerado. Este factor es de 92.8 g CO₂equiv/MJ en el caso de los cálculos de la DER y de 64,36 g CO₂equiv/MJ en los cálculos realizados en este caso utilizando para ello un proceso de Ecoinvent (Methanol, at plant/GLO U) y añadiendo las emisiones de la combustión del metanol en su uso final.

Otra razón que explica la discrepancia de resultados es que el proceso considerado en la DER utiliza gas natural como fuente de calor en el proceso, mientras que en el proceso implementado en Uruguay se utiliza leña, cuyo factor de emisión es mucho más reducido.

Las emisiones totales de la producción de biodiesel (incluyendo todas las etapas anteriores) ascienden a alrededor de 941 gCO₂equiv/kg de biodiesel lo que equivale a 25.29 gCO₂equiv/MJ de biodiesel. El porcentaje de ahorro frente a la producción y uso de un combustible fósil de referencia (cuyas emisiones se estiman en 83,8 gCO₂eq/MJ)

es de un **70%**. Este porcentaje de ahorro, cumpliría con los valores más exigentes de la DER.

La mayor parte de las emisiones vienen de las materias grasa utilizada (71%), mientras que las emisiones producidas en el proceso de transformación son muy reducidas.

Si analizamos la contribución de las diferentes etapas al resultado global de emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de biodiesel (Figura 15) vemos cómo la etapa final de transesterificación aporta el 22% de la emisiones totales, las etapas agrícolas constituyen alrededor de un 69%, los transportes un 7% y los procesos de extracción de aceites y rendering un 3%.

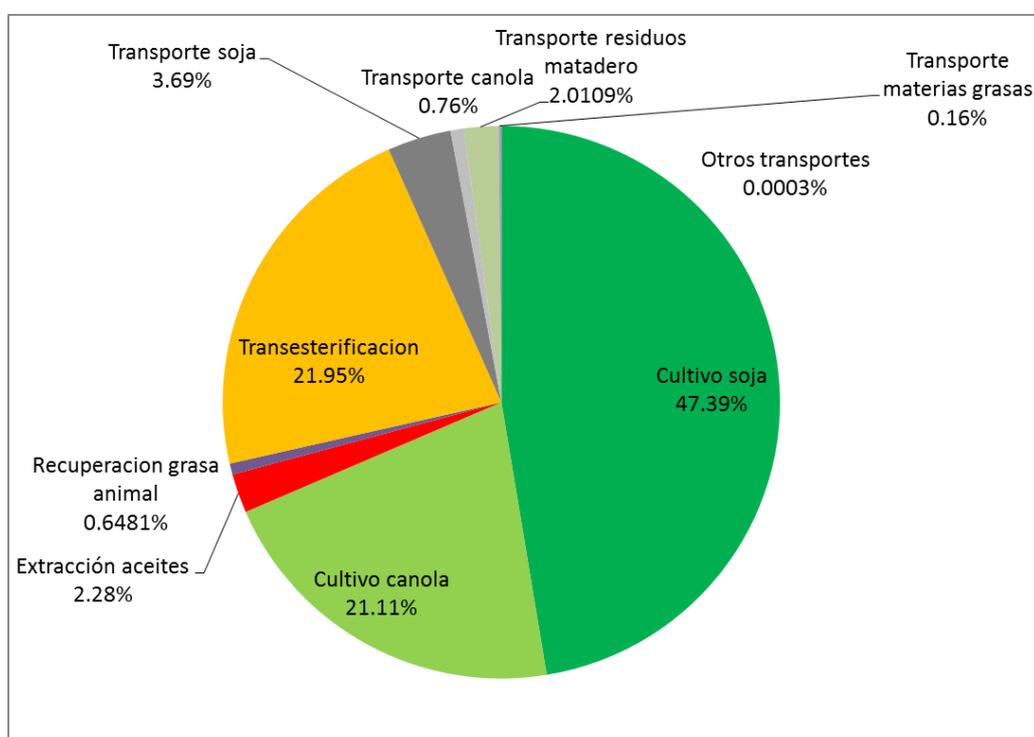


Figura 15. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de biodiesel.
Contribución de las diferentes etapas

Si comparamos estos resultados con otros publicados en la literatura científica, vemos como las emisiones de GEI del biodiesel producido por ALUR en Uruguay estarían en el rango de los resultados publicados.

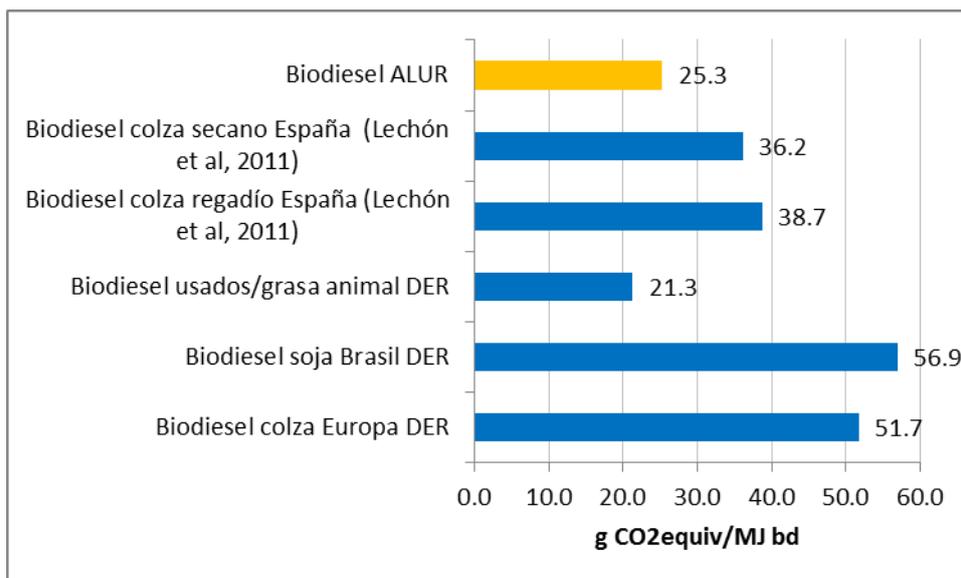


Figura 16. Comparación de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de biodiesel con otras referencias publicadas.

2 Balance energético

El balance energético se obtuvo en base al cálculo de la energía primaria total consumida por los procesos. Dicha energía total incluye la energía no renovable (fósil) y la energía renovable (solar, eólica e hídrica) consumida. A continuación, se presenta la energía fósil consumida por cada una de las etapas de ciclo de vida para las distintas etapas del proceso de producción de biodiesel estudiado.

Sistema A1. Cultivo de oleaginosas (canola y soja)

Los resultados se muestran en las tablas Tabla 24 y Tabla 25 expresados en MJ fósil/kg de canola y soja respectivamente.

Tabla 24. Consumo de energía fósil de la etapa de producción de canola (MJ fósil/kg canola).

Producción del combustible	Fertilizante fosfatado	Fertilizante nitrogenado	Fertilizante potásico	Fitosanitarios	Transporte insumos	Semilla de siembra	TOTAL
0.75	0.94	2.48	0.16	0.45	0.07	0.02	4.87

Tabla 25. Consumo de energía fósil de la etapa de producción de soja (MJ fósil/kg soja).

Producción del combustible	Fertilizante fosfatado	Fertilizante nitrogenado	Fertilizante potásico	Fitosanitarios	Transporte insumos	Semilla de siembra	TOTAL
0.48	0.40	0.08	0.15	0.30	0.02	0.09	1.52

De forma gráfica, la Figura 17 presenta la contribución porcentual de las diferentes etapas al balance de energía.

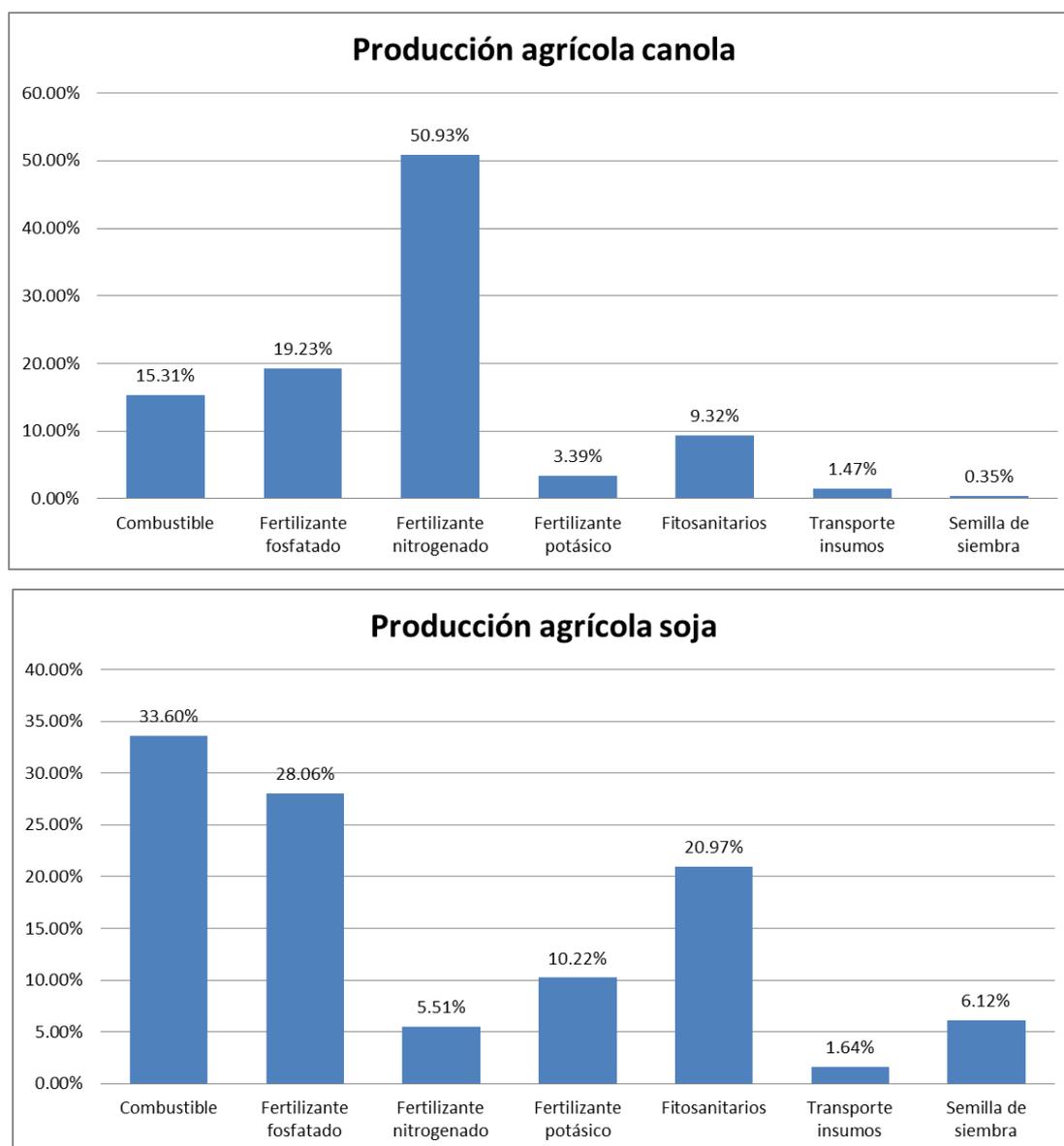


Figura 17. Consumo de energía fósil de la producción de canola y soja. Contribución por etapas

Como puede verse, las entradas con mayor consumo de energía fósil corresponden a la producción y uso del combustible y la producción de los fertilizantes nitrogenados en el caso de la canola y fosfatados en el caso de la soja. Cualquier mejora del proceso agrícola tendente a reducir estos consumos, supondrá una mejora sensible en el balance de energía fósil de este proceso y del conjunto del sistema de producción de biodiesel. La producción de fitosanitarios en el cultivo de la soja presenta también unos consumos energéticos elevados.

El consumo de energía fósil total es de 4.87 MJ/kg de canola y 1.52 MJ/kg de soja.

Sistema A2. Extracción de aceite

El consumo de energía fósil originado en el proceso de extracción de los aceites de canola y soja se muestran en la Tabla 26 y Figura 18 expresados en MJ fósil/kg aceite.

Tabla 26. Consumo de energía fósil de la etapa obtención de aceite de canola (MJ fósil/kg aceite).

	Semilla	Transporte	Hexano	Vapor	Leña	Electricidad	Tratamiento de efluentes	TOTAL ACEITE
Canola	9.36	0.65	0.084	0.018	0.002	0.075	2.27E-07	10.19
Soja	4.81	1.07	0.139	0.029	0.004	0.124	3.74E-07	6.18

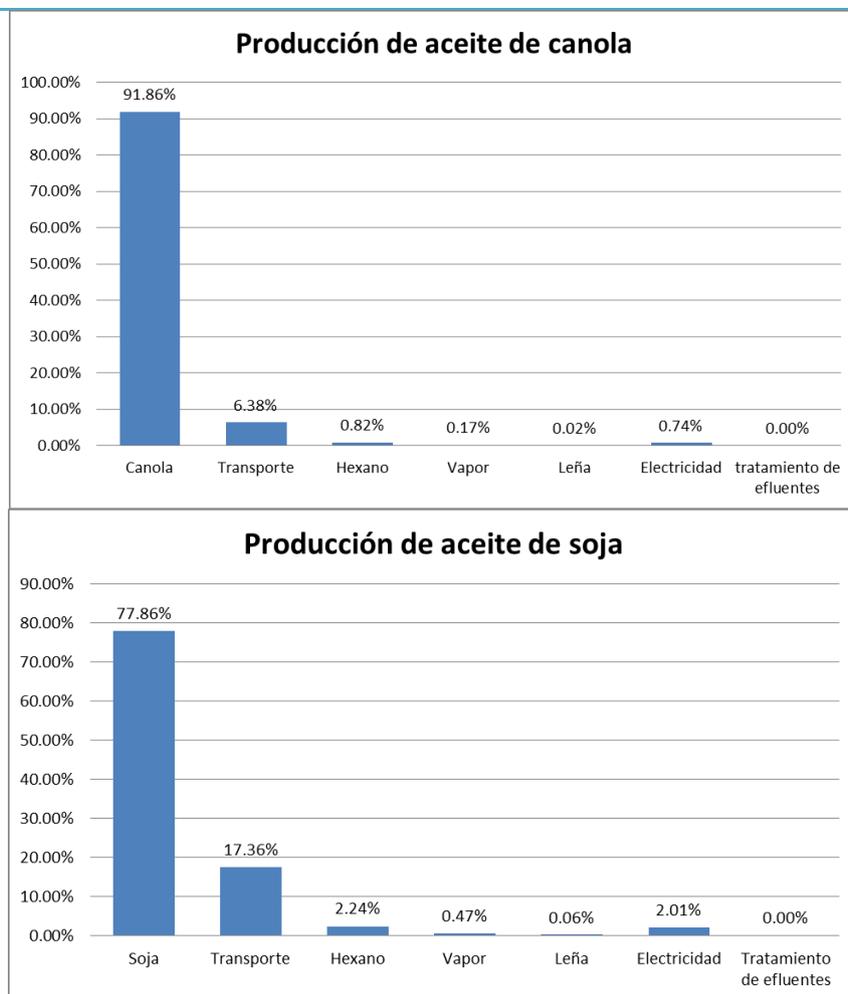


Figura 18. Consumo de energía fósil de la producción de aceites de canola y soja. Contribución por etapas

Los consumos energéticos de este proceso vienen determinados en un 92% y un 78% por el proceso de producción agrícola de canola y soja respectivamente, en un 6-17% por el transporte de las semillas, en un 1-2% por el consumo de hexano y en alrededor de un 1-2% por el consumo de electricidad del proceso.

El consumo total e energía fósil asciende a 10 MJ/kg de aceite de soja y 6 MJ/kg de aceite de canola.

Sistema A3. Recuperación de aceite usado

Al igual que en el caso de las emisiones de GEI, este proceso no tiene consumos energéticos asociados dado que los únicos consumos son los que se producen en el transporte de estos aceites a la planta que se han tenido en cuenta en el sistema A5.

Sistema A4. Recuperación de grasa animal

Los resultados de emisiones de consumos energéticos de este proceso, asignados a la producción de estas grasas, se muestran en la Tabla 27 y Figura 19 expresado en MJ fósil/kg grasa animal.

Tabla 27. Consumo de energía fósil de la etapa de recuperación de grasa animal (MJ fósil/kg grasa animal).

Antioxidante	Transporte	Electricidad	Leña	TOTAL
1.37E-02	7.78E-01	6.03E-02	3.93E-02	0.892

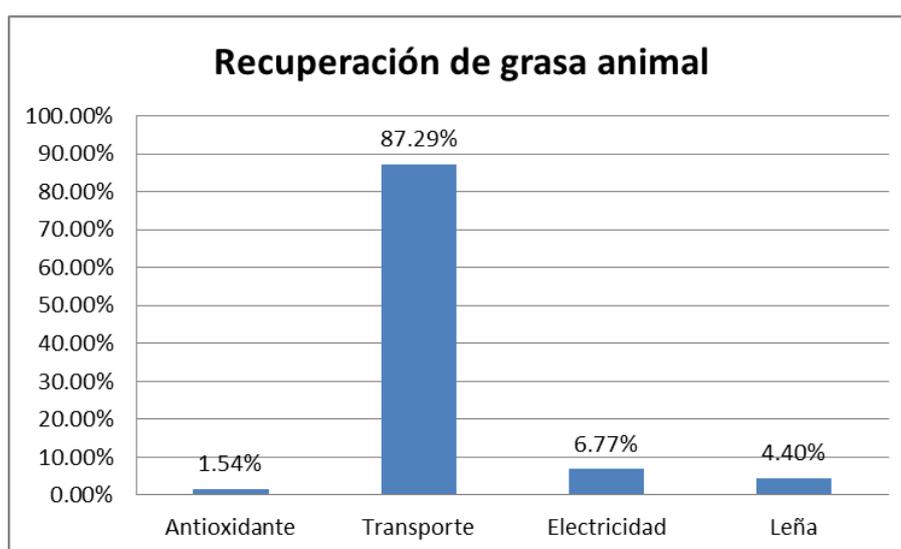


Figura 19. Consumo de energía fósil de la producción de grasa animal. Contribución por etapas

Los consumos energéticos totales ascienden a 0.892 MJ/kg grasa y se deben al transporte de todas las materias prima grasas (incluido el transporte de aceite usado). De los datos obtenidos, se observa la mayor contribución del transporte de los residuos de matadero hasta la planta de rendering. El consumo de electricidad supone un 7% de las emisiones totales de este proceso y el consumo de calor producido a partir de leña un 4%.

Sistema A5. Adecuación del mix de materia grasa

Los resultados de consumos energéticos de esta fase se muestran en la Tabla 28 y en la Figura 20.

Tabla 28. Consumos energéticos de la etapa de adecuación del mix de materia grasa (MJ fósil/kg materia grasa).

Aceite de soja	Aceite de canola	Grasa animal	Transporte	TOTAL
2.75	1.53	0.268	0.021	4.57

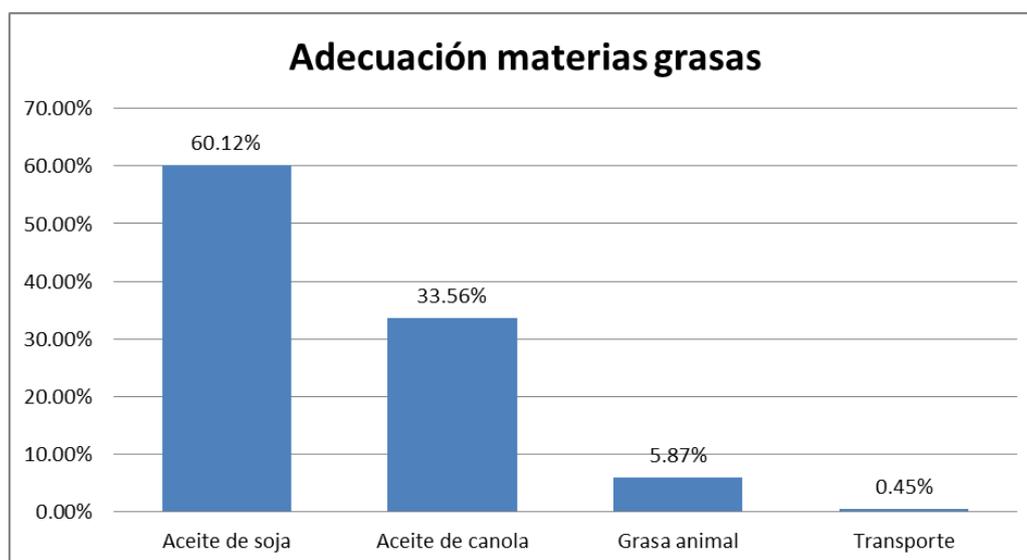


Figura 20. Consumo de energía fósil de la etapa de adecuación del mix de materia grasa.

Contribución por etapas

Los consumos energéticos de esta etapa están dominadas por los consumos que arrastran las diferentes materias grasas empleadas, y tan solo un 0.45% a los transportes de las materias grasas.

Sistema A6. Producción de biodiesel

Esta etapa comprende los procesos de obtención de biodiesel mediante la transesterificación de las materias grasas. Los resultados de consumos energéticos de esta fase se muestran en la Tabla 29 y en la Figura 21 .

Tabla 29. Consumo de energía fósil de la etapa de adecuación del mix de materia grasa (MJ fósil/kg biodiesel y MJ fósil/MJ biodiesel).

	Mix materia prima grasa	Metanol	Catalizador	Otros insumos	Electricidad	Leña	Transporte	TOTAL
MJ fósil/kg bd	4.71	3.58	0.54	0.38	0.036	3.40E-03	3.94E-05	9.25
MJ fósil/MJbd	0.13	0.10	0.015	0.01	9.64E-04	9.14E-05	1.06E-06	0.25

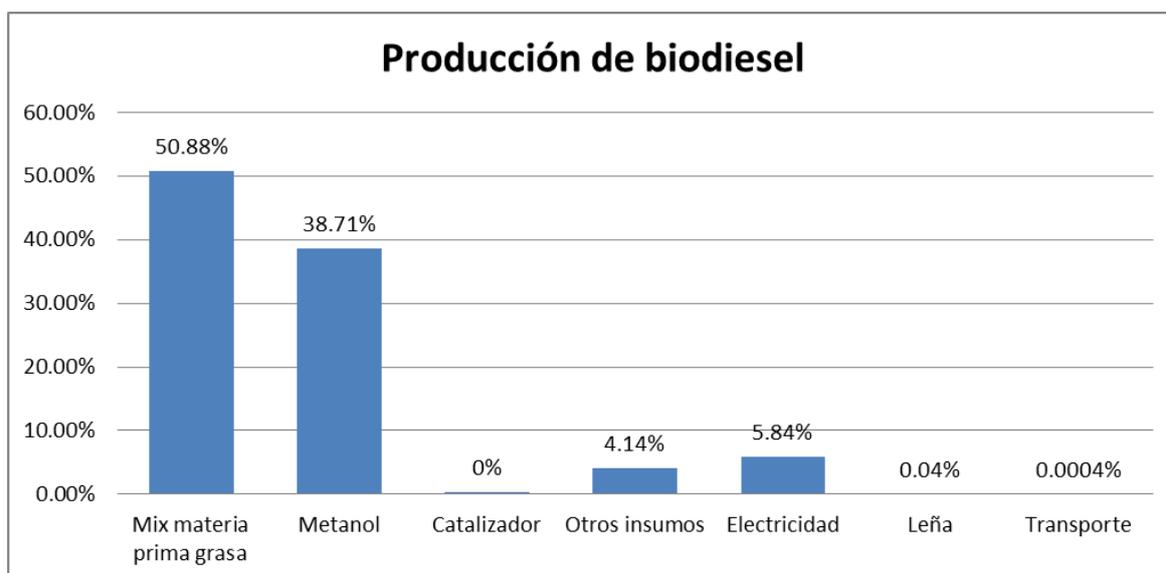


Figura 21. Consumo de energía fósil de la etapa de adecuación del mix de materia grasa.

Contribución por etapas

Los consumos energéticos totales de la producción de biodiesel (incluyendo todas las etapas anteriores) ascienden a alrededor de 4.54 MJ fósil/kg de biodiesel lo que equivale a 0.12 MJfósil/MJ de biodiesel.

La mayor parte de los consumos energético provienen del consumo de metanol (39%) y de las materias grasas (51%) contribuyendo el resto de las materias primas con un 10%.

El ratio de energía fósil, entendido como el ratio entre la energía del producto (en términos del poder calorífico inferior) y la energía fósil necesaria para producir y distribuir el producto se calcula para la producción de biodiesel en **4 MJp/MJf**. En este caso, el ratio de energía fósil obtenido es sustancialmente mejor que el combustible fósil a quien reemplazaría (0,76MJp/MJf [Garrain et al, 2012])

Si analizamos la contribución de las diferentes etapas al resultado global de consumos energéticos en la producción de biodiesel (Figura 22) vemos cómo la etapa final de transesterificación aporta el 49% de los consumos totales, las etapas agrícolas constituyen alrededor de un 39%, los transportes un 9% y los procesos de extracción de aceites y rendering un 2%.

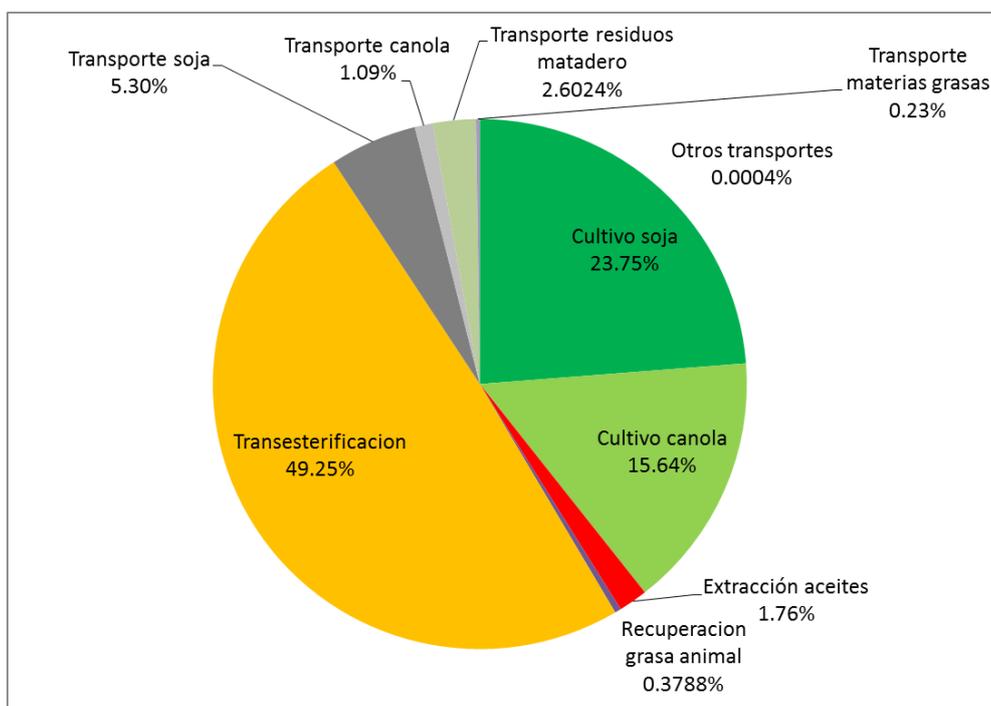


Figura 22. Consumos energéticos de la producción de biodiesel. Contribución de las diferentes etapas

Si comparamos estos resultados con otros publicados en la literatura científica, vemos como tanto los consumos de energía fósil como el ratio de energía fósil del biodiesel producido por ALUR en Uruguay estarían en el rango de los resultados publicados.

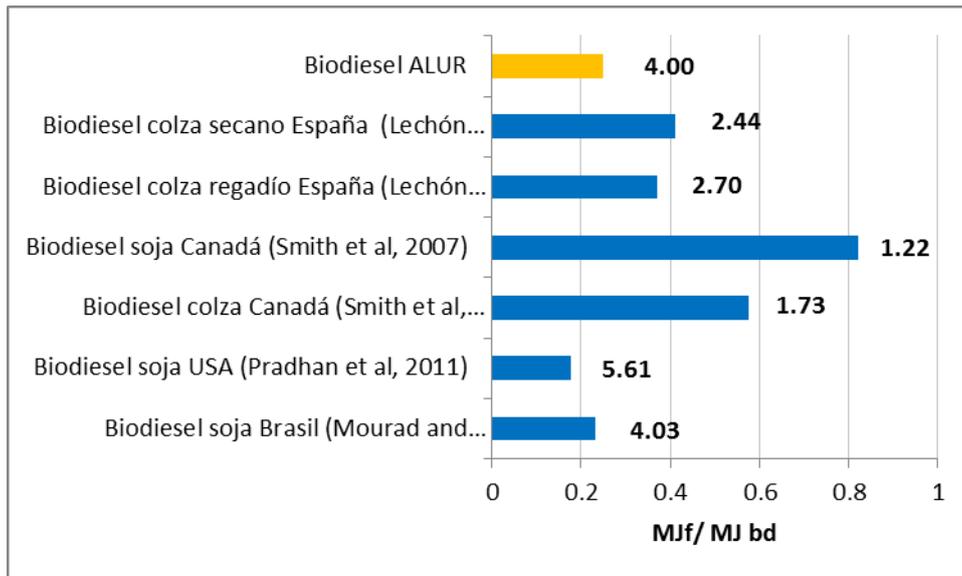


Figura 23. Comparación del consumo de energía fósil y del ratio de energía fósil de la producción de biodiesel con otras referencias publicadas.

SECCIÓN V. INTERPRETACIÓN

La fase de interpretación en un ACV, busca a través del análisis de los resultados tanto de la fase de Inventario y como de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida, resumir y discutir los aspectos más relevantes que permitan establecer conclusiones acordes con la definición del objetivo y alcance.

Una buena interpretación de los resultados en un ACV, pasa por la identificación de la influencia de las variables que más pueden afectar al resultado final. En este estudio y siguiendo la normativa relacionada [ISO 2006b], se indica en qué medida los cambios propuestos, influyen en los resultados de los indicadores.

Durante esta fase se identifican las principales cargas ambientales y por tanto los puntos del sistema evaluado que pueden o deben mejorarse así como las conclusiones finales.

Una de los aspectos que posibilita el establecimiento de conclusiones, es el análisis de sensibilidad, técnica que permite a priori, determinar la influencia de hipótesis relacionadas con modificación de los datos de entrada o variaciones en las materias primas utilizadas. En los siguientes apartados, se describe el análisis de sensibilidad seguida en este estudio de ACV, como parte de la fase de interpretación.

1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo comparando el escenario base, que es el analizado en este estudio, con diferentes escenarios alternativos. Los cambios propuestos se establecen a partir de nuevos escenarios, los cuales representan variaciones respecto al proceso estudiado, a partir de un escenario de referencia. Las variables elegidas para realizar este análisis de sensibilidad son las siguientes:

- **Modificación del mix de materia prima grasa.** En dicho escenario se asumen cambios en los porcentajes de participación de la materia grasa que pasa a transesterificación. En el primer análisis (AS11) el porcentaje de aceite virgen decrece y aumenta la participación de la grasa y el aceite residual. En el

segundo y tercero (AS12 y AS13) se considera el caso hipotético en que el biodiesel es producido únicamente con aceites usados y con sebo vacuno respectivamente.

- **Variación de los criterios de asignación.** En este caso, la suposición se refiere a la modificación de los criterios de asignación. En el escenario de referencia se ha hecho asignación económica para el sistema productivo, tomando como criterio de asignación la relación de cada uno de los co-productos y el precio de venta. En los escenarios desarrollados para análisis de sensibilidad, se utilizan dos (2) criterios de asignación adicionales: asignación energética y asignación másica, siguiendo también en este caso, las recomendaciones tanto de la normativa ISO, como aquellas recomendaciones específicas de la Plataforma Europea de Análisis de Ciclo de Vida [ISO 2006b; ILCD, 2010].

1.1 Definición de los escenarios analizados

AS1. Variación del mix de materia prima grasa

Considerando una variación del mix de materia grasa, se han definido tres escenarios diferentes para el mix de materia prima grasa, respecto al escenario de referencia.

AS11 Variación en los porcentajes de aceite

En el primer escenario, la participación del aceite virgen presenta la siguiente variación: el aceite de soja disminuye desde el 53% hasta un 30% de participación y en el caso de la canola, aumenta la participación de un 15% hasta un 29%. En el caso de las grasas de origen residual, tanto el aceite usado como la grasa animal, aumentan su participación. El aceite usado pasa de un 2 a un 6% y la grasa animal, de 30 a 35%.

AS12 Aceite usado como materia prima

Para este escenario, se ha asumido que toda la materia prima es aceite usado y no se considera participación de otras materias primas. Este cambio, implica variaciones también en los insumos necesarios para la producción del biodiesel. Por una parte, se requieren 30 kg de metilato de potasio por tonelada de biodiesel, y una relación aceite/biodiesel de 1.100 kg/ton. La etapa de adecuación de aceite usado incluye el transporte.

AS13 Sebo vacuno como materia prima

En este escenario, se considera que toda la materia prima grasa que se transesterifica proviene del sebo vacuno. Tal como en el caso anterior, dicho cambio, genera una variación en el consumo de catalizador en la transesterificación respecto al caso base. Son necesarios 30 kg de metilato de potasio por tonelada de biodiesel.

La Tabla 30, presenta las variaciones en los porcentajes de participación en los escenarios creados para análisis.

Tabla 30. Modificación de la mezcla de materias grasas

Materia prima	Escenario base	Esc. alternativo 1	Esc. Alternativo 2	Esc. Alternativo 3
	(%)	(AS11) (%)	(AS12) (%)	(AS13) (%)
Soja	53	30	-	-
Canola	15	29	-	-
Aceite usado	2	6	100	-
Grasa animal	30	35	-	100

AS2. Variación de los criterios de asignación

Tal como se ha descrito en el apartado de análisis de inventario, en la producción de biodiesel, a partir del Mix de materia grasa que se ha definido en este sistema, se generan otros productos de interés, por lo que es necesario distribuir las cargas ambientales de acuerdo con el proceso de asignación. En el caso base, se ha considerado el criterio económico, como criterio de asignación. Sin embargo, existen otros criterios que pueden ser utilizados y que generan diferencias en los resultados de la evaluación de impactos. Para identificar la magnitud de estas diferencias, se han

desarrollado dos (2) escenarios del proceso en estudio, aplicando en todas las etapas de producción, donde se obtiene más de un producto de interés, una asignación másica y una energética respectivamente.

Los datos de la asignación para cada uno de los criterios utilizados, en las etapas del proceso, se presentan en la Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33.

Tabla 31. Datos para asignación de la etapa de molienda

Tipo de asignación Materia prima	Másica		Energética	
	Harina	Aceite	Harina	Aceite
Soja	80,97	19,03	64,16	35,84
Canola	55,23	44,77	38,09	61,91

Tabla 32. Datos para asignación de la etapa de producción grasa animal

producto	cantidad (ton/año)	Másico (%)	PCI (MJ/kg)	Cantidad (MJ/año)	Energético (%)
Grasa animal	14700	45,45	37,1	545370	72,89
Harina animal	17640	54,55	11,5	202860	27,11
Total	32340	100		748230	100

Tabla 33. Datos para asignación de la etapa de producción de biodiesel

Biodiesel	Másica		Energética	
	Glicerina	Biodiesel	Glicerina	Biodiesel
84,75	15,25	92,81	7,19	

1.2 Resultados del análisis de sensibilidad

Gases de efecto invernadero

Como se puede ver en la Figura 24, el cambio en la mezcla de aceites (escenario AS1) no modifica sensiblemente el balance de gases de efecto invernadero de la producción de biodiesel. Aunque la producción de aceite de soja lleva aparejadas menores emisiones de gases de efecto invernadero que la producción de aceite de canola, este efecto se diluye en el resultado final debido a que en el escenario de sensibilidad se

usan más aceites usados y grasa animales con unas menores emisiones de gases de efecto invernadero respecto de los aceites vegetales.

En cuanto a la producción de biodiesel exclusivamente a partir de aceites usados (AS12) o sebo vacuno (AS13) los resultados de emisiones de gases de efecto invernadero son muy inferiores obteniéndose valores de 5.92 y 7.84 gCO₂equiv/MJ biodiesel respectivamente y unos ahorros de GEI del 93% y 91% respecto del combustible fósil de referencia respectivamente. En el caso de la producción de biodiesel a partir de sebo vacuno, destaca la importante contribución del transporte de residuos de matadero, 1.7 gCO₂equiv/MJ biodiesel, al resultado total de emisiones de GEI.

En cuanto a la influencia de los criterios de asignación, la asignación másica conduce a las menores emisiones de gases de efecto invernadero, seguida de la asignación energética. En efecto, la asignación másica conduce a los menores porcentajes de asignación de cargas tanto a los aceites y grasas, como al biodiesel; mientras que el uso de la asignación económica hace que los porcentajes de asignación aplicados tanto a los aceites vegetales como al biodiesel sean los más elevados. La selección pues del criterio de asignación económico en el caso base conduce a unos resultados que pueden considerarse conservadores desde el punto de vista de reducción de emisiones.

En todos los casos los ahorros de emisiones respecto del combustible fósil de referencia son superiores al 70%, por lo que este producto cumple sobradamente con los criterios de sostenibilidad actualmente establecidos por la DER.

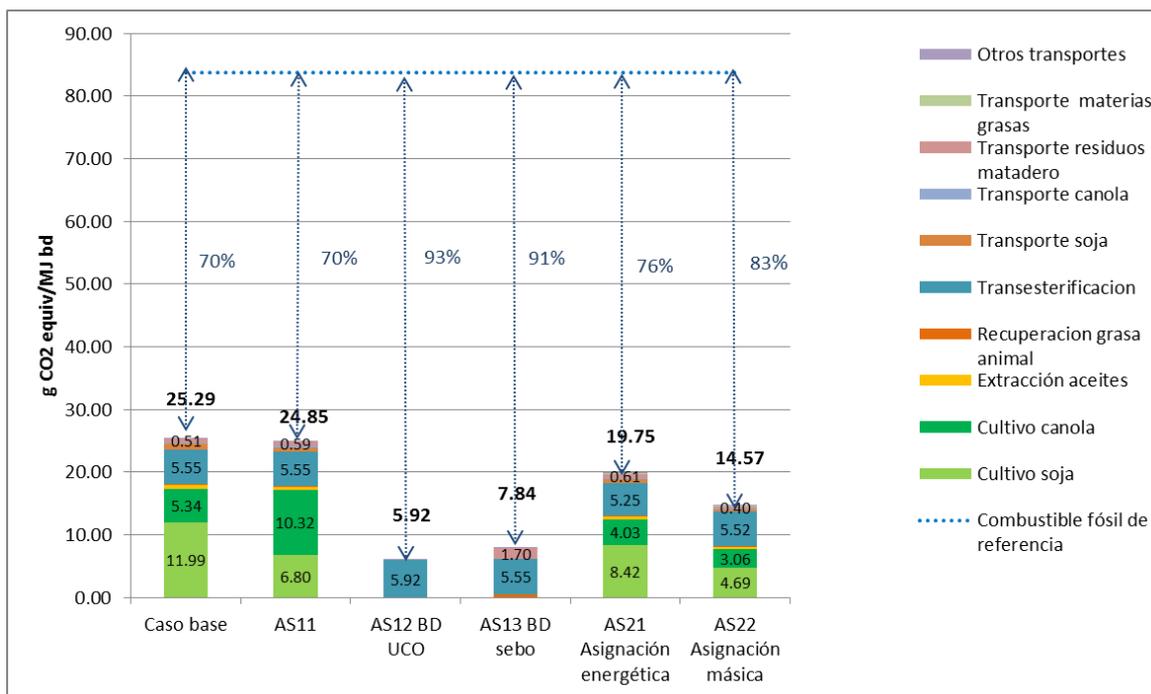


Figura 24. Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de biodiesel expresados en g CO₂equiv/MJ biodiesel en los distintos escenarios analizados

Balances energéticos

Los resultados de consumos de energía fósil en el proceso de producción de biodiesel de los escenarios de sensibilidad realizados se muestran en la Figura 25. En este caso, el primer análisis de sensibilidad, en el que se cambia la mezcla de aceites, los resultados son ligeramente superiores aunque las diferencias no son muy importantes.

En cuanto a la producción de biodiesel exclusivamente a partir de aceites usados o sebo vacuno, los resultados son sensiblemente inferiores, con unos consumos de energía fósil de 0.13 y 0.15 MJ_{ef}/MJ_{bd} respectivamente.

El cambio en el criterio de asignación produce asimismo diferencias importantes por las razones comentadas en la sección anterior. Los balances de energía fósil del proceso mejoran al utilizar tanto la asignación energética como especialmente la másica. El efecto es menor que en el caso de las emisiones de GEI puesto que el proceso de obtención de biodiesel tiene emisiones de GEI que no son de origen energético (fundamentalmente emisiones de las etapas agrícolas). También en este caso, la selección del criterio de asignación económico, hace que los resultados obtenidos en el caso base sean conservadores en este sentido.

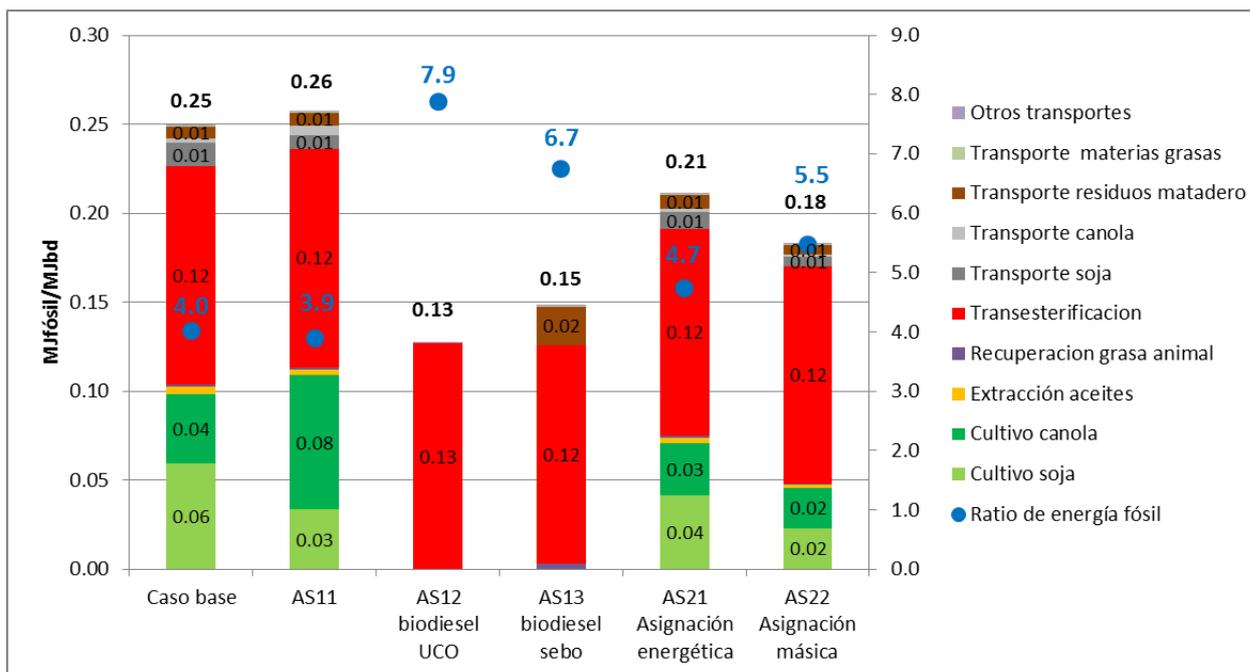


Figura 25. Consumo de energía fósil de la producción de biodiesel expresados en MJfósil/MJ biodiesel en los distintos escenarios analizados

Los balances de energía fósil de la producción de biodiesel en los escenarios analizados se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34. Ratio de energía fósil de la producción de biodiesel en los distintos escenarios analizados.

	Ratio de energía fósil
Biodiesel caso base	4.0
Biodiesel AS11	3.9
Biodiesel AS12 UCO	7.9
Biodiesel AS13 sebo vacuno	6.7
Biodiesel AS2 asignación energética	4.7
Biodiesel AS2 asignación másica	5.5

2 Áreas de mejora

Una de los aspectos destacables de la etapa de Interpretación en un Análisis de Ciclo de Vida, es la definición de las áreas de mejora. Estas áreas de mejora, están relacionadas con aquellos aspectos que al ser modificados en el proceso estudiado, permiten reducir o eliminar los impactos ambientales identificados en el análisis. A

continuación se van a proponer algunas opciones para reducir los impactos de los procesos analizados.

Etapa de producción agrícola de canola y soja

En la etapa de producción agrícola de canola y soja se han observado importantes diferencias en las entradas (inputs) del cultivo respecto de las consideradas para el cálculo del valor por defecto de la DER que explican las diferencias observadas en los resultados tal y como se puede observar en la Tabla 35.

Tabla 35. Comparación de entradas (Inputs) cultivo de canola y soja y valores por defecto (DER).

		Cultivo canola Uruguay	Valores por defecto DER canola	Cultivo soja Uruguay	Valores por defecto DER soja
Rendimiento	kg/ha	1300	3113	2200	2798
Diesel para labores	kg/ha	18.5	68.75	20.16	48.72
Fertilizante P₂O₅	kg/ha	55.2	28,2	48	66
Fertilizante nitrogenado	kg/ha	101.6	33.67	8.4	8
Fertilizante K₂O	kg/ha	48	74.0	72	62
Fitosanitarios	kg/ha	4	1.23	4.47	2.7
N₂O por fertilizantes	kg/ha	1.07	3.1	1.32	2.23
Semillas	kg/ha	3.8	6	70	-

En primer lugar destaca una menor productividad especialmente de canola por superficie sembrada, comparado con el escenario de referencia lo que estaría grabando todos los resultados expresados por kg de canola o por MJ final de biodiesel. También se observa, en el caso de la canola, un mayor consumo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados, así como fitosanitarios.

Los consumos de combustible en las labores, tanto en el caso de la canola como en el de la soja, son menores que los que se han considerado en la estimación de los valores por defecto.

Las emisiones de óxido nitroso estimadas en el caso de Uruguay, utilizando para ello la metodología propuesta por la CE (modelo GNOC <http://gnoc.irc.ec.europa.eu/>), son sensiblemente inferiores a las estimadas para el cálculo de los valores por defecto, aun con mayores niveles de fertilización. Estas diferencias se asocian a las diferencias en el método de estimación de estas emisiones.

Como medidas para reducir los impactos, se proponen las siguientes: **reducir la fertilización** nitrogenada al máximo posible así como el **optimizar el consumo de fitosanitarios**.

Etapa de extracción de aceites

En la etapa de extracción de aceites tanto de soja como de canola, las cantidades utilizadas de los distintos insumos son bastante similares a las consideradas en el cálculo de los valores por defecto (ver Tabla 36). Además, los resultados de emisiones de GEI de este son sensiblemente menores debido fundamentalmente al uso de leña como fuente energética. Los rendimientos de obtención tanto de aceite como de harina a partir de las semillas son ligeramente inferiores a los considerados en el cálculo de los valores por defecto por lo que existiría un margen de mejora en este aspecto. Por otro lado, si se analizan los resultados tanto de emisiones de GEI como de balances energéticos destacan los procesos de transporte de las semillas a las plantas de extracción.

Por tanto, se propone como medida para reducir los impactos la **optimización de los procesos de extracción** para aumentar el rendimiento en aceite y harinas así como la **optimización de los procesos de transporte de semillas** bien por la reducción de las distancias de transporte como por la utilización de vehículos más eficientes.

Tabla 36. Comparación de las entradas (Inputs) de la etapa de extracción de aceites de canola y soja y los valores por defecto (DER).

		Extracción aceite canola Uruguay	Valores por defecto DER canola	Extracción aceite soja Uruguay	Valores por defecto DER soja
Rendimiento aceite	MJ aceite/MJ semilla	0.553	0.613	0.281	0.344
Rendimiento harina	MJ harina/MJ semilla	0.354	0.387	0.621	0.656
Electricidad	MJ/MJ aceite	0.016	0.013	0.034	0.048
Hexano	MJ /MJ aceite	0.004	0.004	0.008	0.006
Combustible	MJ /MJ aceite	0.015	0.062	0.033	0.226

Etapa de recuperación de grasas animales

Los resultados obtenidos tanto en emisiones de GEI como en consumos de energía fósil de esta etapa muestran cómo los procesos de transporte dan lugar a la mayoría de los impactos. Por tanto, como en la etapa anterior, se propone como medida para reducir los impactos la **optimización de los procesos de transporte de residuos de matadero** bien por la reducción de las distancias de transporte como por la utilización de vehículos más eficientes.

Etapa de producción de biodiesel

En la etapa de producción de biodiesel no se han encontrado diferencias importantes en el consumo de los diferentes inputs (ver **Tabla 37**). El rendimiento en biodiesel es algo inferior por lo que existiría un margen de mejora en este aspecto.

Tabla 37. Comparación de las entradas (Inputs) de la etapa de transesterificación y los valores por defecto (DER).

		Transesterificación Uruguay	Valores por defecto DER
Rendimiento biodiesel	MJ bd/MJ aceite	0.977	0.994
Rendimiento glicerina	kg / t bd	180	106
Electricidad	MJ/MJ bd	0.006	0.006
Combustible	MJ /MJ bd	0.019	0.112
Metanol	MJ /MJ bd	0.053	0.082
Acido fosfórico	kg /MJ bd	4.03E-05	6.40E-05
Acido clorhídrico	kg /MJ bd	1.08E-06	7.53E-04
Catalizador	kg /MJ bd	6.45E-04	2.53E-04

SECCIÓN V. CONCLUSIONES

El presente estudio de Análisis de Ciclo de Vida recoge los efectos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero (huella de carbono) y el balance energético de la cadena de producción de biodiesel de la empresa ALUR.

Bajo las limitaciones y supuestos descritos a lo largo del estudio, la producción de biodiesel genera unas emisiones de gases de efecto invernadero de 25.29 gCO₂equiv/MJ biodiesel producido. Esto supone un ahorro de un 70% respecto del uso de un combustible fósil de referencia cuyas emisiones se estiman en 83,8 gCO₂equiv/MJ.

Este biocarburante por tanto, cumpliría los criterios de sostenibilidad especificados en la Directiva 28/2009 EC desde el punto de vista de ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, para desarrollar un cálculo riguroso de tales ahorros, sería necesario añadir las emisiones del transporte del biocarburante hasta Europa y seguir estrictamente la metodología propuesta en dicha Directiva, en especial en cuanto a los criterios de asignación.

El consumo de energía fósil en la producción de biodiesel, es de 0.25 MJ energía fósil/MJ biodiesel, lo que supone un ratio de energía fósil de 4. Es decir, se producen 4 MJ de energía en forma de biodiesel (medidos con su poder calorífico inferior) por cada MJ de energía fósil empleado en la cadena de producción.

Respecto al análisis de sensibilidad realizado, los resultados muestran una gran dependencia a cambios en las consideraciones metodológicas en cuanto al método de asignación (AS2). La selección del criterio de asignación económico en el caso base conduce a unos resultados que pueden por tanto considerarse conservadores. En cuanto a la variación de la mezcla de aceites usados (AS11), los resultados no varían sensiblemente salvo si se considera el caso de la producción de biodiesel a partir exclusivamente de aceites usados (AS12) o sebo vacuno (AS22) en cuyo caso los resultados mejoran de forma muy importante.

REFERENCIAS

1. Agri-footprint 2.0 – Part 1: Methodology and basic principles. September 2015
2. Agri-footprint 2.0 – Part 2: Description of data. September 2015
3. Brentrup et al. 2001. F. Brentrup, J. Küsters, H. Kuhlmann, J. Lammel. Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilisers. Eur J Agron, 14 (3) (2001), pp. 221–233
4. BioGrace - List of Additional Standard Values. Version 4 – Public. April 2011
5. BUWAL 2012. BUWAL 250 LibraryTM. Ökoinventare für Verpackungen. Schriftenreihe Umwelt Nr 250 Part 1 and 2. Second edition 2012.
6. CE 1998b. DIRECTIVA 98/70/CE DIRECTIVA 98/70/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de octubre de 1998 relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo y por la que se modifica la Directiva 93/12/CEE del Consejo Económico Europeo
7. CE 2009a. DIRECTIVA 2009/28/CE DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE. Diario Oficial de la Unión Europea.
8. CE 2009b. DIRECTIVA 2009/30/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 98/70/CE en relación con las especificaciones de la gasolina, el diésel y el gasóleo, se introduce un mecanismo para controlar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, se modifica la Directiva 1999/32/CE del Consejo en relación con las especificaciones del combustible utilizado por los buques de navegación interior y se deroga la Directiva 93/12/CEE
9. CE, 1998a. DIRECTIVA 98/69/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de

- motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo Económico Europeo
10. CE, 2012. COM(2012) 595 final Propuesta de DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por la que se modifican la Directiva 98/70/CE, relativa a la calidad de la gasolina y el gasóleo, y la Directiva 2009/28/CE, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables
 11. EC, 2012. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. February 2012. EUR 25167. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2012.
 12. Evaluación medioambiental de la mejora de la calidad de los combustibles para el transporte. Ministerio de Medio Ambiente.
 13. Fox, D. J. 2012. Industrias aceiteras procesadoras del grano de soja en la República Argentina [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/industrias-aceiteras-procesadoras-grano-soja.pdf> [Fecha de consulta: 5 de febrero de 2016]
 14. Frischknecht et al, 2004. Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Humbert S., Margni M., Nemecek T. and Spielmann M. (2004) Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Ecoinvent report No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2004.
 15. Frischknecht. R, et al. Frischknecht R., Jungbluth N., et.al. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent 2000, Swiss Centre for LCI. Dübendorf, CH, www.ecoinvent.ch. 2003.
- FTS, 2011. Transporte sostenible para américa latina: situación actual y perspectivas. Documento de respaldo foro de transporte sostenible (FTS) de américa latina. Junio

16. Garraín D., Herrera I., Lago C., Lechón Y. y Sáez R. Análisis de ciclo de vida de biocarburantes de aceite vegetal hidrotratado. Colección Documentos CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-663-9, 2011
17. Garrain D. Herrera I., Lago C., Lechón Y., Sáez R. Viabilidad medioambiental del co-procesamiento de aceites vegetales en unidades de hidrotratamiento para obtener biocarburantes mediante ACV. XIV INTERNATIONAL CONGRESS ON PROJECT ENGINEERING. Madrid Junio de 2010
18. Gil et al, 2013. Gil, M. P., Moya, A. M. C., & Domínguez, E. R. (2013). Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, 41, 222-231.
19. Gravalos I., Gialamas T., Koutsofitis Z., Kateris D., Tsiropoulos Z., Xyradakis P., Georgiades T. Energetic Study on Animal Fats and Vegetable Oils Using Combustion Bomb Calorimeter. *Journal of Agricultural Machinery Science*. 2008, 4 (1), 69 - 74
20. Herrera et al, 2012. Herrera, I; Lechón, Y; Lago, C; Sáenz R. "Actualización de los Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte: Bioetanol y Biodiesel" Informe Técnico. CIEMAT. Madrid. Noviembre 2012
21. Herrera et al, 2011. Herrera, I., Lago, C., Lechón, Y., Sáez, R. ACV de cultivos energéticos en España, como fuente de biomasa para calor y electricidad. Colección Documentos CIEMAT, ISBN: 978-84-7834-656-1, 2011, Madrid (Spain).
22. Houghton et al, 1990. Houghton, J.T., G.T. Jenkins and J.J. Ephraums. (eds.). 1990. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge.
23. ARPEL ICA, 2009. *Manual de Biocombustibles*. ISBN13: 978-92-9248-121-6. 2009
24. ILCD Handbook, 2010. ILCD, 2010. European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps*. First edition March 2010. EUR 24378 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union.

25. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
26. ISO 2006a, ISO 14040. 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.
27. ISO 2006b ISO 14044. 2006. Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.
28. Kiatkittipong et al, 2009. W. Kiatkittipong, P. Wongsuchoto, P. Pavasant Life cycle assessment of bagasse waste management options. Waste Management, 29 (2009), pp. 1628–1633
29. Köble, R, 2014. Köble, R .The Global Nitrous Oxide Calculator – GNOC – Online Tool Manual. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport.
30. Lechón et al, 2005. Y. LECHÓN; H. CABAL; C. LAGO; CRISTINA DE LA RÚA; R. SÁEZ; M. FERNANDEZ. Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase I. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina. Energía y Cambio Climático. pp. 1 - 120. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2005. ISBN 84-8320-312-X
31. Lechón et al, 2006. Y. LECHÓN; H. CABAL; C. LAGO; CRISTINA DE LA RÚA; L. IZQUIERDO; R. SÁEZ; M. FERNÁNDEZ. Análisis del Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo del Biodiésel del Diésel. Energía y Cambio Climático. pp. 1 - 139. Centro de Publicaciones Secretaria General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2006. ISBN 84-8320-376-6
32. Lechón et al, 2011. Lechón, Y., Herrera, I., Lago, C. Sánchez, J., Romero, L. Evaluación del balance de gases de efecto invernadero en la producción de biocarburantes. Documento de apoyo al estudio técnico PER 2011-2020. Instituto de diversificación y ahorro energético. 2011, Madrid (Spain).

33. Ley Nº 18.195, 2007. Ley Nº 18.195. AGROCOMBUSTIBLES SE REGULA SU FOMENTO Y REGULARIZACIÓN DE SU PRODUCCIÓN, COMERCIALIZACIÓN Y UTILIZACIÓN D.O. 28 nov/007 - Nº 27373. 2007
34. Murrú et al, 2012. A. Murrú; E. Hermin; F. Kuster. Estrategias de reconversión del sector azucarero en Uruguay: energías alternativas.
35. Nemececk et al, 2007. Nemececk, T. & Kagi, T. Life cycle inventories of Swiss and European Agriculture production Systems. Final Report. Ecoinvent V2.0 No 15a. Agroscope Reckenholz-Taenikon Research Station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Zurich and Dübendorf, CH. 2007. (Actualizado a 2012)
36. Perroni, 2013. Perroni A. Energía Sustentable para todos. Análisis rápido de situación e identificación de brechas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUMA). Uruguay 2013
37. PNUMA 2012. GEO-5. Quinto reporte de evaluación Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. 2012
38. RFA, 2008. RFA – Renewable Fuels Association. Annual Industry Outlook 2008. Renewable Fuels Association, 2008. <http://www.ethanolrfa.org>.
SNRCC, 2010. Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático y la Variabilidad. Plan nacional de respuesta al cambio climático, 2010. Diagnóstico y lineamientos estratégicos 2012
39. Rivera I, Villanueva G, Sandoval G. Producción de biodiesel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. GRASAS Y ACEITES, 60 (5), OCTUBRE-DICIEMBRE, 468-474, 2009, ISSN: 0017-3495 DOI: 10.3989/gya.021409.
40. VIVAS CASTAÑO, A.M. Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino. Trabajo de grado para optar el título de Químico Industrial. Universidad tecnológica de Pereira. Facultad de tecnología. Escuela de química programa de química industrial. Pereira, Risaralda, Colombia 2010

Links

<http://www.pre.nl/simapro>

www.ecoinven.ch

http://www.eumed.net/libros-gratis/2011f/1120/analisis_ciclo_de_vida_cuba.html

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372013000100009&script=sci_arttext)

[12372013000100009&script=sci_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-12372013000100009&script=sci_arttext)

<http://www.monografias.com/trabajos12/mnagraz/mnagraz.shtml>

<http://www.agri-footprint.com/about/>

<http://www.ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/BUWAL>

<http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/>