



**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Tesis de Maestría en Ingeniería de la Energía**

**ANALISIS DE CICLO DE VIDA DEL BIOETANOL COMBUSTIBLE PRODUCIDO A  
PARTIR DE SORGO GRANO: BALANCE DE ENERGÍA Y EMISIÓN DE GASES DE  
EFECTO INVERNADERO.**

**Nombre de proyecto ante SCAPA-E:** Balance de Energía y Análisis de Ciclo de Vida de la  
producción de bioetanol a partir de sorgo grano.

Estudiante: María Pía Olave

Tutores: Claudia Lareo y Daniel Ferrari

Montevideo, Uruguay

Noviembre 2015

## Agradecimientos

Quisiera agradecer a los investigadores del instituto CIEMAT; Yolanda Lechón e Israel Herrera, quienes estuvieron muy dispuestos a lo largo de gran parte de este trabajo. Agradecer a los técnicos de ALUR; Darío Rodríguez, Fabiana Chialanza, Pedro Stagno, Ignacio Crosa, Walter Bisio, Juan Silveira, a técnicos del sector forestal Juan Manuel Algorta y Marcos Mendiondo, y a Daniel Vásquez del INIA. A todos ellos por el asesoramiento y entrega de información brindados para la realización de este estudio.

Un agradecimiento a la Facultad de Ingeniería por haberme dado la oportunidad de realizar esta maestría, y por otorgarme la posibilidad de tomar un curso de relevancia para la realización de este estudio. Este apoyo se realizó en el marco de un convenio existente entre Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República y ANCAP.

La investigación que da origen a los resultados presentados en la presente publicación recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS\_NAC\_2011\_1\_3651. Muchas gracias a esta institución por tan importante apoyo.

También quisiera agradecer en forma especial a Daniel y a Claudia, tutores de esta tesis, por quienes me sentí acompañada y guiada desde el comienzo de este trabajo, de manera profesional, generosa y constructiva.

Muchas gracias también a todo el equipo de investigadores del Departamento de Bioingeniería, quienes también fueron un soporte técnico y humano para la realización del estudio.

El mayor agradecimiento quisiera hacerlo a mi familia y amigos, quienes me escucharon en muchas oportunidades hablar sobre este trabajo, y fundamentalmente a mis hijos Lorenzo y Violeta y a mi pareja Joaquín, quienes tuvieron una dedicación y paciencia infinita para acompañarme en mis deseos.

Gracias a mis padres por el ejemplo y por la voluntad que me han ayudado a desarrollar.

## Índice

<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>7</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
1.1. Demanda y fuentes de energía.....	9
1.2. Calentamiento global.....	15
1.3. Desarrollo sostenible.....	21
1.3.1. <i>Bioenergía y sostenibilidad</i> .....	22
1.3.2. <i>Bioetanol y su dimensión ambiental</i> .....	24
1.4. Análisis de ciclo de vida.....	26
1.4.1. <i>Herramientas de cálculo para ACV y simulación de procesos productivos</i> .....	32
1.5. Producción de bioetanol.....	34
1.5.1. <i>Producción mundial de bioetanol</i> .....	34
1.5.2. <i>Materias primas y tecnologías de producción</i> .....	36
1.6. Bioetanol en Uruguay.....	38
1.7. Características del sorgo grano.....	39
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>43</b>
2.1. Objetivo general.....	43
2.2. Objetivo específico.....	43
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>44</b>
3.1. Base conceptual del proceso estudiado.....	44
3.2. Descripción del proceso productivo.....	44
3.2.1. <i>Fase agrícola</i> .....	44
3.2.2. <i>Fase industrial</i> .....	46
3.3. Análisis de ciclo de vida.....	47
3.3.1. <i>Definición de objetivos y alcance</i> .....	48
3.3.2. <i>Análisis de inventario (SimaPro)</i> .....	50
3.3.3. <i>Modelización e hipótesis realizadas</i> .....	50
3.3.4. <i>Evaluación de Impacto (Sima Pro)</i> .....	56
3.3.5. <i>Interpretación de los resultados</i> .....	57
3.4. Análisis del proceso industrial.....	57
3.4.1. <i>Descripción del proceso simulado</i> .....	58
3.4.2. <i>Análisis de sensibilidad de parámetros industriales</i> .....	71
3.5. Estudio de sensibilidad global.....	72
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>74</b>
4.1. ACV para el uso de energía.....	74
4.2. Análisis del proceso industrial.....	78
4.3. ACV para la emisión de GEI.....	84
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	<b>91</b>
<b>6. CONSIDERACIONES FINALES</b> .....	<b>93</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>94</b>

## Lista de acrónimos y abreviaturas

Acrónimos / abreviaturas	Descripción
<b>ACV</b>	Análisis de Ciclo de Vida
<b>ALUR</b>	Alcoholes del Uruguay S.A.
<b>AMG</b>	Amiloglucosidasa
<b>ANCAP</b>	Administración Nacional de Combustibles, Alcohol y Portland
<b>ATP</b>	Adenosintrifosfato
<b>BD</b>	Base de datos
<b>CED</b>	Cumulative Energy Demand
<b>CER</b>	Certificados de Energía Renovable
<b>CIEMAT</b>	Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
<b>DDGS</b>	Distiller Dried Grain with Solubles
<b>DIEA</b>	Oficina de Estadísticas Agropecuarias del MGAP
<b>DNE</b>	Dirección Nacional de Energía
<b>ECPA</b>	Energy and Climate Partnership of the Americas
<b>EICV</b>	Evaluación de impacto de ciclo de vida
<b>EJ</b>	Exajoules (ver lista de unidades)
<b>EROI</b>	Energy returned on energy invested
<b>E10</b>	Gasolina con 10% de etanol
<b>E85</b>	Gasolina con 85% de etanol
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>FDA</b>	Fibra digestible ácida
<b>FDN</b>	Fibra digestible neutra
<b>GBEP</b>	Asociación Mundial de la Bioenergía
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>GNOC</b>	Global Nitrous Oxide Calculator
<b>GWP</b>	Global warming potential
<b>HMF</b>	Hidroximetilfurfural
<b>IEA</b>	International Energy Agency
<b>ICV</b>	Inventario de ciclo de vida
<b>ILCD</b>	International Reference Life Cycle Data System
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>MGAP</b>	Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca
<b>MIEM</b>	Ministerio de Industria Energía y Minería
<b>Mtoe</b>	Million tonnes of oil equivalent
<b>NAMA</b>	Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación
<b>OMM</b>	Organización Mundial de Meteorología
<b>PNUMA</b>	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente
<b>REN21</b>	Renewable Energy Policy Network for the 21 <sup>st</sup> Century
<b>RFA</b>	Renewable Fuels Association
<b>SSF</b>	Sacarificación y fermentación simultáneas
<b>SHD</b>	Social Hotspot Database
<b>UE</b>	Unión Europea

<b>UNEP</b>	United Nations Environment Programme
<b>UTE</b>	Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas
<b>UNFCCC</b>	United Nations Framework Convention on Climate Change
<b>WCED</b>	Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo
<b>WMO</b>	World Meteorological Organization

## Lista de unidades

<b>Unidades fundamentales en el sistema internacional (SI)</b>			
<b>Magnitud física</b>	<b>Unidad</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Expresado en unidades fundamentales de SI</b>
Longitud	Metro	m	
Masa	Kilogramo	kg	
	Giga gramo	Gg	$g \cdot 10^9$
Tiempo	Segundo	s	
Corriente eléctrica	Amperio	A	
Temperatura	Kelvin	K	
Cantidad sustancia	Mol	mol	
<b>Unidades derivadas</b>			
<b>Magnitud física</b>	<b>Unidad</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Expresado en unidades fundamentales de SI</b>
Superficie	Metro cuadrado	$m^2$	
Volumen	metro cúbico	$m^3$	
Densidad	kilogramo por metro cúbico	$kg/m^3$	
Velocidad	metro por segundo	m/s	
Fuerza	Newton	N	$kg \cdot m/s^2$
Presión	Pascal	Pa	$N/m^2$
Trabajo, Energía	Julio	J	N.m
	Exajulio	EJ	$J \cdot 10^{18}$
	Kilo tonelada de petróleo equivalente	ktep	
Potencia	Vatio	W	J/s

## Resumen ejecutivo

En el Uruguay la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es predominante en el abastecimiento de la demanda del sector de transporte, siendo responsable en el año 2013, de casi el 50% del total de las emisiones. El sector transporte se abastece casi exclusivamente de los combustibles fósiles y en el año 2013 este sector representó el 30 % de la energía total consumida en el Uruguay, segundo en orden de consumo, luego del sector Industrial.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica que permite cuantificar el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida. Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener resultados que muestren sus impactos ambientales.

Se realizó el ACV del bioetanol combustible de sorgo grano producido bajo las condiciones agroindustriales existentes en Paysandú, Uruguay, para el uso de energía y emisión de GEI, desde la “cuna al tanque”. Se utilizó el software Sima Pro versión 8.03.14, seleccionado por su facilidad de manejo, su amplio contenido de bases de datos y experiencia de uso en muchos trabajos de ACV.

En el ACV se observó que la relación entre la energía fósil consumida durante todo el proceso y la energía obtenida al final del proceso (EROI) es de 2,5, lo que implica un balance de energía favorable. El balance de energía da un saldo positivo de 13,5 GJ/m<sup>3</sup> de etanol.

La contribución del consumo de energía durante el proceso es significativamente mayor en la fase agrícola, representando el 60% del total. En esta fase, el mayor consumo de energía fósil es debido a la fabricación y aplicación de fertilizantes al suelo.

Las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas se estiman en 2249,5 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de etanol producido, lo que equivale a una reducción 75,2% respecto al uso de un combustible fósil de referencia sustituido (gasolina).

Se realizó análisis de sensibilidad de los siguientes factores: rendimiento de cultivo, tasa de uso de fertilizante durante la fase agrícola y matriz de energía eléctrica que abastece al proceso industrial. El factor que mostró el mayor impacto fue el cambio en la matriz de generación de energía eléctrica con mayor participación de fuentes renovables, alcanzando un valor de EROI de 3,2.

Para el análisis del consumo de energía de la fase industrial, se utilizó la herramienta informática Super Pro Designer®, Intelligen Inc. versión 8.0, de simulación de procesos industriales. Se evaluó el consumo de energía por etapa y se analizó el impacto de los siguientes factores: contenido de almidón en el grano, relación sólido-líquido en la etapa de fermentación y sacarificación simultáneas y la eficiencia de la fermentación.

El principal consumo de energía de la fase industrial se observó en la recuperación de etanol por destilación. Ese consumo fue mayor cuando menor es la concentración de etanol alcanzada. El estudio de sensibilidad mostró un fuerte impacto de la relación sólido-líquido utilizada. El estudio de sensibilidad también mostró que un aumento en el contenido de almidón de los granos y de la eficiencia de fermentación reducen el consumo de energía favorablemente.

Las principales oportunidades de mejora en la fase agrícola deberían de estar orientadas a la reducción en el uso de fertilizantes sintéticos, menor consumo de combustibles y mayor

uso de fuentes renovables en la fase agrícola y la producción cultivos de alto rendimiento agrícola y contenido de almidón.

Las principales oportunidades de mejora en la fase industrial deberían de estar orientadas a una mayor eficiencia energética en la recuperación de etanol y en el uso de enzimas y levaduras aptas para la transformación de suspensiones de alta relación sólido-líquido.

*Palabras clave: bioetanol, biocombustibles, energía, análisis de ciclo de vida, gases de efecto invernadero, desarrollo sostenible.*

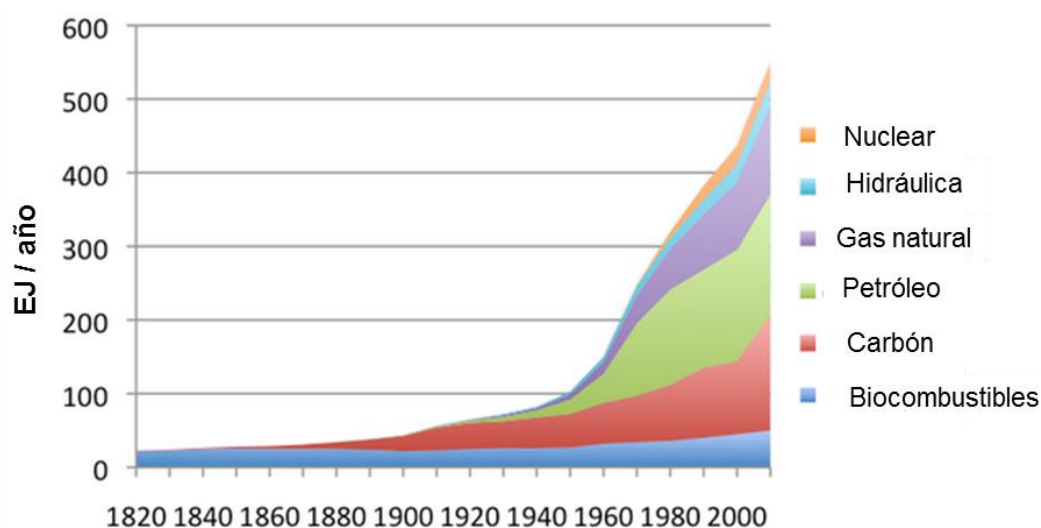


## 1. Introducción

El sector del transporte es una actividad fundamental y de relevancia en la sociedad actual. El transporte tiene importante participación en la economía global; en el sector industrial, comercial, turismo y residencial. El desarrollo de los biocombustibles, hoy forma parte de la búsqueda de soluciones a la problemática ambiental generada por las emisiones de gases de efecto invernadero, por el uso de combustibles fósiles.

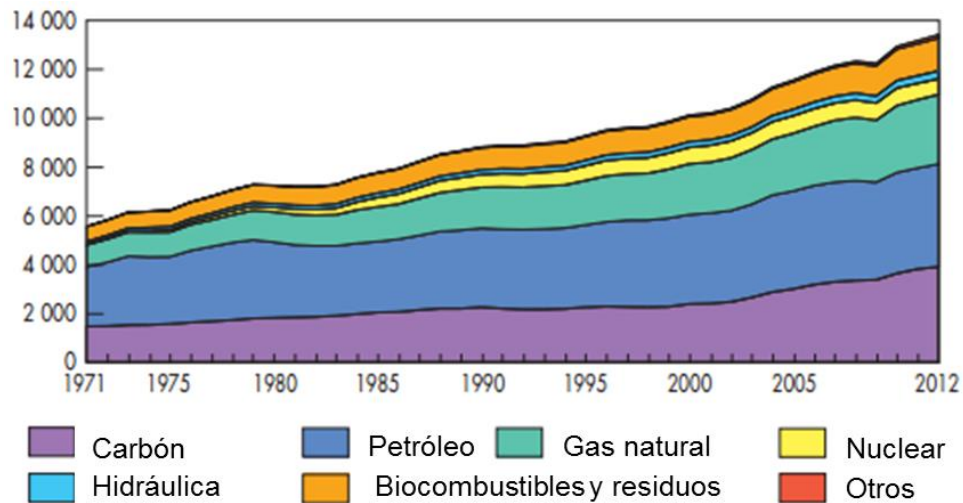
### 1.1. Demanda y fuentes de energía

La demanda de energía tuvo un incremento significativo en los dos últimos siglos, con alta participación de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) como fuente de energía (Figura 1.1).



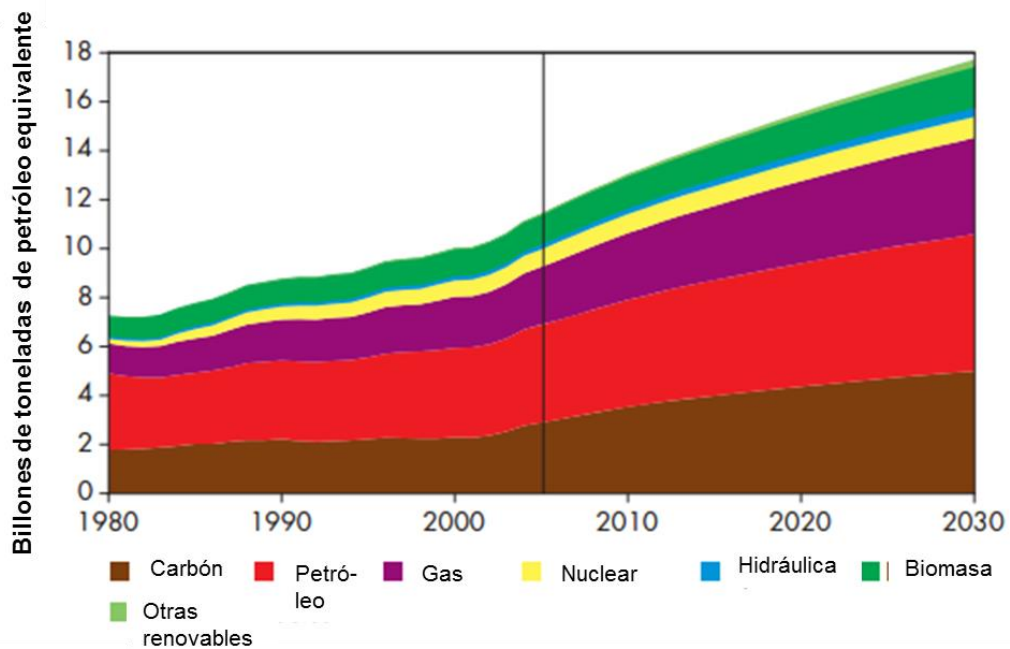
**Figura 1.1:** Evolución histórica de la demanda de energía primaria entre el 1800 y el 2000 (Adaptado de: BP, 2004).

En la Figura 1.2 se pueden observar las fuentes de energía que abastecieron la demanda mundial en el período entre 1971 y 2012, verificando lo anteriormente mencionado. El crecimiento sostenido del consumo de energía, comienza a partir del año 1850, con la revolución industrial y se acentúa a partir del 1945, luego de la segunda guerra mundial, llegando a valores de consumo de energía 10 veces mayor. Durante el siglo XXI, las fuentes de energía para abastecer esta demanda están constituidas en más del 80 % por combustibles fósiles, como carbón, gas natural y petróleo.



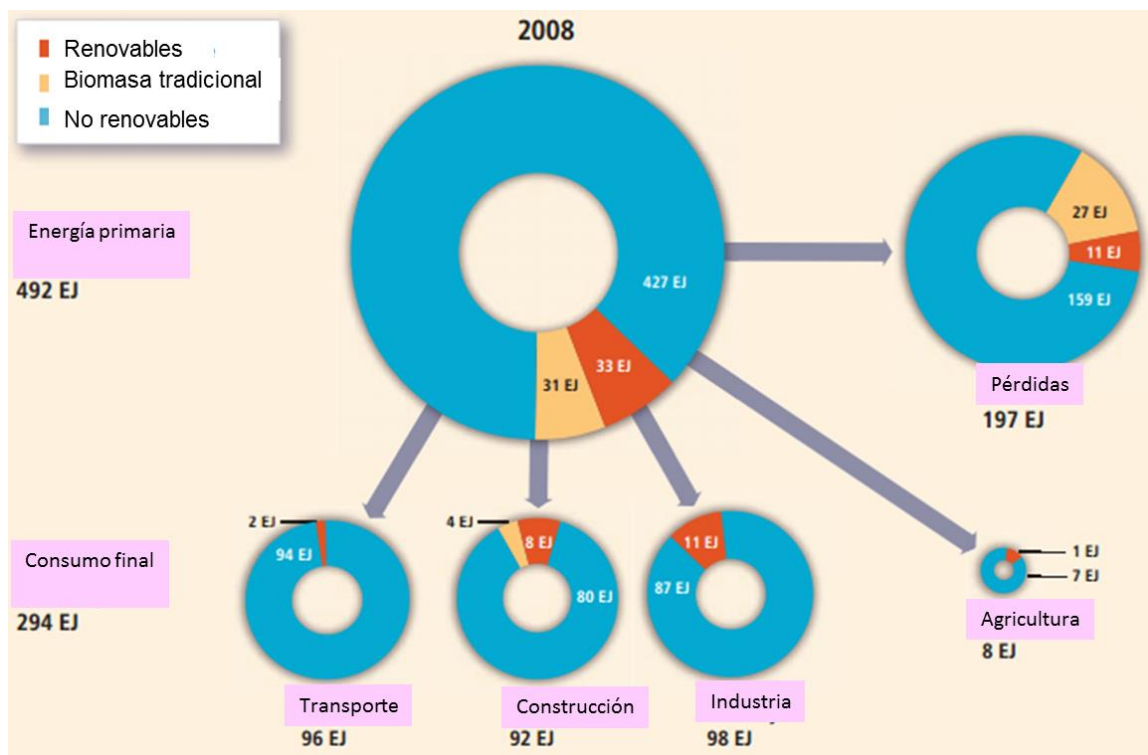
**Figura 1.2:** Evolución de la demanda y abastecimiento de la energía primaria de 1971 a 2012 (Mtoe) (Adaptado de: IEA, 2013)

En el año 2007, las proyecciones de evolución de la demanda de energía primaria, considerando el escenario actual (políticas actuales) previeron un crecimiento sostenido a largo plazo, fundamentalmente de las fuentes de energía fósil (Figura 1.3).



**Figura 1.3:** Proyecciones de evolución de la demanda de energía primaria mundial al 2030 (Adaptado de WEO, 2007).

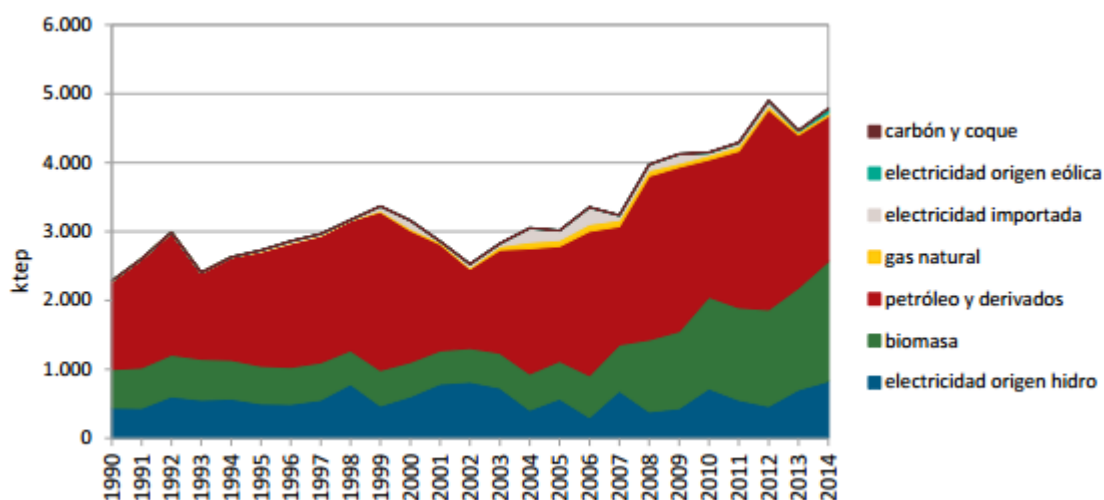
En el año 2008, el 85% de las fuentes de energía que abastecen el suministro mundial de energía primaria, corresponde a fuentes fósiles (IPCC Report, 2011). En la Figura 1.4 se presenta los sectores responsables del consumo de energía fósil en el año 2008.



**Figura 1.4:** Consumo final energético mundial por fuente sector (Adaptado de: IPCC, 2012)

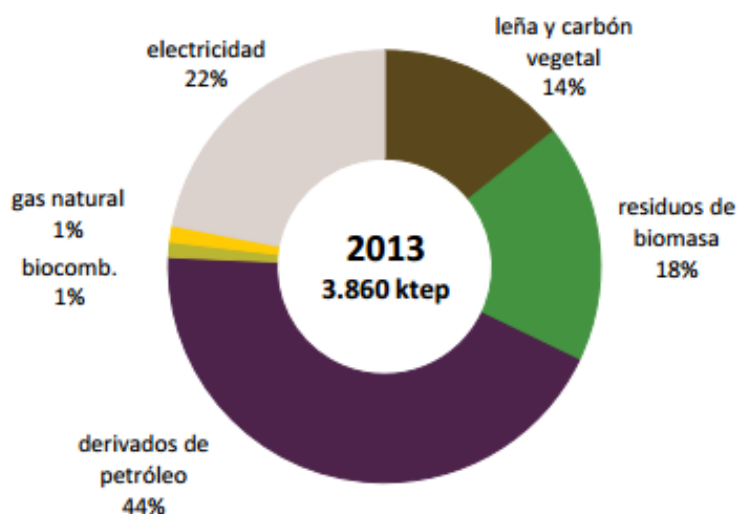
Tal como se observa en la Figura 1.4, a nivel mundial en el año 2008 el transporte es el sector que consume la mayor cantidad de combustibles fósiles, seguidos por la industria y la construcción.

Históricamente en el Uruguay los combustibles fósiles representaron más de un 50% de la matriz de energía primaria. En la Figura 1.5 se observa la evolución de la matriz de abastecimiento de energía por fuente en el Uruguay, entre los años 1990 y 2014. Esta figura permite observar la fuerte dependencia de los derivados del petróleo para el abastecimiento de energía en el Uruguay.



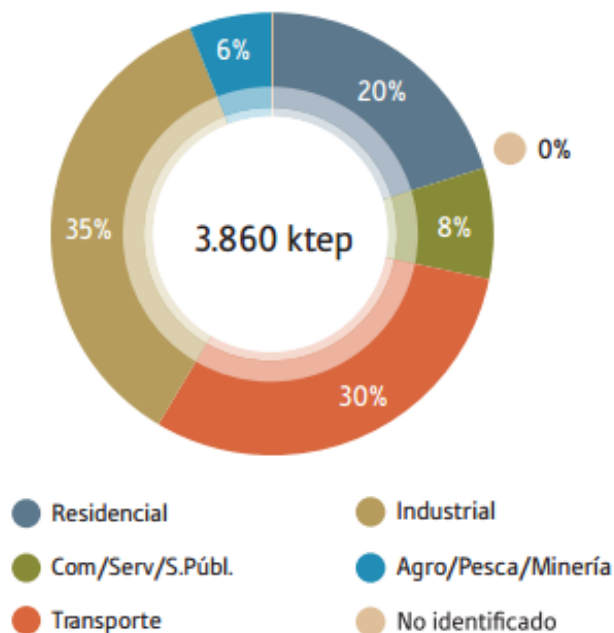
**Figura 1.5:** Evolución de abastecimiento de energía por fuente en el Uruguay. (Fuente: DNE, Balance 2014).

La Figura 1.6 presenta el consumo final energético por fuente en el año 2013 en el Uruguay.



**Figura 1.6:** Consumo final energético por fuente en el Uruguay (Fuente DNE, Balance 2013)

Analizando el consumo por sector, en el año 2013, el transporte representó el 30 % de la energía total consumida en el Uruguay, segundo en orden de consumo, luego del sector Industrial. Estas apreciaciones se observan en la siguiente Figura 1.7 y Tabla 1.1.



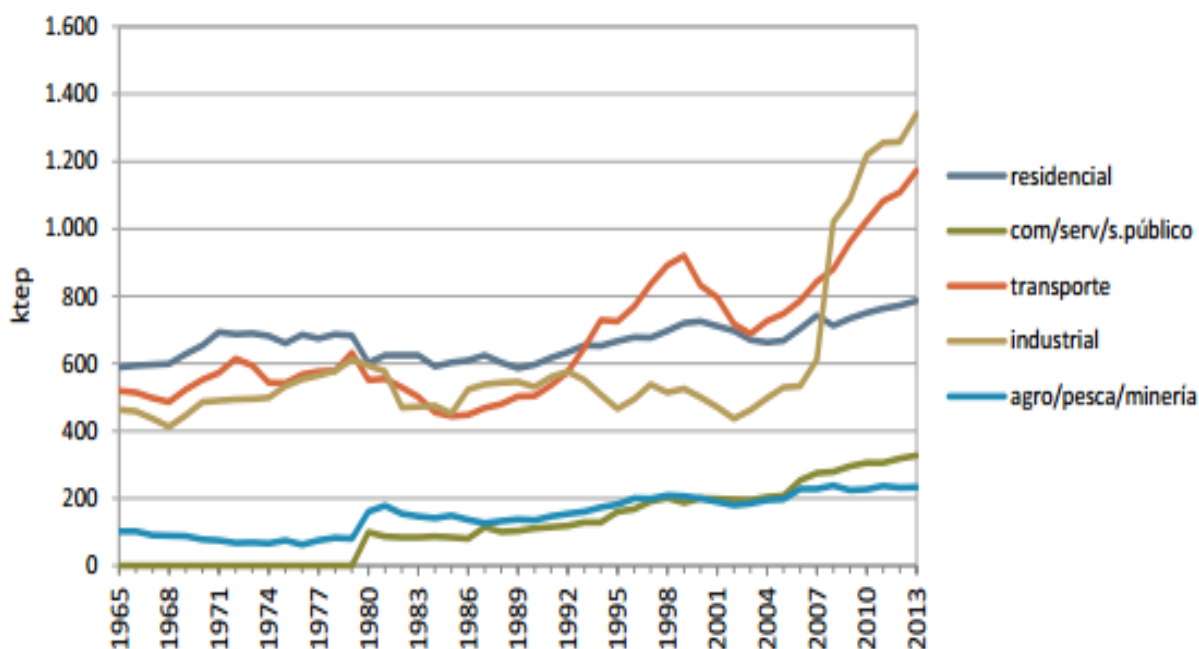
**Figura 1.7:** Estructura de consumo por sector. Fuente: DNE Balance de Energía, 2013

**Tabla 1.1:** Energía consumida por sector (ktep)

Sector	Energía consumida (ktep)
Residencial	787
Comercial/servicios	327
Transporte	1173
Industrial	1341
Agro/pesca	233
<b>TOTAL</b>	<b>3861</b>

Fuente: DNE Balance Energía, 2013.

La evolución de la demanda de energía por sector muestra un crecimiento sostenido en todos los sectores de consumo, y un crecimiento acentuado en el sector industrial y transporte, como se muestra en la Figura 1.8.



**Figura 1.8:** Evolución del consumo final energético por sector. Fuente DNE, Balance de Energía 2013.

El transporte se abastece casi exclusivamente de derivados del petróleo. La Figura 1.9 presenta el uso de los diferentes energéticos, y en particular el de los combustibles fósiles importados en Uruguay en el año 2013. El uso de biocombustibles en 2013 fue de casi el 1 %.

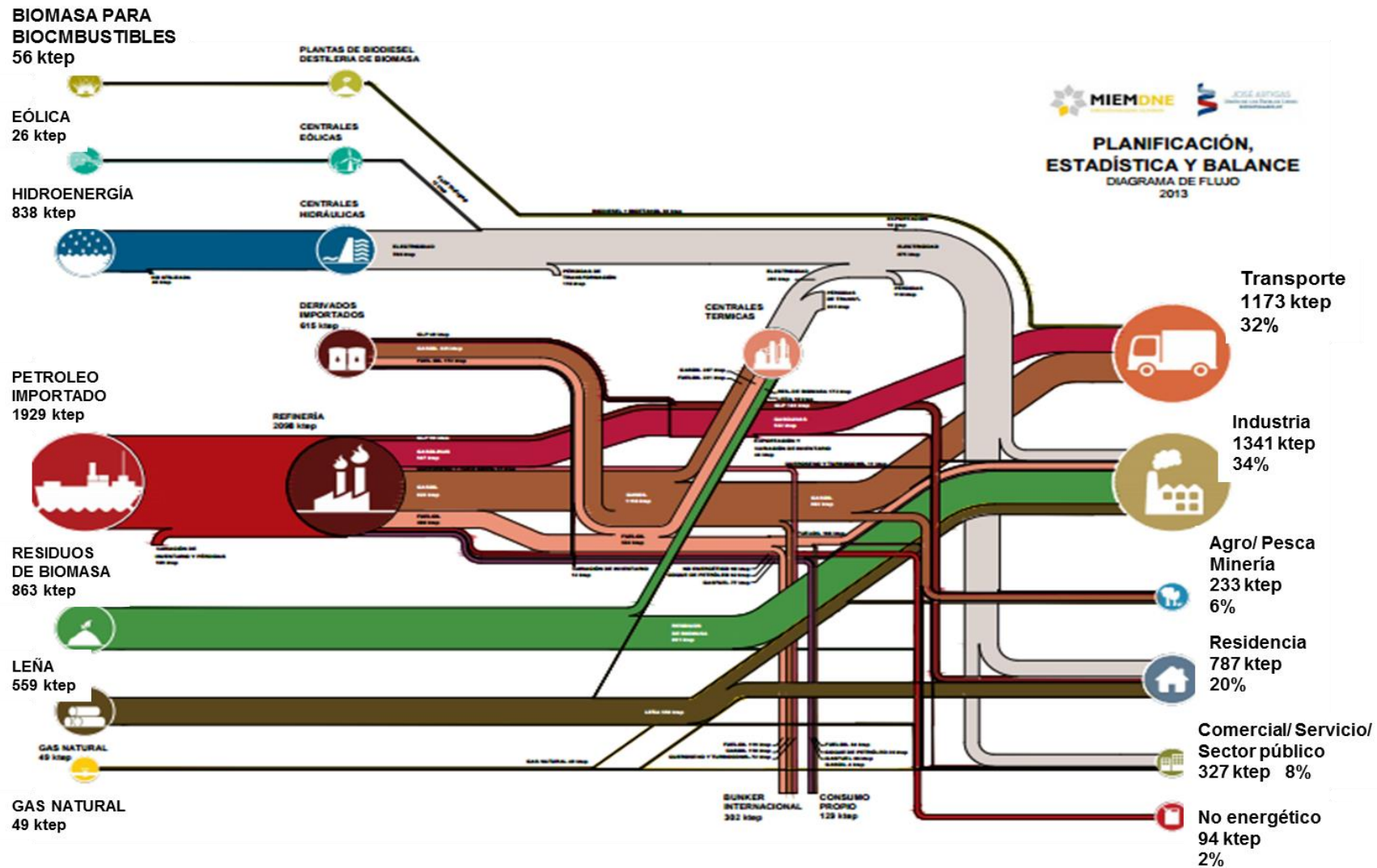


Figura 1.9: Diagrama de flujo de energía en Uruguay, año 2013. Adaptado de: DNE Balance 2013.

## 1.2. Calentamiento global

Calentamiento global es el nombre que se le da al fenómeno del aumento de temperatura media global de la atmósfera terrestre y de los océanos. Para comprender el calentamiento global, es necesario comprender el efecto invernadero y los gases de efecto invernadero.

El efecto invernadero es un fenómeno atmosférico natural que permite mantener la temperatura del planeta, al retener parte de la energía proveniente del sol. En la Figura 1.10, se presenta un esquema del efecto invernadero, donde se observa que los rayos solares inciden sobre la tierra, y parte de estos son emitidos nuevamente al espacio al ser reflejados por las nubes que se encuentran en la atmósfera y la otra parte llega a la superficie terrestre y océanos, que absorben la radiación y aumentan su temperatura. Luego estos vuelven a emitir bajo la forma de ondas térmicas largas (rayos infrarrojos) parte de la radiación recibida. Estos rayos infrarrojos reflejados por la superficie son absorbidos por gases que se encuentran en la atmósfera. Parte de estos rayos son reemitidos a la tierra, provocando la estabilidad de la temperatura en la tierra. Estos gases toman el nombre de gases de efecto invernadero (GEI).



**Figura 1.10:** Esquema del efecto invernadero. Fuente: *The carbon funds, efecto invernadero*

La Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), en su artículo 1 establece la siguiente definición para los GEI: "Por gases de efecto invernadero se entiende aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos (de origen humano), que absorben y reemiten radiación infrarroja".

Los gases de efecto invernadero naturales son:

- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O)

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Ozono (O<sub>3</sub>)

Los gases de efecto invernadero generados por las actividades del hombre son, entre otros:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Perfluorometano (CF<sub>4</sub>) y perfluoroetano (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>)
- Hidrofluorocarbonos
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)
- Clorofluorocarbonos

Las actividades humanas que generan mayor acumulación de GEI a la atmósfera son:

- Uso de combustibles fósiles (CO<sub>2</sub>)
- Uso de fertilizantes (N<sub>2</sub>O)
- Ganadería (CH<sub>4</sub>)
- Deforestación permanente
- Producción de cemento (CO<sub>2</sub>)
- Uso y producción de aerosoles, disolventes de limpieza y refrigerantes (CFC)

Estos gases tienen diferentes capacidades de retención de calor, llamado Potencial de Calentamiento Global (GWP por sus siglas en inglés). Este se calcula a partir del forzamiento radiativo acumulado en un horizonte temporal determinado. En el informe de IPCC 2013 pueden consultarse los valores actualizados. En la Tabla 1.2 se presentan valores de estos potenciales según la metodología de evaluación de impacto ambiental IPCC 2013.



**Tabla 1.2:** Potenciales de calentamiento global a 100 años

Gas	Fórmula química	Potencial de calentamiento global horizonte temporal
		IPCC GWP 100 años
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	28
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	265
Hidrofluorocarbonados	CFCS	124-14800
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	23507

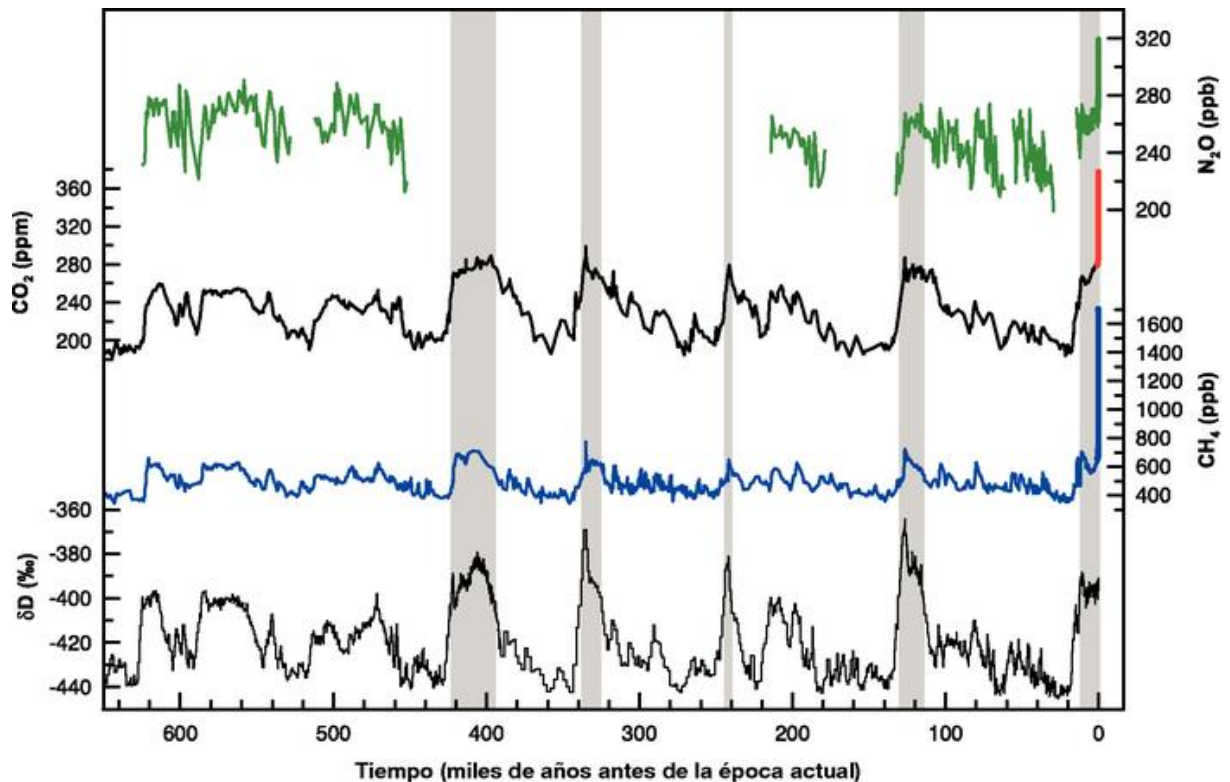
*Fuente: Metodología calentamiento global IPCC 2013.*

El efecto invernadero es necesario y conveniente para conseguir temperaturas adecuadas para conservar la vida en la tierra. El clima terrestre depende, precisamente, del balance energético entre la radiación solar y la radiación emitida por la tierra. Los gases de efecto invernadero son claves en este proceso. Pero el aumento de la concentración de los GEI en el último período, es una de las causas probables del aumento de la temperatura media global observado en el período 1910-1995.

El calentamiento global es un tema debatido y de prioridad en muchos países del mundo y se podría entender una consecuencia del desarrollo insostenible de productos, para el abastecimiento de necesidades humanas. Estudios realizados en torno a este tema, permiten verificar la relación entre el crecimiento demográfico y el calentamiento global (Bongaarts *et al.*, 1992), la relación entre la producción de cultivos y el calentamiento de la tierra (Bennetzen *et al.*, 2012), o la relación entre el consumo de energía y el calentamiento global (Khan *et al.*, 2014).

El aumento de temperatura media global de la tierra y de los océanos causa entre otros efectos, el deshielo de glaciares, provocando un aumento del nivel del mar y una disminución de la superficie de tierra. Estos efectos pueden resultar en la necesidad de evacuación de habitantes que viven de las costas de los continentes, la pérdida de superficie para la producción de alimentos, desequilibrio del ecosistema, entre otros, cualquiera de estos indeseables para la sostenibilidad de la vida en la tierra.

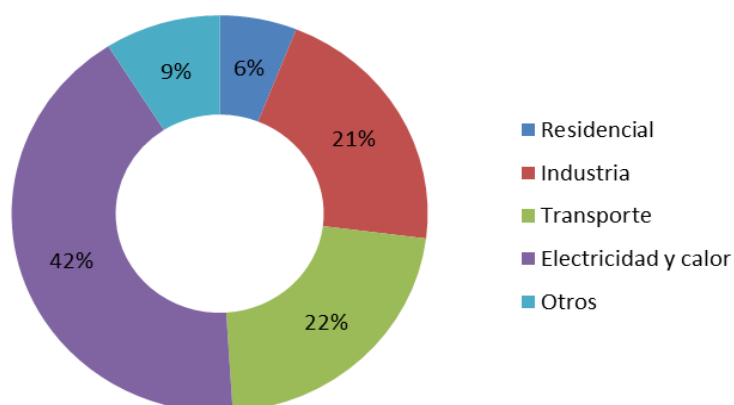
La revolución industrial acompañada del crecimiento demográfico y del cambio del estilo de vida de la población por el significativo incremento del consumo de bienes y servicios, resultan en un aumento significativo de la emisión y concentración de los GEI en la atmósfera. Algunos investigadores y científicos, como por ejemplo el físico australiano Fred Singer, afirman que este aumento de temperatura en la tierra se debe a ciclos normales del planeta. Sin embargo, existen estudios que evalúan que el aumento posindustrial de estos gases no proviene de mecanismos naturales (Holdgate *et al.*, 1989).



**Figura 1.11:** Evolución de la concentración de  $CH_4$ ,  $N_2O$  y  $CO_2$  en los últimos 600 mil años (IPCC Report, 2007).

La Figura 1.11 muestra que en la actualidad los GEI se han incrementado en forma más acentuada si se compara con los ciclos de aumento y descenso previos.

La emisión de GEI está estrechamente relacionada al consumo de energía, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles, lo cuales en su etapa de prospección, explotación, y uso, son responsables de un alto nivel de emisión neto de GEI al ambiente. En la Figura 1.12 se presentan la contribución en emisiones de GEI por sector o actividad en el año 2011 en el mundo.

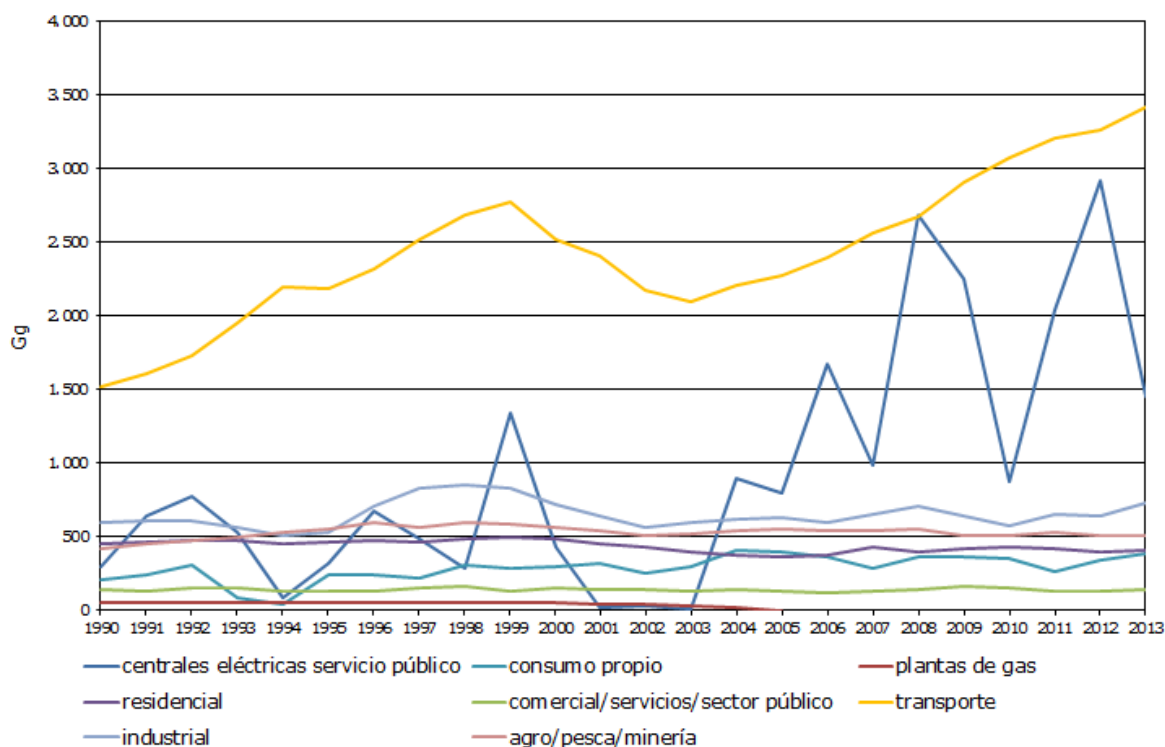


**Figura 1.12:** Emisiones globales mundiales por sector, año 2011. (Adaptado de IPCC Report, 2011).

Tal como se observa en la Figura 1.12 el sector transporte representa el 22% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> en 2011 a nivel mundial.

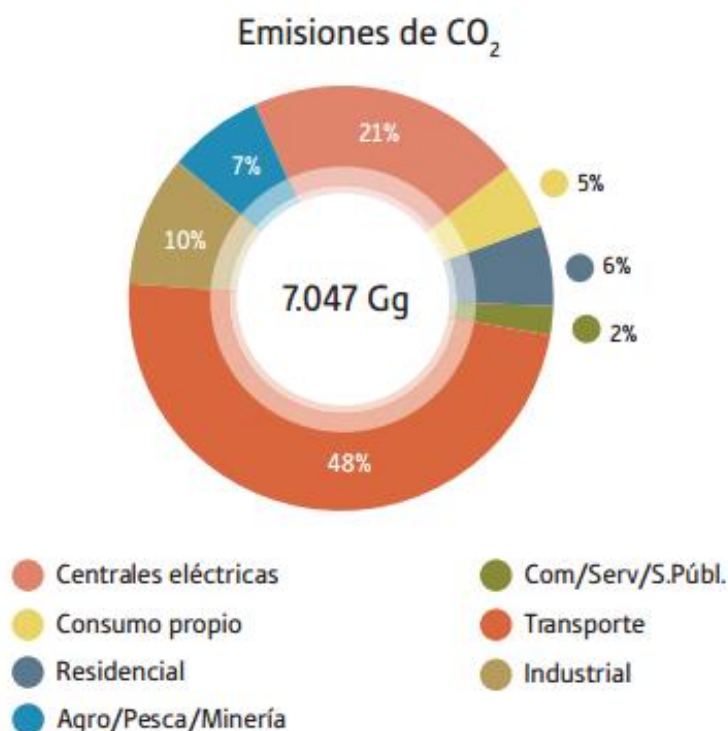
El sector transporte se abastece casi exclusivamente de combustibles fósiles y tal cómo se mencionó anteriormente, su ciclo de vida es netamente negativo desde el punto de vista de emisión de gases de efecto invernadero (Elgowainy *et al.*, 2014).

Para Uruguay la distribución de emisiones de GEI por sector, es aún más desfavorable para el sector transporte. La Figura 1.13 muestra la participación por sector en la emisión de GEI en el período entre los años 1990 y 2013.



**Figura 1.13:** Gg de CO<sub>2</sub> eq. Industrias de la energía y sectores de consumo en Uruguay (período 1990-2013). Fuente: DNE, MIEM, Emisiones de CO<sub>2</sub>.

La Figura 1.13 y la Figura 1.14 nos muestran que en el Uruguay la emisión de GEI es predominante en el sector de transporte, siendo responsable en el año 2013 de casi el 50% del total de las emisiones.



**Figura 1.14:** Participación de Industrias de la energía y sectores de consumo en Uruguay en la emisión de GEI (2013). Fuente: DNE, MIEM, Emisiones de CO<sub>2</sub>.

El calentamiento global afecta a todos los habitantes del mundo y ha intentado ser atendido a través de mecanismos que incentiven el desarrollo y ejecución de proyectos de producción más limpia. En el año 1988 se crea el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), formado por dos organizaciones de Naciones Unidas, OMM (Organización Meteorológica Mundial) y PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). En el año 2000 se elabora el tratado del Protocolo de Kioto, durante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, que establece compromisos jurídicamente vinculantes de los países inscriptos de reducir o contribuir a revertir el cambio climático a través de la concreción de proyectos y mecanismos que eviten la emisión de gases de efecto invernadero. Uruguay ratificó este acuerdo en el año 2007.

Las reducciones de emisiones de GEI a través de la implementación de mecanismos de producción más limpia, se miden en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, que se traducían en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Un CER equivalía a una tonelada de CO<sub>2</sub> que se dejaba de emitir, y podía ser vendido a los países industrializados que se encuentran en el Anexo I del protocolo de Kioto. Luego del 2012, habiendo finalizado el mecanismo por bonos de carbono, surgió como opción de mitigación para los países en desarrollo las acciones de mitigación apropiadas a cada país, NAMAs, por sus siglas en inglés, Nationally Appropriate Mitigation Action.

Desde hace algunas décadas, se comenzó a estudiar las oportunidades y capacidades existentes para disminuir la emisión de GEI, provenientes de diferentes sectores y procesos. En el sector transporte, se ha estudiado la emisión de GEI en la producción de combustibles fósiles y biocombustibles y las posibles modificaciones productivas que mejoren sus resultados (Contreras *et al.*, 2009; de Vries *et al.*, 2010; Pieragostini *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2008), la emisión de GEI y balance de energía de tecnologías de celdas fotovoltaicas (Azzopardi *et al.*, 2010; García *et al.*, 2010), la emisión de GEI de los métodos de construcción (Estoková *et al.*, 2012; Ortiz *et al.*, 2009), entre otros procesos productivos.

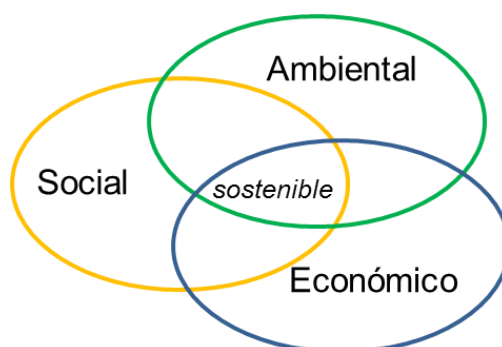
Los combustibles fósiles además de contribuir al incremento de los GEI, son un recurso finito. Las reservas probadas establecen que, dependiendo de la velocidad de producción y consumo del crudo, el tiempo de agotamiento del recurso de 10 países con los mayores reservas en el mundo, va entre 25 a 100 años (BP, 2011). Se continúan realizando estudios de prospección, con los que se siguen descubriendo yacimientos y por lo tanto las reservas podrían sean mayores, pero *a priori* no cambiarían el escenario del agotamiento del recurso en el mediano plazo.

### 1.3. Desarrollo sostenible

Según se define en el Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland): “*Nuestro Futuro Común*” (1987), se considera desarrollo sostenible:

*“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones del futuro para atender sus propias necesidades”*

En este concepto se abarcan tres dimensiones que se encuentran relacionadas: la ambiental, la social y la económica. En cada una de ellas se establecen aspectos que evalúan la sostenibilidad de cada bien, servicio o actividad; lo equitativo desde el punto de vista social y económico, lo viable desde el punto de vista ecológico y económico y lo soportable entre lo ambiental y lo social.



**Figura 1.15:** Esquema de aspectos del desarrollo sostenible

Este concepto fue incluido en el principio 3 de la declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo de la Organización de Naciones Unidas de 1992 (UN, 1992) y por la ley nacional N°17283 de Protección general de medio ambiente de 15 de noviembre de 2000, en su artículo 1.

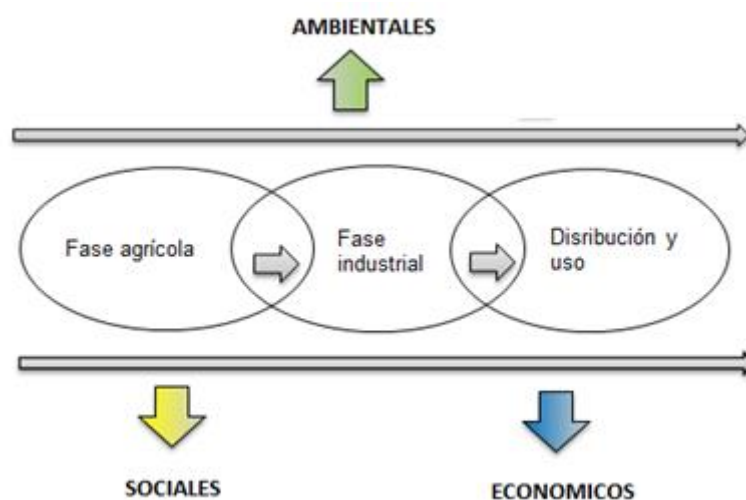
Para que el abastecimiento de energía sea sostenible a largo plazo, debemos asegurar la disponibilidad de los recursos en todo momento, en varias formas, en cantidades suficientes, a precios accesibles y sin impacto inaceptable o irreversible en el medio ambiente.

Esta concepción ha tomado mayor relevancia en los últimos años, debido a que comenzó a evidenciarse los inconvenientes y desequilibrios que se generan al no considerarlos.

### 1.3.1. Bioenergía y sostenibilidad

Se define la bioenergía como la energía derivada de la biomasa. La biomasa se define como la “materia prima de origen biológico excluyendo el material incrustado en formaciones geológicas o transformado en material fosilizado” (Proyecto ISO CD 13065-2013). La biomasa puede ser utilizada en forma directa para la producción de energía o ser convertida en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. El biocombustible es el combustible obtenido a partir de biomasa.

La sostenibilidad considera las tres dimensiones mencionadas anteriormente; la económica, la social y la ambiental. La influencia de cada uno de estos aspectos debe ser evaluada para cada condición local, analizando características de las cadenas productivas que responden a condiciones geográficas, sociales, culturales, tecnológicas, y del momento temporal en el que se está ejecutando la actividad. En la Figura 1.16 se presenta un esquema de generación de impactos durante el ciclo de vida de los biocombustibles.



**Figura 1.16:** Impactos durante la cadena productiva de los biocombustibles

Para abordar el análisis económico social y ambiental, se realizan estudios que evalúan las entradas y salidas en estas tres dimensiones del sistema en estudio durante todo su ciclo de vida. Son estudios que comenzaron a aplicarse hace poco tiempo y aún hay poca experiencia sobre ellos (Castelazo *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2014).

La Asociación Global de la Bioenergía (GBEP) ha elaborado un conjunto de 24 indicadores para la evaluación y seguimiento de la sostenibilidad de la bioenergía. Los indicadores tienen por objetivo informar a los responsables de formular las políticas sobre los aspectos ambientales, sociales y económicos del sector bioenergético y guiarlos hacia políticas que promuevan el desarrollo sostenible. En la Tabla 1.3 se presenta el listado de estos 24 indicadores, categorizados en las tres dimensiones previamente mencionadas: ambiental, social y económica.

**Tabla 1.3:** Indicadores de sostenibilidad de GBEP para bioenergía

Dimensión	Nombre del indicador
<b>Ambiental</b>	Emisión de GEI
	Calidad del suelo
	Extracción de madera y sostenibilidad del bosque
	Emisión de sustancias contaminantes
	Disponibilidad y eficiencia en el consumo de agua
	Calidad del agua afectada por la producción de bioenergía
	Biodiversidad
	Uso indirecto de la tierra
<b>Social</b>	Propiedad y derechos sobre la tierra
	Efecto sobre precio y suministro de alimentos
	Ingresos de las comunidades afectadas
	Generación de empleo
	Efecto de recolección de biomasa por mujeres y niños respecto al uso tradicional
	Mejora y ampliación de servicios
	Mortalidad y enfermedades por inhalación de gases en la combustión de biomasa en el interior de los hogares
	Incidencia en la salud
<b>Económica</b>	Productividad
	Balance neto en la producción de energía
	Valor añadido bruto por unidad de bioenergía producida
	Cambios producidos en el consumo de combustibles fósiles y en el uso tradicional de la biomasa
	Formación y cualificación de la mano de obra
	Diversificación de la energía
	Infraestructura y logística para la distribución de la energía
	Capacidad y flexibilidad en el uso de la bioenergía

Fuente: GBEP, 2011.

Una herramienta utilizada a nivel mundial para la evaluación del impacto económico es la metodología input-output. El Análisis “Input-Output” basado en Tablas Input –Output, representa los flujos y transacciones económicas de unas ramas de actividad con otras en una región determinada (Jiang *et al.*, 2014). Esta metodología permite cuantificar el aumento de la demanda de los sectores que desarrollan los proyectos (impactos directos), así como los efectos que esto produce en otros sectores que necesitan comprar más a sus proveedores para satisfacer su mayor producción (impactos indirectos).

El análisis integral del impacto social durante todo el ciclo de vida es el que menos evolución ha tenido hasta el momento, sin embargo existen nuevas herramientas y algunos estudios que comienzan a hacer paso como la herramienta SHD (Social Hotspot Database, [www.socialhotspot.org](http://www.socialhotspot.org)) y estudios como los de Weidema (2006a , 2006b, 2009) y Weidema *et al.* (2013). Para cuantificar el impacto social, se evalúan índices sociales tales como,

mortalidad infantil, tasa de desempleo, nivel educativo, grado de asistencia a los centros educativos, entre otros. A modo de ejemplo, en el informe “Impacto socio-económico de ALUR en Bella Unión” publicado en 2009, se utiliza índices de este tipo para analizar el impacto socio-económico del proyecto sucroalcoholero de ALUR en Bella Unión (ALUR, 2009).

### 1.3.2. Bioetanol y su dimensión ambiental

El bioetanol es el etanol o alcohol etílico producido a partir de biomasa rica en carbohidratos. Se denomina bioetanol para diferenciarlo de aquel producido por síntesis a partir de hidrocarburos. El bioetanol combustible es aquel producido para su uso como combustible en general. La mayor aplicación es en motores de combustión interna.

El bioetanol puede ser sustituto parcial o total del combustible fósil que se utiliza para los vehículos de transporte. Se puede mezclar con gasolina hasta en un 10 %, sin necesidad de realizar modificaciones al motor (Morales *et al.*, 2015). Las mezclas de 5 % o 10 % de composición de bioetanol en la gasolina se denominan E5 y E10, respectivamente. El bioetanol también puede utilizarse en concentraciones más altas como el E85 (85 % bioetanol y 15 % gasolina) o E95 (95 % bioetanol y 5 % gasolina). La mezcla más popular para los vehículos ligeros que se conoce como E85 (Dufey, 2006).

Se requiere de etanol deshidratado cuando se utiliza el alcohol como aditivo en la gasolina, ya que en presencia de agua, la combustión de la mezcla puede traer fallas en el motor (Sanchez y Cardona, 2008; Wyman, 1994).

Para comenzar el abordaje del aspecto ambiental de la producción del bioetanol, en la Figura 1.16 se presenta un esquema de la cadena productiva y uso final del mismo, que refleja en forma simplificada las entradas y salidas a lo largo de todo el proceso, considerando el consumo directo e indirecto de energía y la emisión de GEI. Este esquema representa la cadena productiva del bioetanol dividida en tres fases: una primera correspondiente a la producción y transporte de la materia prima (fase agrícola), una segunda de procesamiento, donde el cultivo se transforma en etanol (fase industrial) y por último el uso del bioetanol a través de su quema como combustible.

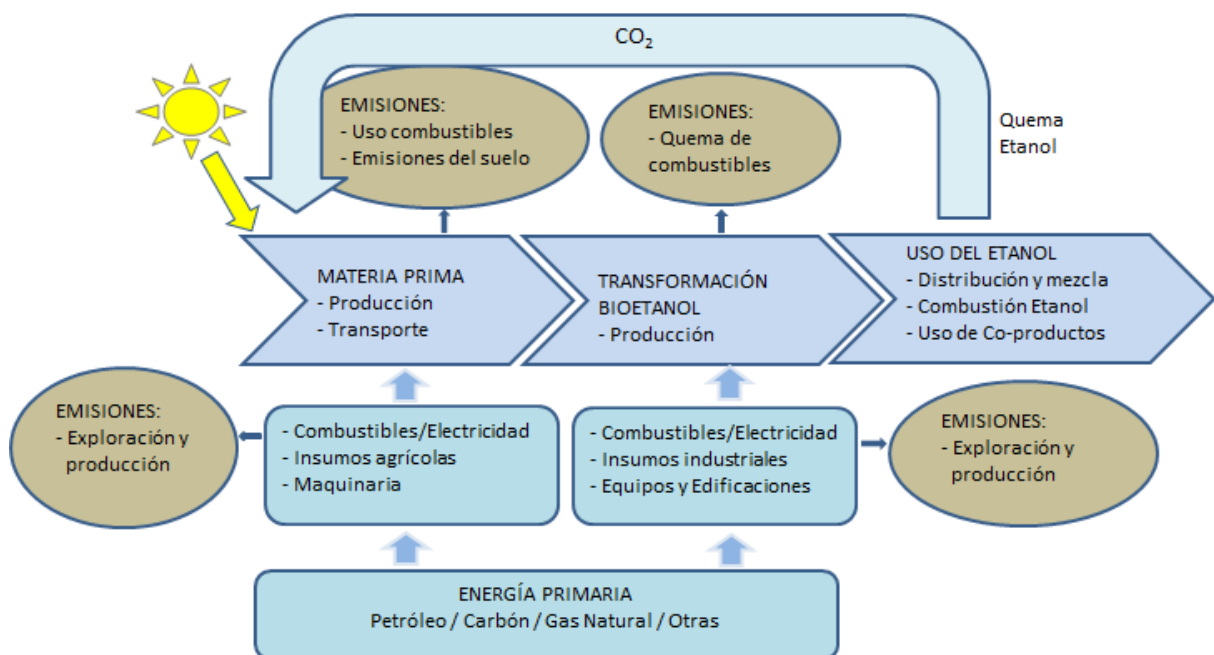


Figura 1.17: Diagrama de flujo básico de producción de Bioetanol



En la parte inferior del esquema de la Figura 1.17, se observa la entrada de insumos a lo largo del proceso productivo: combustible, electricidad, insumos agrícolas e industriales, máquinas, equipos y edificios. Durante la fabricación de estos insumos se generan emisiones de GEI; por ejemplo las provenientes de la exploración y producción de los combustibles, de la producción de fertilizantes, pesticidas, fabricación de equipos y maquinaria, construcción de edificios y todo lo necesario para el proceso productivo, las provenientes de la quema final del bioetanol, del uso de fertilizantes para el suelo en la fase agrícola, entre otros. Al mismo tiempo, todas estas actividades insumen energía, la que se visualiza a través del abastecimiento de energía primaria.

Se observa que la emisión de CO<sub>2</sub> generada por el uso del bioetanol (quema), se absorbe en la fotosíntesis durante el crecimiento del cultivo (materia prima del proceso).

Por otro lado este esquema permite visualizar a primera vista que la emisión de GEI a la atmósfera no es igual a cero; sino que debe ser cuantificado a través de la emisión de GEI por el uso de combustibles fósiles. Lo mismo para la energía: la cuantificación del consumo de energía a lo largo de todo el proceso, permitirá evaluar si la energía de salida (contenida en el bioetanol), es mayor a la energía consumida durante el ciclo de vida. Al determinar estos parámetros podremos verificar si los biocombustibles contribuyen realmente a la reducción del uso de combustibles fósiles y a la reducción de emisiones de GEI.

Para cuantificar del consumo de energía fósil y la emisión de GEI se utilizan parámetros los cuales se describen a continuación.

- **Tasa de retorno energético EROI** (por sus siglas en inglés, energy returned on investment): es el cociente entre la energía obtenida y la energía fósil consumida a lo largo del proceso.

$$\text{EROI} = \text{Energía obtenida} / \text{Energía fósil consumida (MJ/MJ)}$$

- **Balance neto de energía:** es la diferencia entre la energía obtenida y la energía fósil consumida a lo largo del proceso.

$$\text{Balance neto de Energía} = \text{Energía obtenida (MJ)} - \text{Energía fósil consumida (MJ)}$$

- **Emisiones netas:** son las emisiones netas generadas durante el ciclo de vida del biocombustible. Este balance neto de emisiones considera las deducciones de la absorción de CO<sub>2</sub> durante el crecimiento del cultivo y las emisiones evitadas por sustitución de otros bienes por generación de co-productos (por ejemplo el DDGS).
- **Emisiones evitadas:** es la diferencia entre las emisiones de GEI generadas durante el ciclo de vida del combustible fósil (que será sustituido por el biocombustible), y las emisiones netas de GEI generadas durante el ciclo de vida del biocombustible.

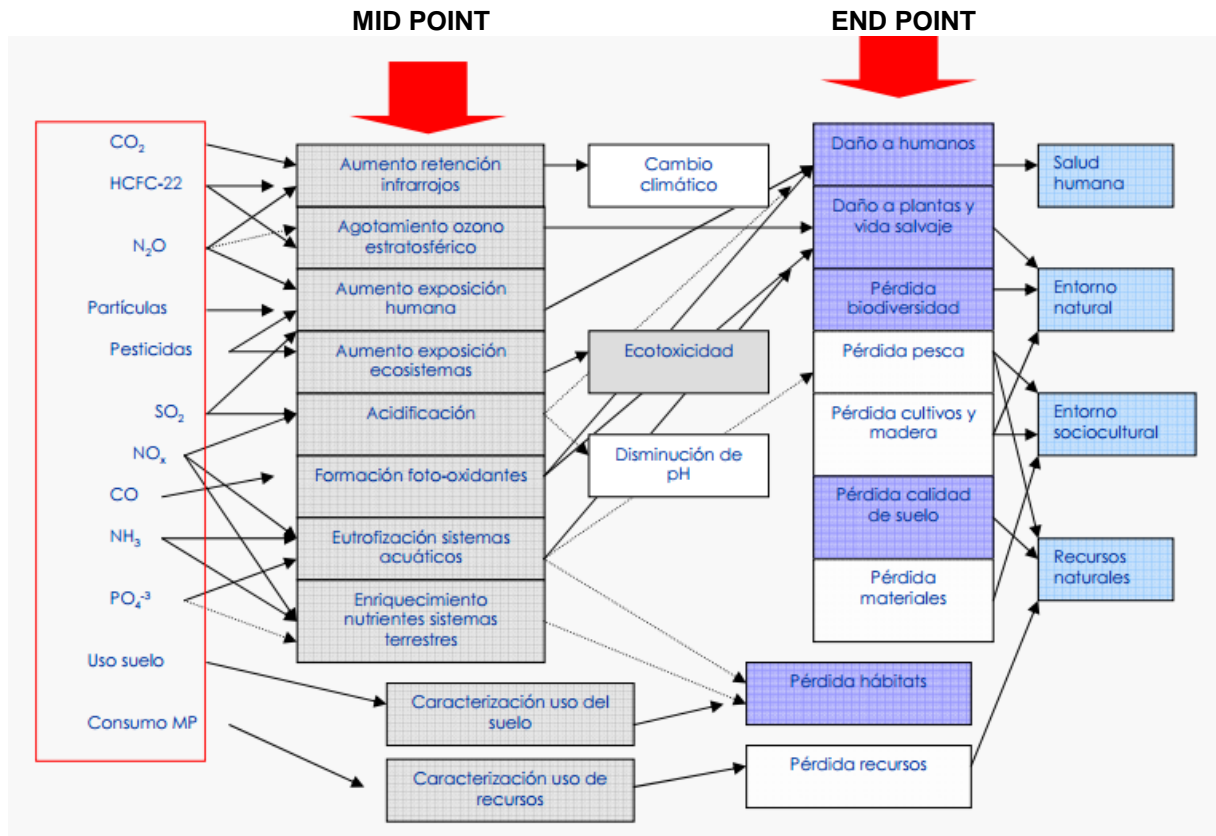
A través del Análisis de Ciclo de Vida se determina la emisión de GEI y el consumo de energía a lo largo de toda la cadena productiva.

#### 1.4. Análisis de ciclo de vida

El ACV es una herramienta metodológica que sirve para medir el impacto ambiental de un producto, proceso o sistema a lo largo de todo su ciclo de vida (desde que se obtienen las materias primas hasta su fin de vida). Se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener resultados que muestren sus impactos ambientales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos. Esta metodología se ha utilizado, para el análisis de biocombustibles, y productos y servicios en general (Kaltschmitt et al., 1997, Macedo et al., 2004, Lu y Xu, 2013; Mileto *et al.*, 2014).

La principal característica de esta herramienta es su enfoque holístico, es decir, que se basa en la idea de que todas las propiedades de un sistema no pueden ser determinadas o explicadas solo de manera individual por las partes que lo componen. Es necesaria la integración de todos los aspectos que participan; de ahí el concepto de tener en cuenta todo el ciclo de vida del sistema.

Las metodologías de ACV se clasifican, de acuerdo al objetivo del análisis, en metodologías Midpoint y Endpoint. Los métodos midpoint son aquellos que evalúan los efectos intermedios, mientras que el método endpoint evalúa los efectos últimos. Por ejemplo en midpoint se evalúa el cambio climático, la acidificación de la tierra, el agotamiento de la capa de ozono, y endpoint evalúa por ejemplo el daño a humanos, pérdida de biodiversidad, pérdida de capacidad del suelo, entre otros. En la Figura 1.18 se presenta un esquema de estos métodos de evaluación y como se relaciona uno con el otro. El ILCD Handbook (EC-JRC-IES, 2010) recomienda una u otra metodología dependiendo del objetivo de cada estudio, y también indica que las metodologías endpoint introducen errores que las hace menos exactas y precisas.



**Figura 1.18:** Esquema de metodologías MidPoint / EndPoint de ACV (Fuente: IECA, 2010)

La Organización Internacional de Estandarización, ISO (International Organization for Standardization) ha establecido requisitos y directrices estándares para la metodología de ACV, a través de las siguientes normas:

- ISO 14040:2006 “Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Referencia”.
- ISO 14044:2006 “Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y directrices”.

El ACV distingue elementos de entrada y de salida que se describen a continuación.

**Entradas (inputs):** Flujo de materia y energía que entra a la unidad de proceso. Por ejemplo, el uso de recursos y materias primas, partes y productos, transporte, electricidad y otros.

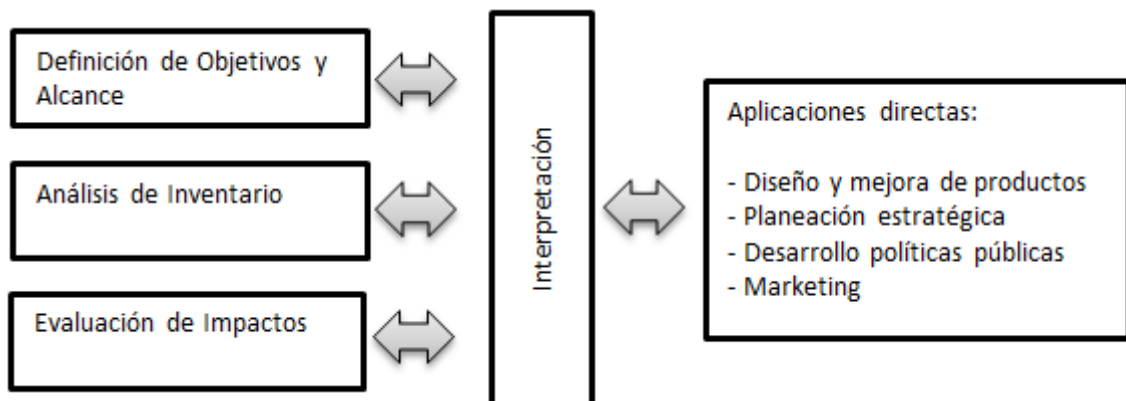
**Salidas (outputs):** Flujo de materia y energía que salen de la unidad de proceso. Por ejemplo emisiones al aire, al agua y al suelo, productos, subproductos, residuos y otros.

La manera y forma en la que se recopilan estas entradas/salidas se conoce como Inventario de ciclo de vida (ICV), y es la fase del ACV que implica la recopilación y la cuantificación de entradas/salidas de un sistema durante su ciclo de vida.

El ACV de un producto debe incluir todas las entradas/salidas de los procesos a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesado de los materiales

necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto y finalmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias entre las fases del ciclo de vida también se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente.

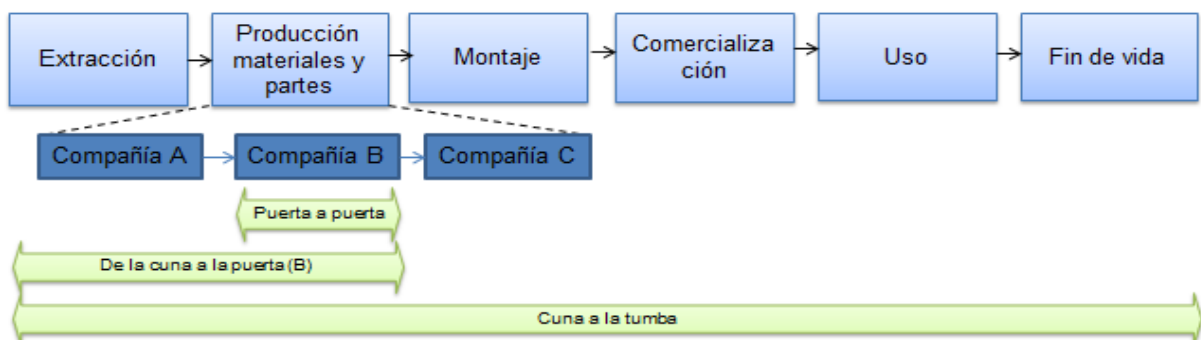
Pero además de la etapa de inventario, la metodología de ACV establece otras etapas. La Figura 1.19 presenta un esquema que representa las fases de la metodología de ACV según estas normas internacionales. La metodología de ACV es dinámica, y sus etapas están interrelacionadas; durante el análisis se vuelve al inicio y a etapas previas mejorando y adaptando la información para la obtención de mejores resultados.



**Figura 1.19:** Fases de la metodología de ACV

A continuación se describe cada una de estas etapas.

**Definición de objetivos y alcance:** Se debe definir el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida. Los límites del sistema se definen en base al alcance y objetivo del estudio. En la Figura 1.20 se observan diferentes alternativas relacionadas a los mismos.



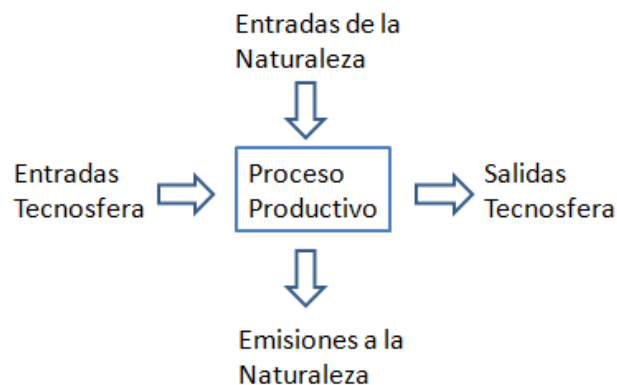
**Figura 1.20:** Esquemas de “cradle to grave”, “cradle to gate”, y “gate to gate”, en función de los límites del sistema establecidos.

La unidad funcional describe la función principal del sistema analizado, y debe responder al objetivo y alcance del estudio y establecer una referencia para normalizar los datos de entrada y de salida. La unidad puede ser física o funcional, debe ser medible y estar claramente definida. Respecto a los flujos del ciclo de vida, es importante tener en cuenta que cuando las cadenas productivas entregan más de un producto, se debe establecer criterios que permitan repartir las cargas ambientales del proceso y consumos de energía (reglas de asignación).

**Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV):** Es la etapa del ACV en la que se recopilan los datos correspondientes a las entradas y salidas de todos los procesos del sistema. En esta etapa se realizan cálculos de modo de trabajar bajo la misma unidad de referencia, y se asignan flujos y emisiones (reglas de asignación) cuando los procesos producen más de un producto.

La fase de Inventario es la que requiere mayor esfuerzo en la realización del ACV. En esta fase, se requieren dos tipos de datos; datos de primer plano y datos de fondo.

Los datos de primer plano son los datos necesarios para representar el sistema en estudio e inciden en forma directa en el proceso productivo. Corresponden por ejemplo al transporte de insumos importados, a la producción nacional de insumos locales, al consumo de combustible o energía para el desarrollo de las actividades propias del proceso productivo en estudio. Se dividen en dos categorías: entradas y salidas de la tecnosfera y entradas y salidas de la naturaleza (Figura 1.20). Los elementos que provienen de la naturaleza son aquellos que provienen en forma directa de esta, sin un proceso de transformación previo, como por ejemplo el CO<sub>2</sub> absorbido por el cultivo durante el proceso de fotosíntesis. Los elementos que se emiten a la naturaleza son aquellos que son absorbidos por la misma, como el NO<sub>2</sub> emitido al aire por aplicación de fertilizantes durante la producción agrícola. Los elementos que provienen o se entregan a la tecnosfera son aquellos que han sufrido un proceso de transformación antes de ingresar al sistema en estudio y aquellos que resultan de un proceso productivo pero que no son absorbidos por la naturaleza como por ejemplo el DDGS o el etanol.

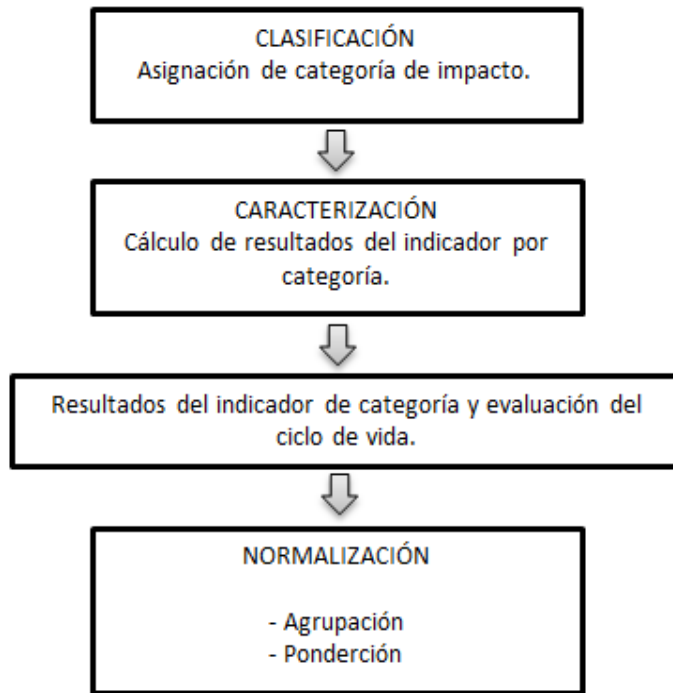


**Figura 1.20:** Entradas y salidas de la naturaleza y tecnosfera en el proceso productivo

Los datos de fondo son aquellos que inciden en forma indirecta en el proceso productivo y que afectan el resultado por ser precedentes a la cadena productiva en estudio. Responde a datos generales, ya que puede tratarse de procesos productivos diferentes, o de sitios diferentes. A modo de ejemplo, un insumo es fabricado en China, resultará en consumos de energía y emisión de GEI de su proceso de fabricación que impactará finalmente en el sistema en estudio. Los datos de fondo se toman de bases de datos disponibles y en su uso se introducen estimaciones y suposiciones.

**Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV):** Es la fase del ACV en la que el inventario de entradas y salidas es convertido o traducido a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales.

El objetivo de esta etapa es conocer y cuantificar los impactos ambientales de cada entrada o salida del proceso en estudio. Se evalúa su magnitud y significancia, transformando los resultados del inventario del ACV en resultados de carácter ambiental. En esta etapa, la norma ISO 14040:2006 establece la serie de pasos que se presenta en la Figura 1.21.



**Figura 1.21:** Etapas de la metodología del ACV

La primera etapa es la selección de categorías de impacto ambiental. Las salidas del proceso en estudio van a ser asignadas a la o las categorías de impacto que corresponda. Estas categorías representan los impactos ambientales de interés a los cuales se quieren asignar los resultados del EICV.

Existe gran cantidad de categorías de impacto ambiental, y la selección de unas u otras en el ACV que se esté llevando a cabo dependerá del objetivo del estudio, público objetivo y nivel de exactitud de los resultados requeridos. En la Tabla 1.4 se presentan algunas categorías que podrían ser consideradas. Las dos primeras aplican a este estudio.

**Tabla 1.4:** Categorías de impacto ambiental

Categoría de impacto ambiental		Indicador	
		Nombre	Unidad
<b>Calentamiento global</b>	Fenómeno observado en las medidas de temperatura media global de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas.	Potencial de calentamiento global	kg eq. CO <sub>2</sub>
<b>Consumo de recursos energéticos</b>	Energía fósil consumida durante todos las actividades necesarias para llevar adelante el proceso, incluida la producción de materias primas, fabricación, distribución, uso y disposición final.	Cantidad de energía consumida	MJ
<b>Reducción de la capa de ozono</b>	Efectos negativos sobre la capacidad de protección a los rayos ultravioletas de la capa de ozono de la atmósfera.	Potencial de agotamiento de la capa de ozono	kg eq. CFC-11
<b>Eutrofización</b>	Crecimiento excesivo de algas en ríos, provocado por la alta concentración de detergentes y fertilizantes, que provoca un alto consumo de oxígeno en el agua.	Potencial de eutrofización	kg eq. NO <sub>3</sub>
<b>Acidificación</b>	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, por recibir desde la atmósfera en forma de ácidos, óxidos de azufre y nitrógenos.	Potencial de acidificación	kg eq. SO <sub>2</sub>

Una vez que cada sustancia ha sido asignada a una o más categorías de impacto, se compara su valor con respecto a la sustancia de referencia de dicha categoría. Esto se lleva a cabo a través de factores de caracterización de cada sustancia y representan la contribución de cada una de ellas a esta categoría. La cantidad de la sustancia multiplicada por el factor de caracterización, obteniendo resultados con unidades equivalentes para todas las sustancias.

En la Tabla 1.2, se presentó el potencial de calentamiento de cada sustancia emitida o liberada en un proceso, según criterios de IPCC GWP 100<sup>a</sup>, 2013.

Las etapas de normalización, agrupación y ponderación, las normas mencionadas las establecen como opcionales.

**Normalización:** Conversión de los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno de los resultados por un factor de normalización. A través de estos factores se representa el grado de contribución de cada categoría de impacto sobre el problema medioambiental local o global. Por ejemplo, luego de determinar los kg eq. NO<sub>2</sub> de un proceso productivo, se puede dividir dicho valor por el valor de kg eq. NO<sub>2</sub> totales en la región donde se localiza el proceso, y así se observa la contribución de esta emisión en una situación regional específica.

**Agrupación:** Clasificación de las categorías de impacto en otros grupos que engloben categorías de impacto con efectos similares.

**Ponderación:** Conversión de los resultados de los valores caracterizados a una unidad común y sumable (en el caso de que la metodología incluya una normalización, a partir de los valores normalizados), multiplicándolos por su factor de ponderación. Posteriormente se suman todos ellos para obtener una puntuación única total del impacto ambiental del sistema.

Estas dos últimas etapas de la metodología de evaluación de impacto introducen subjetividades e incertidumbres, resultando en una baja capacidad de comparación.

Una vez aplicada la metodología de evaluación de impacto, se procede a la etapa de interpretación, tal como se indica en la Figura 1.18. Esta es la fase del ACV en la que los resultados del ICV y el EICV son interpretados de acuerdo al objetivo y alcance marcados inicialmente. En esta fase se realiza el análisis de resultados y conclusiones.

#### 1.4.1. Herramientas de cálculo para ACV y simulación de procesos productivos

Desde hace algunos años, debido a la gran cantidad de datos que maneja un ACV, se comenzó a desarrollar herramientas informáticas para facilitar la determinación de impactos ambientales de procesos. La mayoría de estas herramientas incluyen base de datos de diversos sectores económicos, lo que facilita enormemente la realización de estos estudios. En la Tabla 1.5 se presenta un listado de las aplicaciones informáticas más utilizadas a nivel mundial (Morales *et al.*, 2015).

**Tabla 1.5:** Listado de software utilizados para ACV

Software	Desarrollador	País
Bousted	Bousted Consulting	Inglaterra
Gabi	PE Europe GmbH	Alemania
LCAManager	SIMPPLE	España
SimaPro	Pre-Consultants	Holanda

SimaPro ha sido utilizada para el análisis del ciclo de vida de una vasta cantidad de bienes y servicios, entre ellos los relacionados a bioenergía; producción de etanol a partir de maíz y caña de azúcar (Contreras *et al.*, 2009; Renó *et al.*, 2011) a partir de lignocelulósicos (Pierasgostini *et al.*, 2014), producción de electricidad y otros productos asociados a la producción de etanol (Pérez Gil *et al.*, 2013), producción de materias primas para bioenergía (Fazio y Monti, 2011; González *et al.*, 2012).

SimaPro cuenta con múltiples bases de datos de calidad y habilita la edición y duplicado de las mismas, facilitando el trabajo sobre la herramienta. La metodología de armado de los sistemas y la trazabilidad de los procesos es de fácil comprensión y permite cumplir con las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006. Por estas razones y por su uso extendido se seleccionó el software Sima Pro versión 8.03.14, desarrollado por la consultora holandesa Pre Consultants.

Las bases de datos disponibles en la herramienta provienen de distintos autores y cada una de ellas fue construida para determinadas condiciones geográficas, temporales,



tecnológicas, entre otras. Se debe tener especial cuidado en el uso de la información disponible, ya que los procesos disponibles reflejan estudios realizados en otros sitios en el mundo. Se debe verificar que las bases de datos seleccionadas sean coherentes con el objetivo y campo de aplicación definido previamente.

La BD Ecoinvent 3, disponible en SimaPro, tiene información de todo el mundo y es la más utilizada a nivel mundial. A continuación se describen algunas ventajas de utilizar esa BD:

- Cubre una gran variedad de datos
- Bases de datos disponibles como procesos unitarios y procesos de sistema (Unit and System Process).
- Documentado de manera ordenada y estandarizada.
- Incluye bienes de capital.
- Es actualizada regularmente.

Sima Pro incluye varios métodos de evaluación de impacto, los cuales cumplen con los requisitos establecidos en la familia de normas 14040.

También se han desarrollado aplicaciones capaces de simular procesos, herramientas que representan y analizan procesos industriales integrados. Permiten minimizar tiempos, costos y experimentación en el diseño de bioprocesos (Cardona *et al.*, 2006), y generan información muy valiosa que puede ser utilizada en la toma de decisiones para conseguir la optimización del proceso. Este tipo de programas permite estudiar distintas configuraciones del proceso; consumo energético, evaluación económica, e impactos ambientales. Han sido utilizados en la industria petroquímica desde el comienzo de la década del 60. Dentro de los distintos programas que se encuentran en el mercado se incluyen: Aspen Plus® (Aspen Technology Inc.) y SuperPro Designer® (Intelligen Inc.) (Cardona *et al.*, 2006; Dias *et al.*, 2012; Dutta *et al.*, 2010; Ferrari *et al.*, 2013, Humbird *et al.*, 2011; Kwiatkowski *et al.*, 2006, Sánchez y Cardona, 2012).

En el caso del simulador de procesos SuperPro, la herramienta cuenta con modelos matemáticos que permiten simular una vasta cantidad de operaciones, como por ejemplo:

- |                            |                                     |
|----------------------------|-------------------------------------|
| • Reacción estequiometrica | • Cromatografía                     |
| • Reacción cinética        | • Filtración                        |
| • Reacción ambiental       | • Centrifugación                    |
| • Disrupción celular       | • Destilación                       |
| • Sedimentación            | • Extracción                        |
| • Secado                   | • Intercambio de calor              |
| • Cambio de fase           | • Cambio de presión                 |
| • Absorción/Adsorción      | • Mezcla y separación de corrientes |
| • Almacenamiento           |                                     |

Cada una de las operaciones, cuentan con una serie de equipos (los más representativos de dicha operación). Por ejemplo para la reacción estequiometrica:

- Well Mixed Reactor
- Fermentor
- Seed Fermentor
- AirLift Fermentor
- Plug Flow Reactor

Cada una las operaciones, son seleccionadas para constituir el diagrama de flujo del proceso en estudio. Cierta información de cada una de las operaciones, puede ser

determinada por el usuario, y se puede por ejemplo especificar la potencia del equipo, el agente de calentamiento o de enfriamiento, entre otros.

SuperPro Designer® contiene una biblioteca de datos de aproximadamente 370 componentes puros con sus propiedades respectivas. El usuario debe indicar al programa todas las sustancias químicas que ingresarán en las unidades operativas iniciales. De acuerdo a las características de las operaciones realizadas, el sistema establece la composición de las corrientes de entrada y salida del resto del proceso. Es posible ingresar al sistema nuevas especies químicas con sus propiedades correspondientes. También es posible editar las propiedades de los componentes existentes.

## 1.5. Producción de bioetanol

### 1.5.1. Producción mundial de bioetanol

En la siguiente Tabla 1.6 se presenta el uso de biocombustibles en varios países del mundo, según el porcentaje de bioetanol y gasolina en la mezcla del combustible.

**Tabla 1.6:** Tipo de mezcla por país

País	Típico uso
Brasil	E20-E25
Estados Unidos	E10, E85
China	E10
India	E10
Colombia	E10
Tailandia	E10
Perú	E7.8
Suiza	E5, E85
Uruguay	E5

*Fuente: IEA, 2010, World Energy Outlook.*

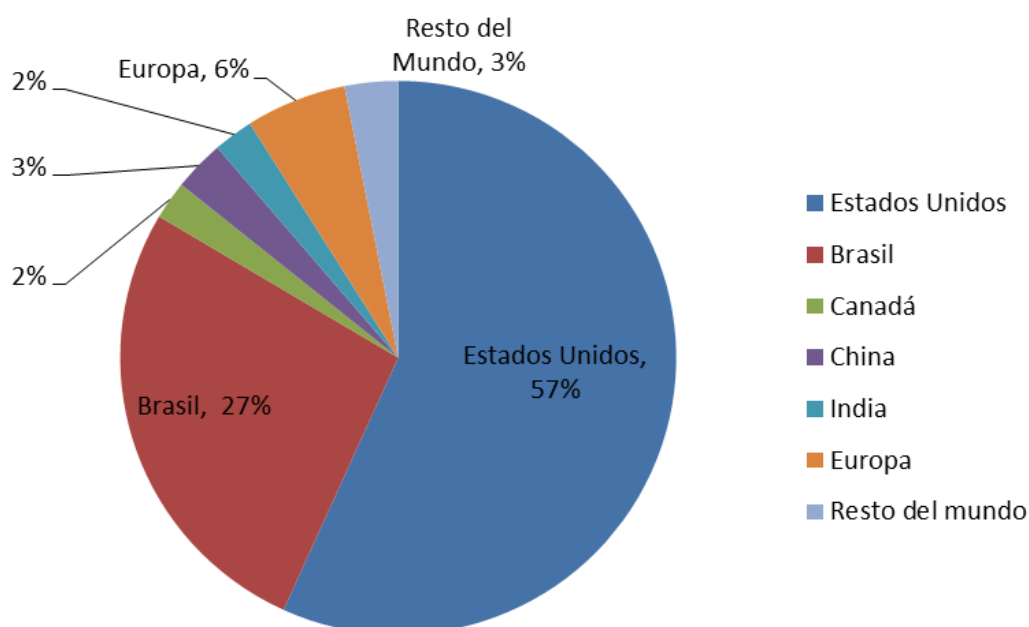
Históricamente la producción de bioetanol ha sido más costosa que la producción de combustibles fósiles. Por esta razón, algunos países optan por incentivar su desarrollo a través de la implementación de políticas específicas. Estas pueden estar orientadas a subsidiar la producción, a establecer la obligatoriedad de su uso, entre otros.

En el año 2013, la producción mundial de bioetanol fue de casi 89 millones de metros cúbicos, distribuyéndose por países y región tal como se indica en la Tabla 1.7 y Figura 1.22.

**Tabla 1.7:** Producción bioetanol por país en el año 2013

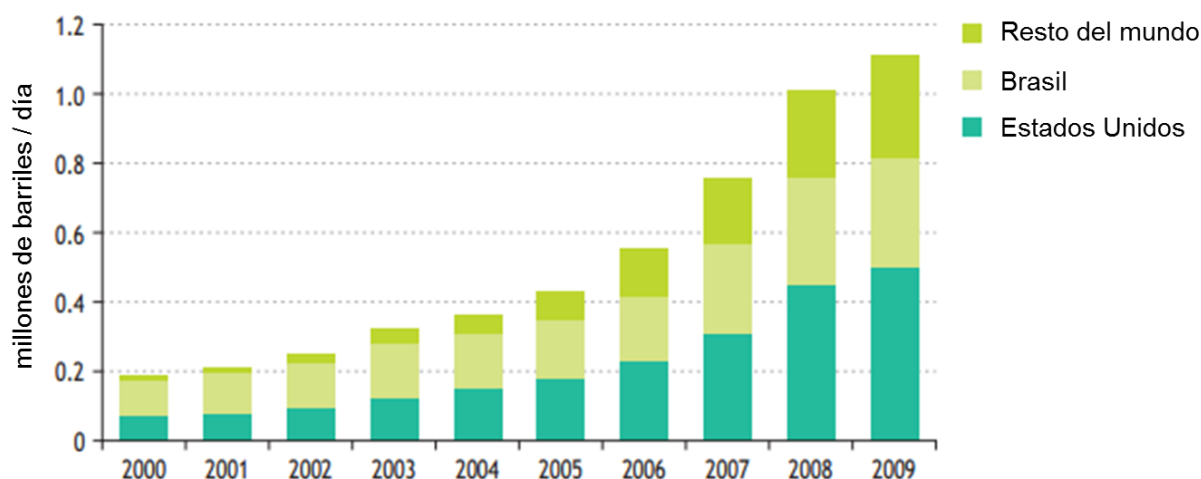
País o región	Millones de m <sup>3</sup>	%
EEUU	50.379	57
Brasil	23.739	27
Europa	5.193	6
China	2.636	3
India	2.064	2
Canadá	1.981	2
Resto del mundo	2.754	3
<b>TOTAL</b>	<b>88.746</b>	<b>100</b>

Fuente: USDA-FAS Ethanol Industry Outlook 2013



**Figura 1.22:** Distribución de producción de etanol por país. Fuente: USDA-FAS Ethanol Industry Outlook 2013.

La producción de bioetanol a nivel mundial permanece en crecimiento continuo y está liderada por Estados Unidos y Brasil (FAO, 2013, Biofuels and Sustainability Challenge), representando estos dos países en el año 2013 casi el 85% de la producción mundial. La Figura 1.23 muestra el incremento anual de la producción de etanol de Brasil, Estados Unidos y resto del mundo, el cual se ha quintuplicado desde el 2000 al 2009.



**Figura 1.23:** Evolución de la producción de etanol en las principales regiones. Adaptada de IEA, 2010. *World Energy Outlook*.

Brasil y Estados Unidos han implementado políticas para promover y desarrollar la producción de biocombustibles en sus países.

Desde el año 1931 la industria sucro alcoholera de Brasil se desarrolló a través de la intervención del gobierno, a través de la definición de mercados, precios, entre otras medidas. Durante este período el sector incorporó nuevas tecnologías, realizó mejoramiento genético de los cultivos, mecanización agrícola, mejoró la eficiencia del proceso en general, incrementando la productividad y disminuyendo los costos de producción (Van den Wall *et al.*, 2009).

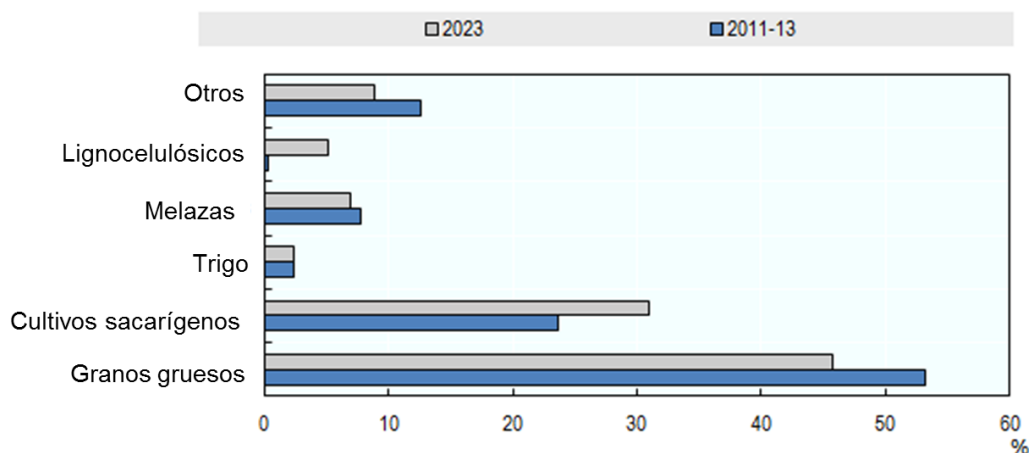
Estados Unidos, gran productor de bioetanol a partir de maíz, ha recorrido un camino similar de intervenciones del gobierno, que impulsaron el desarrollo de la producción de bioetanol en el país.

### 1.5.2. Materias primas y tecnologías de producción

El proceso de producción de bioetanol se puede abastecer de diferentes tipos de cultivos, que se clasifican según su composición en sacarígenos, amiláceos y lignocelulósicos.

- **Sacarígenos:** ricos en contenido de azúcares que pueden ser fermentados mediante el uso de microorganismos. Por ejemplo: remolacha, sorgo dulce, caña de azúcar.
- **Amiláceos:** ricos en contenido de almidón. Requieren ser hidrolizadas, para generar azúcar simple que sea fermentable. Por ejemplo: boniato, sorgo grano, maíz.
- **Lignocelulósicos:** alto contenido de celulosa y hemicelulosa. Requieren hidrólisis previa para poder ser fermentados. Por ejemplo: árboles, pastos, cascara de arroz.

En la Figura 1.24 se presenta el porcentaje de participación de los cultivos para la producción de bioetanol en el mundo en los años 2011 y 2013, y la proyección al año 2023. En esta figura se observa que la mayor parte de los cultivos utilizados para la producción de bioetanol en el mundo entre el 2011 y 2013 son los granos gruesos, representando más de un 50%, siguiéndole los sacarígenos con casi un 25%. El término granos gruesos refiere a los cultivos de granos (amiláceos) que no integran la dieta básica, por tal motivo no incluyen el trigo y el arroz. El uso del trigo se presenta en forma separada y representó entre los años 2011 y 2013 un 2% del total de cultivos.



**Figura 1.24:** Materias primas utilizadas para la producción de bioetanol. Adaptada de: OECD-FAO Agricultural Outlook, 2014.

El bioetanol carburante, según su proceso de obtención, se categoriza según los criterios que se mencionan a continuación.

- **Primera generación:** refiere al bioetanol proveniente de materias primas ricas en azúcar o almidón, y que encontramos en una vasta variedad de cultivos. La tecnología de transformación de estos cultivos en bioetanol está madura, y es la que más se utiliza a nivel mundial.
- **Segunda generación:** refiere al producido con materias primas que contienen sobre todo material lignocelulósico, y que en muchos casos se han desarrollado como cultivos energéticos. Estos cultivos no se utilizan para alimentación humana y además no compiten con la producción de alimentos, por crecer por ejemplo en suelos marginales, pobres en nutrientes y con escaso requerimiento de agua. Por lo tanto el bioetanol de segunda generación está “un paso más adelante” desde el punto de vista de la sostenibilidad (Wiloso *et al.*, 2012).
- **Tercera generación:** es el que se produce a partir de micro algas. Se trata de nuevas tecnologías que permiten el crecimiento del cultivo en el agua, y con un alto nivel de captación CO<sub>2</sub> del ambiente. Por crecer en el agua, no se compete con cultivos destinados a alimentación. Los biocombustibles de tercera generación son investigados en la actualidad en algunos países, y podrían ser una solución a las desventajas que hoy enfrentan otros biocombustibles. Una desventaja de este tipo de bioetanol es que el proceso productivo es muy intensivo energéticamente (Maity *et al.*, 2014; Moncada *et al.*, 2014).

## 1.6. Bioetanol en Uruguay

Uruguay ha desarrollado estrategias y herramientas con el fin de minimizar la dependencia energética, fundamentalmente de los combustibles fósiles.

En el año 2008 se aprobó la Política Energética Nacional, marco para establecer ejes estratégicos y metas de corto, mediano y largo plazo.

Uno de los ejes de la política es el de la oferta, el cual establece como objetivo, entre otros, la diversificación de la matriz energética y la incorporación de fuentes de energía autóctonas y en particular fuentes de energía renovables, que contribuyan al medio ambiente y a la soberanía energética del país. En esta línea y particularmente enfocado al sector transporte, en el año 2008, se aprueba la Ley 18.195 de Agrocombustibles. Esta ley establece la obligatoriedad de incorporar bio-combustibles a los combustibles de origen fósil consumidos en nuestro país. Establece horizontes de sustitución de combustibles fósiles por combustibles nacionales (en el caso de etanol la incorporación de hasta el 5% en las gasolinas de uso automotivo y a partir del 2015 este porcentaje será el mínimo obligatorio) y requisitos medioambientales para la producción, entre otros.

En Uruguay, la producción de biocombustibles es promovida y regulada por dicha ley, y tiene entre otros objetivos contribuir a:

- La sustitución de combustibles fósiles, contribuyendo a la seguridad y soberanía energética.

*La ley de agro-combustibles en Uruguay, establece que la producción debe ser realizada con materias primas nacionales.*

- La disminución de la emisión de gases de efecto invernadero.

*Por provenir de una fuente de energía renovable: biomasa.*

- Del impacto social y económico favorable.

*La producción con materias primas nacionales genera empleos directos e indirectos en el sector agrícola, y también en otros sectores como el transporte, la construcción y la industria. Estos aspectos generan derrame sobre la economía, contribuyendo por ejemplo a la descentralización, dinamización de diferentes zonas o regiones del país, y en algunos casos aportando un diferencia en el bienestar social y económico.*

Desde el 2006, en el norte de Uruguay se utiliza la caña de azúcar para la producción de bioetanol combustible, alcanzando una producción de 20.000 m<sup>3</sup>/año. En el año 2013 se superó los 30.000 m<sup>3</sup>/año a partir de jugo y melaza de caña y jugo de sorgo dulce, coproduciendo además azúcar, energía eléctrica y alimento animal ([www.alur.com.uy](http://www.alur.com.uy)).

A fines del año 2014 comenzó a operar una segunda planta de producción de bioetanol a partir de sorgo grano, ubicada en el departamento de Paysandú de una capacidad de producción nominal de 70.000 m<sup>3</sup>/año.

La Tabla 1.8 presenta la evolución del consumo y porcentaje de mezcla del bioetanol en las gasolinas entre los años 2000 y 2013, observándose el incremento a lo largo de esos años.

**Tabla 1.8:** Consumo de bioetanol en Uruguay

Año	Etanol (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	Gasolinas automotoras (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	% de mezcla (volumen)
2010	12.8	561	2.2
2011	15.7	457	3.3
2012	12.6	615	2.1
2013	30	700	4.3

Fuente: Dirección Nacional de Energía, Balance Energía 2013.

### 1.7. Características del sorgo grano

El sorgo grano es un cultivo de altos rendimientos por hectárea cultivada, es resistente a diversas condiciones climáticas y de suelo, lo que lo convierte en una opción adecuada como materia prima para este proceso.

El sorgo grano se adapta a todas las regiones del territorio nacional. Es un cultivo de verano, con alta capacidad de resistencia a las altas temperaturas y al estrés hídrico, situación común en nuestro país. Tiene buena tolerancia a altas humedades y crece bien bajo amplias condiciones en el suelo. Posee raíces fibrosas, muy numerosas, extremadamente ramificadas tanto en superficie como en profundidad lo que lo favorece para la extracción de elementos nutritivos y agua. Además presenta algunas características morfológicas que le confieren ventajas a la hora de soportar el estrés hídrico: hojas revestidas por capa cerosa blanquecina que reduce las pérdidas de agua por evaporación, y posee células motoras en las nervaduras centrales que tienen la facultad de plegar las hojas en caso de sequía (Plan Agropecuario, Agosto 2007, publicación Sorgo granífero).

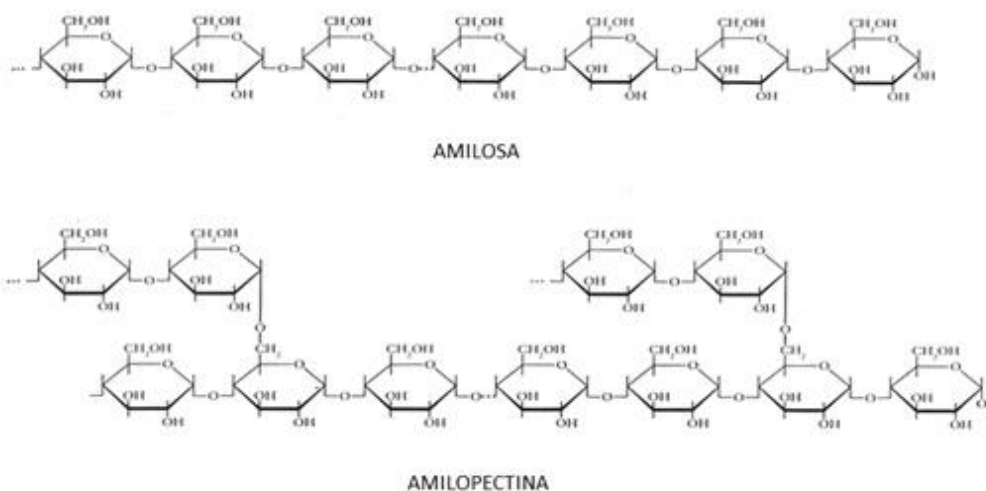


**Figura 1.25:** Fotografía de sorgo (fotografía Expo-feria sorgo 2012)

Es un cultivo que requiere de menos siembras de protección del suelo que otros, ya que la cantidad de materia orgánica que se deposita en el momento de la cosecha es significativa y contribuye a la protección del mismo (MGAP/DIEA, 2013. Encuesta agrícola invierno 2013). La desventaja más relevante de este cultivo es la falta de estabilidad de su mercado (Vázquez *et al*, 2012). El principal problema del cultivo es el daño que causan las aves,

reduciendo significativamente su rendimiento. La solución que se ha dado a este problema es sembrar genética con alto contenido de taninos, pero la contrapartida es que ese sorgo, no es fácil de colocar en el mercado, ya que no es buen alimento para aves o porcinos (“monogástricos”). Sí es viable para vacunos, pero la demanda de alimento vacuno es muy variable e impredecible y depende de otros factores.

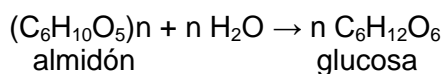
El sorgo grano es un amiláceo; aproximadamente el 70% de su composición es almidón. Las propiedades físico-químicas de los almidones son dependientes de su composición, estructura de polisacáridos y organización supramolecular (formación de fase cristalina y fase amorfa, sus interacciones, el grosor). El almidón es un polímero de glucosa, compuesto por amilosa y amilopectina. La amilosa es básicamente un polímero lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces 1,4. Esta fracción en el sorgo grano representa aproximadamente entre un 20-25%. La amilopectina es un polisacárido ramificado de unidades de glucosa, con enlaces 1,6. Las ramificaciones en este polisacárido aparecen cada aproximadamente 20 o 30 glucosas. Las cadenas lineales de glucosa se unen a través de enlaces 1,4. Esta segunda fracción representa aproximadamente entre un 75-80 % de la composición del almidón de sorgo grano (Ramírez, 2014). En la Figura 1.26 se muestran los esquemas de composición de amilosa y amilopectina.



**Figura 1.26:** Esquema de composición de amilosa y amilopectina

Este carbohidrato, para ser convertido en azúcar fermentable, debe ser previamente hidrolizado. El menor tamaño de partícula del almidón, incrementa la superficie expuesta, lo que maximiza la accesibilidad de los gránulos de almidón a una solución y permite que las partículas no fermentadas puedan separarse fácilmente del líquido al final del proceso. Almidones de alto contenido de amilosa, tienen mayor dificultad para ser hidrolizados. La hidrólisis se puede realizar de dos maneras: hidrólisis enzimática e hidrólisis ácida.

La hidrólisis del almidón implica la ruptura de enlaces glucosídicos y la adición de una molécula de agua por cada enlace hidrolizado.



Las enzimas utilizadas para la hidrólisis del almidón son las amilasas. Este caso en estudio utiliza dos grupos de amilasas:  $\alpha$ -amilasa y glucoamilasa (amiloglucosidasa, AMG). La enzima  $\alpha$ -amilasa es una endoamilasa que hidroliza al almidón en polímeros más cortos de



glucosa. Puede atacar los gránulos intactos de almidón e hidroliza tanto a la amilosa como a la amilopectina, generando huecos al azar en los granos de almidón. La  $\alpha$ -amilasa hidroliza los enlaces  $\alpha$  (1-4) glucosídicos en zonas aleatorias de la cadena principal, incluso a ambos lados de los enlaces  $\alpha$  (1-6). Pero no hidroliza los enlaces 1-6 que se encuentran en los puntos de ramificación de la amilopectina. La AMG actúa sobre los productos liberados en la reacción con la  $\alpha$ -amilasa (Bravo *et al.*, 2006; Polakovič y Bryjak, 2004). El rendimiento teórico de la hidrólisis enzimática es de 1,1 gramos de glucosa por gramo de almidón.

La amilopectina es degradada parcialmente únicamente por la amiloglucosidasa (AMG). La glucoamilasa o AMG ataca los extremos no reductores del sustrato, formando mayor cantidad de glucosa y menor cantidad oligosacáridos.

El grano del sorgo tiene una composición en proteínas de entre el 6 y el 18 %. La susceptibilidad del almidón a la hidrólisis, se ve afectada por la interacción proteína-almidón, con lo cual, mayor hidrólisis de la proteína contribuiría a mejorar la eficiencia de hidrólisis del almidón. Para mejorar la digestibilidad de la proteína, se adicionan enzimas como proteasas que mejoran la eficiencia de la hidrólisis.

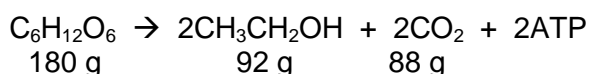
Los taninos, compuestos fenólicos desarrollados por las plantas para protegerse de los herbívoros, forman complejos con macromoléculas como las proteínas del grano, carbohidratos estructurales y el almidón, que disminuyen la digestibilidad de las proteínas y por consiguiente, empeoran la eficiencia de la hidrólisis.

La fermentación alcohólica transforma azúcares en etanol y  $\text{CO}_2$  y es llevada a cabo por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Dicha levadura puede utilizar un metabolismo aerobio o anaerobio para la producción de energía. El tipo de metabolismo predominante depende principalmente de las concentraciones de oxígeno y de glucosa en el medio. En general a altas concentraciones de glucosa predomina el metabolismo fermentativo, donde se da una represión de la respiración por altas concentraciones de glucosa. A bajas concentraciones de glucosa, se activa la ruta fermentativa en ausencia de oxígeno (efecto Pasteur); en presencia de oxígeno la levadura utiliza la ruta metabólica aerobia y no produce etanol.

Reacción aeróbica:



Fermentación etanólica:



*Saccharomyces cerevisiae* convierte la glucosa por la vía fermentativa a etanol y dióxido de carbono produciendo sólo 2 ATP por mol de glucosa metabolizada. El rendimiento teórico, sin considerar la formación de biomasa ni de productos secundarios, es la relación másica estequiométrica entre el etanol producido y la glucosa consumida y tiene un valor de 0.511 g etanol/g glucosa. Cada gramo de glucosa teóricamente puede producir 0.51 g de etanol.

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es capaz de fermentar otros azúcares además de la glucosa, como fructosa y galactosa y también disacáridos como sacarosa y maltosa, pero no fermenta el almidón ni la mayoría de los oligosacáridos formados durante la hidrólisis.

Los valores de rendimiento global de la producción industrial de etanol a partir de sorgo grano de producción nacional, según el estudio de Ramírez (2014), se encuentran entre 86 y 96 %, tal como se observa en la Tabla 1.9.

**Tabla 1.9:** Eficiencias de sacarificación y fermentación, de variedades comerciales de grano de sorgo en el Uruguay

Variedad	Eficiencia global (%)
Flash 10 Plus	86-92
8419	86-94
Flash 1	90-96

Fuente: Ramírez, 2014.

Cada variedad de sorgo, a consecuencia de su composición, tendrá una respuesta diferente al procesamiento industrial en términos de rendimiento y velocidad, y puede requerir de condiciones operativas propias de pretratamiento, temperatura, tiempo de reacción, tipo y dosificación de enzimas.

A continuación se presenta la Tabla 1.10 que muestra composiciones medias de distintas variedades comerciales de sorgo grano producido en Uruguay.

**Tabla 1.10:** Composición grano de sorgo

Variedad	Humedad	Almidón	Proteína cruda	Cenizas	Taninos
Flash Plus 10	11,4	70,7	11,7	1,3	< 0,2
8419	12,8	68,4	11,0	1,2	1,1
Flash 1	12,4	68,0	12,1	1,3	2,0

Valores en porcentaje en peso.

Excepto la humedad todos los valores expresados en base seca.

El contenido de taninos se expresa como porcentaje de equivalentes de catequina.

Fuente: Ramírez (2014)

La siguiente Tabla 1.11 muestra los rangos de valores de muestras experimentales de sorgo grano cultivado en Uruguay.

**Tabla 1.11:** Rango de valores de muestras experimentales grano de sorgo en Uruguay

Variedad	Humedad	Almidón	Proteína cruda	Cenizas	Potasio
Muestras experimentales	10,7 - 16,0	65,0 - 75,0	7,1 - 14,6	1,2 - 2,2	0,2 - 0,3

Valores en porcentaje en peso.

Excepto la humedad, todos los valores en base seca.

Fuente: Informe interno Departamento de Bioingeniería - Facultad de ingeniería, 2014.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Contribuir al uso de nuevas materias primas agrícolas y procesos productivos de bioetanol que favorezcan a la disminución real del uso de combustibles fósiles y de las emisiones de gases de efecto invernadero, aspectos claves para su desarrollo sostenible.

### **2.2. Objetivo específico**

Estimar el uso de la energía y la emisión de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del bioetanol combustible a partir de sorgo grano con el fin de evaluar las mejores estrategias de producción, tanto a nivel agrícola como industrial.

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1. Base conceptual del proceso estudiado

Este trabajo aborda el análisis de ciclo de vida del bioetanol combustible obtenido a partir de sorgo grano. Toma como caso base las condiciones de producción en Paysandú, donde opera una planta industrial establecida desde 2014. El análisis considera el impacto del co-producto DDGS (dried distillers grains with solubles) como alimento animal.

La planta de transformación de sorgo grano a bioetanol, opera 330 días al año, 24 horas/día, con una capacidad nominal de producción de etanol anhidro de 211 m<sup>3</sup>/día, lo que da una producción anual de 70.000 m<sup>3</sup>. Los restantes días son utilizados para realizar limpieza, mantenimiento y eventuales reparaciones de equipos. El co-producto de la fase industrial, DDGS entrega una producción anual de 67400 toneladas.

**Tabla 3.1:** Datos generales de producción

Parámetros	Valores
Capacidad de producción de etanol (†)	211 m <sup>3</sup> /d
Producción anual etanol (†)	70.000 m <sup>3</sup> /año
Tiempo de operación de la planta	330 d x 24h
Capacidad de procesamiento de sorgo grano	6,9 t/h
Pureza de etanol (v/v)	> 99,8%

(†) Expresado en etanol al 99,8%

El análisis se realiza sobre la contribución al calentamiento global, por lo que se estima la cuantificación de los GEI emitidos y sobre la energía fósil utilizada durante el proceso productivo y su relación con la energía final obtenida. Se determinan los siguientes parámetros: la tasa de retorno energético (EROI), el balance neto de energía, las emisiones de GEI netas y las emisiones de GEI evitadas (ver 1.3.2).

#### 3.2. Descripción del proceso productivo

El proceso productivo de bioetanol a partir de sorgo grano, se divide en dos grandes fases: la agrícola que corresponde a la producción del cultivo, y la industrial que corresponde a la transformación del cultivo en etanol.

##### 3.2.1. Fase agrícola

La producción de sorgo grano considera las etapas de producción de semillas, preparación de campo, siembra, cosecha y transporte a la planta industrial, las cuales se describen a continuación.

La producción de semillas se realiza a partir de un cultivo de sorgo grano, pero que se cosecha en diferentes momentos temporales.

Para la recomposición de componentes del suelo, se realiza el barbecho. Esta actividad se efectúa entre la cosecha del cultivo anterior y la próxima siembra; se deja la tierra sin sembrar con el fin de recuperar materia orgánica y humedad. Existe el barbecho químico y el mecánico. En Uruguay, en la mayoría de los casos se realiza barbecho químico, adicionando herbicidas, insecticidas y coadyuvantes. A través de esta actividad los patógenos eventualmente presentes no son capaces de recomenzar su ciclo por no tener hospederos disponibles, con lo cual se evita su presencia para las etapas posteriores. En esta etapa se utilizan tractores y maquinaria agrícola para la aplicación de herbicidas, insecticidas y coadyuvantes, y por lo tanto un consumo de combustibles fósiles para llevar adelante estas actividades.

En la Tabla 3.2 se presenta el tipo de productos químicos y las cantidades utilizadas de producto comercial por hectárea cultivada de sorgo grano durante la siembra.

**Tabla 3.2:** *Productos químicos utilizadas durante la siembra (expresado en cantidad de producto comercial)*

Tipo	Nombre	L/ha cultivada
Herbicida	Glifosato	3
Herbicida	Atrazina líquida	3
Herbicida	Duald Gold	1.5
Coadyudante	Speed wet maxion	0.1
Coadyudante	Agral 90	1
Insecticida	Lorsban	1

*Fuente: ALUR, 2014.*

Luego de la siembra, durante la etapa de fertilización, se aplican los fertilizantes y las cantidades indicadas en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** *Productos químicos utilizadas durante la fertilización*

Tipo	Nombre	kg/ha cultivada
Fertilizante	Fosfato di amónico	100
Fertilizante	Urea	100

*Fuente: ALUR, 2014.*

La cosecha se realiza 100% en forma mecanizada. El rendimiento del cultivo considerado como base es de 4030 kg de grano cosechado por hectárea (Fuente: ALUR, 2014). Este valor concuerda con el valor promedio de los rendimientos publicados por el Anuario Estadístico Agropecuario durante el período 2005-2014 y con el resultado de la Encuesta Agrícola Invierno 2014, realizado por MGAP-DIEA, tal como se observa en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4:** Rendimientos cultivo sorgo grano en Uruguay

<b>Estadísticas retrospectivas</b>	<b>Rendimiento (kg/ha sembrada)</b>
2001	4063
2002	3207
2003	4068
2004	3872
2005	4450
2006	3871
2007	3800
2008	4012
2009	4764
2010	3916
2011	3931
2012	4222
2013	4262
2014	4015
<b>Promedio</b>	<b>4032</b>

*Fuente: Encuesta agrícola Invierno 2014, MGAP-DIEA.*

A los efectos de este estudio se considera la composición de la variedad de grano “Flash 10 Plus” referida en el estudio de Ramírez (2014), “Mejoras en la producción de bioetanol combustible a partir de sorgo grano” realizado por el Departamento de Bioingeniería del Instituto de Química de Facultad de Ingeniería. El contenido de taninos de esta variedad es menor al 0,2 %.

**Tabla 3.5:** Composición grano de sorgo

<b>Variedad</b>	<b>Humedad</b>	<b>Almidón</b>	<b>Proteína cruda</b>	<b>Cenizas</b>
Flash Plus 10	11,4	70,7	11,7	1,3

Valores en porcentaje en peso.

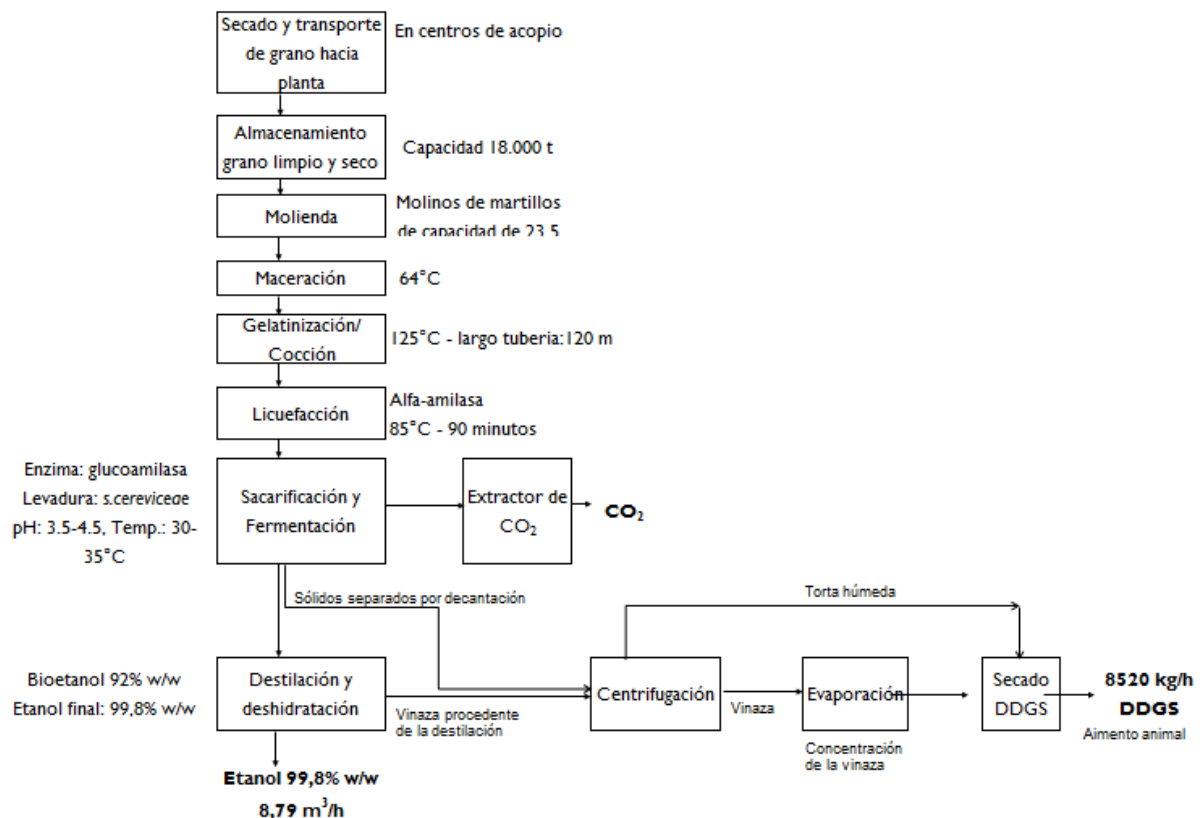
*Excepto la humedad, todos los valores en base seca.*

*Fuente: Ramírez., 2014.*

Una vez cosechado, el sorgo grano es transportado a centros de acopio, donde el grano es limpiado, secado (de 20 a 14% de humedad) y almacenado, y luego se traslada a la planta de transformación a etanol.

### **3.2.2. Fase industrial**

La Figura 3.1 presenta un esquema básico del proceso industrial para la producción de bioetanol a partir de sorgo grano.



**Figura 3.1:** Diagrama básico del proceso industrial.

La planta se abastece de grano limpio y seco y se dispone en silos de almacenamiento, para su posterior molienda. Una vez molido el grano, este es gelatinizado a través de su mezcla con agua a altas temperaturas y adición de  $\alpha$ -amilasa. Luego se procede a la cocción del gránulo a través de un calentador de inyección directa (Jet Cooker) elevando su temperatura a 125 °C. Luego se descomprime la mezcla en un tanque de licuefacción donde se adiciona el resto de la  $\alpha$ -amilasa, para terminar de provocar la hidrólisis enzimática.

Luego de la hidrólisis se inicia la etapa de sacarificación y fermentación simultáneas, donde tiene lugar la sacarificación y la fermentación alcohólica. Para la sacarificación se adiciona la enzima amiloglucosidasa, que degrada parcialmente la amilopeptina. Para la fermentación se adiciona la levadura *Saccharomyces cereviceae*. El dióxido de carbono emitido durante la fermentación es extraído por una columna de lavado de CO<sub>2</sub>.

Una vez finalizada la etapa de fermentación, se procede a transferir el mosto a la unidad de separación del etanol, donde se llevan adelante las etapas de destilación y rectificación y posterior deshidratación del etanol, hasta obtener el alcohol deshidratado de 99,8 % (m/m).

Las vinazas procedentes de la destilación del mosto fermentado y los sólidos separados por decantación de la sacarificación y fermentación simultáneas, pasan por un proceso de centrifugación evaporación y secado para producir DDGS.

### 3.3. Análisis de ciclo de vida

Este trabajo aborda únicamente el análisis de dos aspectos de la sostenibilidad, la emisión de GEI, y la determinación del balance neto en la producción de energía. Los demás

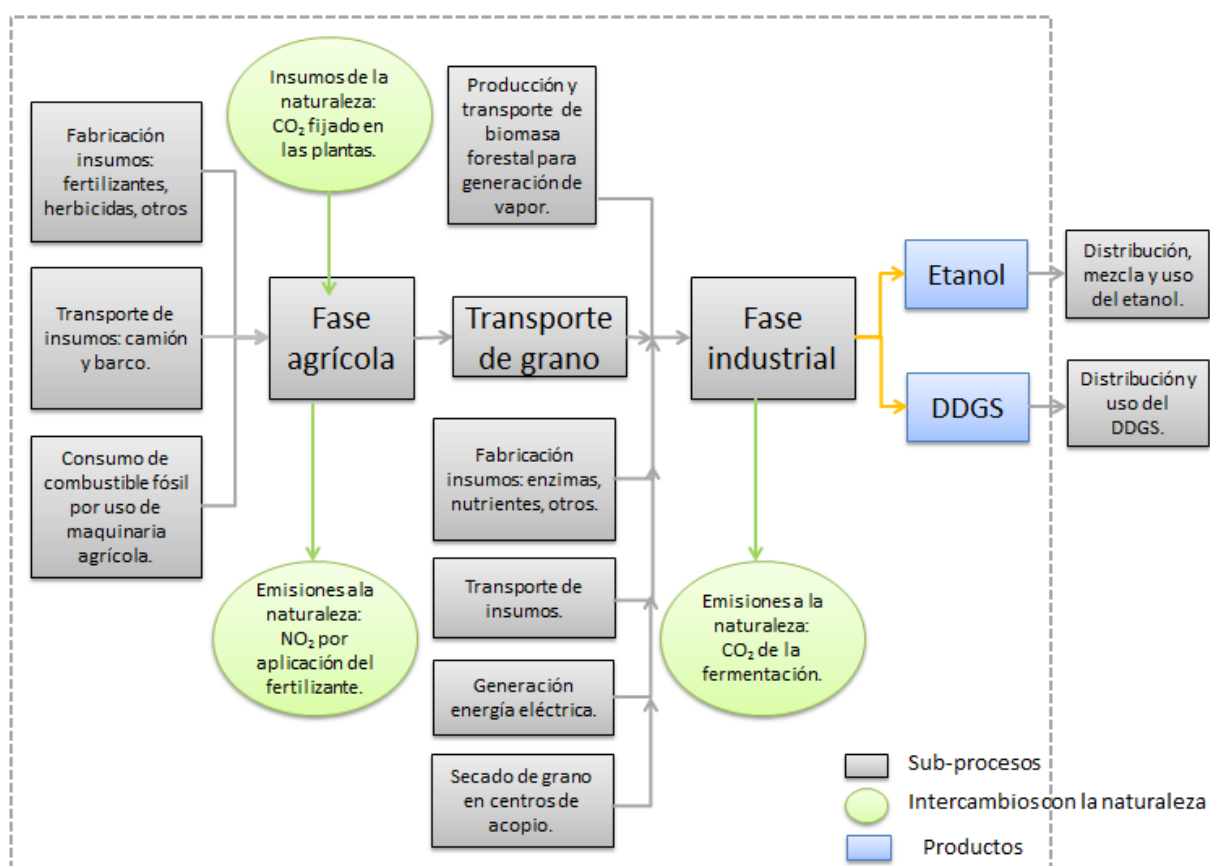
aspectos sociales, económicos y ambientales mencionados en la Tabla 1.3 no serán analizados en este estudio.

A continuación se describen las etapas de uso de la herramienta Sima Pro para la realización del ACV.

### 3.3.1. Definición de objetivos y alcance

El objetivo de este ACV, tal como se definió anteriormente, es estimar el uso de la energía y la emisión de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del bioetanol combustible producido a partir de sorgo grano con el fin de evaluar estrategias de producción, tanto a nivel agrícola como industrial.

Los límites del sistema analizado se presentan en la Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Límites del sistema en estudio

Este ACV se realiza de la “cuna a la puerta” (cradle to gate); inicia con el consumo de energía y emisiones de GEI de la fabricación y abastecimiento de los insumos y materias primas, y finaliza con la obtención del producto terminado y almacenado en la planta industrial, etanol carburante anhidro 99,8% v/v de pureza. Se dejan fuera de los límites del sistema las etapas de distribución, mezcla y consumo final de los productos. Para verificar el impacto de la distribución del etanol a los diferentes centros de mezcla en el Uruguay, se estimó el impacto de la etapa de distribución del etanol en el país (ver ítem 3.5). En Uruguay la ley de agro combustibles establece para el etanol la incorporación de hasta el 5% en las gasolinas de uso automotivo, y por lo tanto estamos frente a una baja incorporación de etanol. Teniendo en cuenta que la eficiencia del motor no varía significativamente cuando se



adiciona etanol en bajas proporciones a la gasolina (Macedo *et al.*, 2008; Morales *et al.*, 2015), es posible comparar en una relación uno a uno en volumen al bioetanol y la gasolina.

**Unidad Funcional:** La unidad funcional de este ACV es física y se define como “1 m<sup>3</sup> de etanol anhidro 99,8% v/v”. Por lo tanto este estudio se realizará en base a la producción de 1 m<sup>3</sup> de etanol anhidro producido y la información de entrada y de salida estará normalizada bajo esta unidad.

**Bienes capitales:** estudios preliminares muestran que la fabricación y mantenimiento del equipamiento, maquinaria e infraestructura en general necesarios para el proceso, tienen una incidencia muy menor en los impactos ambientales y en el balance de energía (CIEMAT, 2013; Macedo *et al.*, 2008). Debido a que la base de datos del programa SimaPro incluye los bienes de capital y no incrementa la complejidad e incertidumbre del análisis, en este estudio han sido considerados los bienes de capital correspondientes a los procesos representados en esta aplicación (ver fichas de procesos en el Anexo III).

**Límite con la naturaleza:** las áreas agrícolas son consideradas parte de la naturaleza, por lo tanto todos los agroquímicos utilizados son tratados como una emisión. El crecimiento de los cultivos está considerado en el análisis, por lo que se debe incluir el efecto del uso de la tierra.

**Regla de corte:** el límite considerado para el análisis de contribución a los impactos ambientales de las entradas y salidas al sistema responde a los propios límites establecidos en el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.2. Se analizan los resultados considerando cada uno de los procesos incluidos en el mismo.

**Límite temporal:** en este estudio se utilizan datos de producción agrícola de los últimos 5 años y los datos teóricos provistos por los técnicos del emprendimiento de Paysandú. El estudio se realizará evaluando la emisión de GEI a 100 años.

**Reglas de asignación:** la cadena productiva del bioetanol producido a partir de sorgo grano entrega más de un producto y por lo tanto se debe establecer el criterio para repartir cargas ambientales y consumos de energía. La norma ISO 14044:2006 establece que siempre que sea posible, se debe evitar la asignación. La forma de evitarla es a través de la expansión del sistema, lo que implica incluir las funciones de los co-productos como un sistema equivalente. Es decir, se calculan las cargas de un sistema equivalente y se resta a las cargas totales del sistema en estudio. En este ACV se considera que el co-producto DDGS tiene un sistema equivalente, que es un alimento animal sustituto. En este estudio se supone el alimento animal sustituto a pasturas artificiales de avena, tomando como base comparativa entre ambos alimentos el contenido de proteína. Considerando una pastura de con un contenido del 20% en proteína (en base seca) y considerando que el DDGS tiene un contenido del 30% de proteínas (en base húmeda), se realiza la siguiente aproximación:

1 kg pastura equivale a 0,2 kg proteína  
1 kg DDGS equivale a 0,3 kg proteína.

Para abastecer de 0,2 kg de proteína con DDGS se requiere:  $0,2 / 0,3 = 0,66$  kg DDGS

Por lo tanto, cada 0,66 kg de DDGS se está evitando la producción de 1 kg de pastura (Ver Capítulo 1.9 del Anexo I).

Estos datos fueron proporcionados por técnicos de ALUR y corroborados en bibliografía (Consorcio Lechero Chile, 2014).

### 3.3.2. Análisis de inventario (SimaPro)

En base a la Figura 3.2 y las características del proceso productivo, se recopiló la información de primer plano (directa) y se identificó la información disponible en la base de datos de herramienta SimaPro para completar los datos de fondo.

Estos datos fueron recolectados con la colaboración de ALUR, algunos proveedores nacionales de máquinas agrícolas y en algunos casos estos datos de primer plano fueron estimados a través cálculos siguiendo recomendaciones de estándares internacionales. En el Anexo I se encuentra la información de primer plano.

Los datos de fondo provienen de las Bases de Datos Ecoinvent 3. Para este estudio se utilizó escenarios de atribución de estas BD (*Ver Anexo II y Anexo III*).

### 3.3.3. Modelización e hipótesis realizadas

A continuación se describen las hipótesis realizadas sobre diferentes aspectos del proceso.

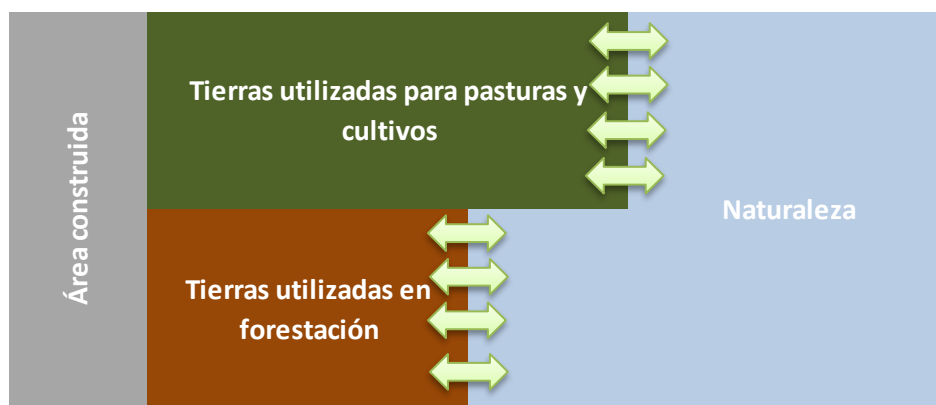
#### *Modelización de la emisión de N<sub>2</sub>O a la atmósfera por aplicación de fertilizantes y el crecimiento del cultivo*

La aplicación del fertilizante al suelo y la descomposición del rastrojo que permanece en el suelo luego de la cosecha, produce emisiones de óxido nitroso. La estimación del óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) emitido a la atmósfera se realiza utilizando el programa GNOC (Global Nitrous Oxide Calculator) desarrollado por JRC (Joint Research Centre). El programa GCNOC fue desarrollado en el marco de un trabajo de Evaluación de la emisión de gases de efecto invernadero de los biocombustibles en la Unión Europea. Esta herramienta combina la metodología del IPCC con el modelo propuesto por Stehfest and Bouwman (2006), y se utiliza para determinar las emisiones resultantes de la aplicación de nitrógeno a través de los fertilizantes utilizados, en este caso fosfato di amónico (18,46,0) y urea (46,0,0).

La emisión es de 1,14 kg de N<sub>2</sub>O por hectárea cultivada, lo que equivale a 301,8 kg de CO<sub>2</sub> eq. por hectárea cultivada (*Ver Capítulo 1.4 del Anexo I*).

#### *Ocupación y transformación de la tierra de cultivo*

Tanto el uso como la ocupación del suelo, traen efectos sobre el ambiente, desplazando y reduciendo el área natural de la tierra. A continuación se presenta un esquema que permite visualizar la incidencia del crecimiento del área utilizada por el hombre.



**Figura 3.3:** Esquema de equilibrio entre área natural y antropizada

Un emprendimiento de este tipo, otorga estabilidad de mercado al cultivo de sorgo grano en el Uruguay. Teniendo en cuenta esto y que hoy en día la superficie agrícola en Uruguay está explotada un 100%, la producción de este cultivo supondría el desplazamiento de otro tipo de cultivo similar. No habrá entonces un cambio directo de uso de tierra, ya que el suelo previamente agrícola, seguirá siendo un suelo de uso agrícola. La incidencia del cambio de uso del suelo será indirecta debido al cambio de uso de tierra en otro sitio por plantar el cultivo que ya no se plantaría aquí en Uruguay. El cambio de uso de la tierra indirecto no será tenido en cuenta en este estudio, debido a que expande los límites del sistema y se debería realizar suposiciones, difíciles de determinar y complejas de analizar (Pineda *et al.*, 2009).

#### *Modelización de la producción de semillas para el cultivo de sorgo grano*

Para modelar el consumo de energía y la carga ambiental que confiere la producción de semillas para la siembra del cultivo, según información técnica recabada se estima que para la plantación de una hectárea de sorgo grano, se requieren 0,06 hectáreas de producción de sorgo grano del cual luego se extraigan las semillas. Por lo tanto, todos los insumos de la etapa agrícola se multiplican por un factor de 1,06. (*Fuente: CIEMAT 2005; Técnicos ALUR 2014*).

#### *Modelización del transporte de insumos y materias primas durante el proceso productivo*

Tanto para los insumos de la fase agrícola como para los de la fase industrial, se tomó como hipótesis de que cada insumo provenía de un único país de origen. Se supuso además un puerto de salida del país de origen y llegada al puerto de Montevideo (*ver Capítulos 1.3 y 1.6 del Anexo I*). También se estimó un recorrido vía carretera para cada uno de ellos. En la Tabla 3.6 se observan los países de origen y los puertos de los que provienen los insumos de la fase agrícola e industrial.

**Tabla 3.6:** Origen de los insumos agrícolas e industriales

Insumos Agrícolas	Origen
Todos los Insumos	China (Shanghái)
Insumos Industriales	Origen
Levadura	EEUU (New York)
Proteasa	Unión Europea (Rotterdam)
Amiloglucosidasa	EEUU (New York)
$\alpha$ -amilasa	Brasil
Urea (nutriente)	Brasil
Antiespumante	EEUU (New York)

Para el transporte del grano de sorgo que abastece a la planta industrial, se estimó un recorrido medio de 70 km (ALUR, 2014).

Respecto a las enzimas industriales y levadura, no se ha conseguido los datos necesarios para representar su fabricación, a pesar de que se supone que son cantidades pequeñas y no se prevé un consumo de energía significativo para su reproducción. Sí se consideró su transporte, y se construyó su escenario utilizando las mismas hipótesis que para el resto de los insumos.

La normativa ambiental instaurada desde agosto de 2008 en el Uruguay, obliga la adopción de la tecnología Euro III (Norma 1998/69/ CE de la Comunidad Económica Europea) en los motores de los vehículos de transporte de peso bruto mayor de cinco toneladas que sean incorporados (CEPAL, 2010, Análisis del sector transporte). Esta característica se toma para construir el escenario de transporte de insumos y materias primas de esta cadena productiva (ver Capítulo III.8 del Anexo III).

#### *Modelización de secado del grano en centros de acopio*

El grano se almacena en centros de acopio (fuera de la planta industrial) que reciben el grano con una humedad promedio de 20% y lo secan hasta alcanzar un 14% de humedad.

De acuerdo a lo sugerido por FAO en su publicación “Secado de granos y secadoras” (FAO, 1996), para el proceso de secado, se consideran consumos energéticos por kg de agua evaporado, que se mencionan a continuación.

- Entalpía de evaporación de agua (libre y ligada): 2510 kJ
- Pérdidas de calor sensible por el aire utilizado: 1255 kJ
- Pérdidas por radiación convección y conducción hacia el exterior: 126 kJ
- Pérdidas por el calor transportado por el grano: 335 kJ

Esto da un total de: 4230 kJ/kg de agua evaporada.

Una tonelada de grano seco, de un 20% de humedad en base seca, contiene 200 kg de agua. Para llegar a un 14 % de humedad en base seca se debe evaporar 60 kg de agua por tonelada de grano. Por lo tanto se requeriría  $60 \times 4230$  kJ por tonelada de grano secado, lo que resulta en 254 MJ.

Para el secado de grano se considera el consumo de combustible fósil fuel oil, basado en los resultados de la “Encuesta de encuesta de consumo y uso de la energía en la industria” (DNE, 2013). Este consumo o entrada al sistema se representa a través de un escenario de uso de este combustible en la herramienta SimaPro (ver Capítulo I.8 del Anexo I).

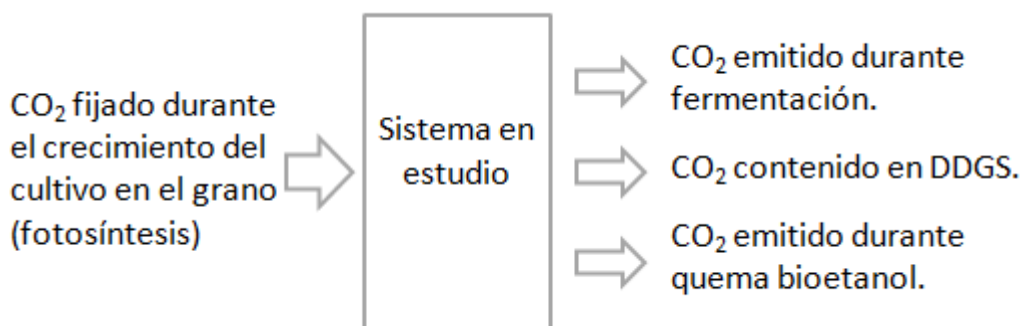
#### *Flujo de CO<sub>2</sub> fijado durante el crecimiento del cultivo*

Durante el crecimiento del cultivo, se consume CO<sub>2</sub> atmosférico debido a la fijación de este gas en el proceso de fotosíntesis de las plantas para formar compuestos de carbono orgánicos utilizados en su crecimiento. Durante el crecimiento de la planta, el CO<sub>2</sub> se fija tanto en la parte del cultivo posteriormente cosechado y retirado del sitio (grano), como en aquellas partes que quedan en el terreno (rastros y raíces).

El CO<sub>2</sub> fijado en el grano, tiene tres destinos finales, tal como se representa en la Figura 3.4:

- Quema del etanol en el motor del vehículo considerado emitiendo entonces las correspondientes cantidades de CO<sub>2</sub>.
- CO<sub>2</sub> liberado en el proceso de fermentación.
- Carbono contenido en los DDGS.

La totalidad del CO<sub>2</sub> fijado en el grano del cultivo, una porción es emitida durante la etapa de fermentación, otra queda contenida en el DDGS y otra se emite durante la combustión del etanol. Las emisiones de estas actividades resultan en una emisión neta muy cercana a cero, y es la que se considera en este análisis de ciclo de vida.



**Figura 3.4:** Flujo de CO<sub>2</sub> fijado en el grano

Respecto a la parte del cultivo que queda en la tierra luego de la cosecha, esta permanece en el suelo, se mineraliza y vuelve a la forma de CO<sub>2</sub>, pero también existe una parte del carbono absorbido por las plantas se transfiere al suelo en forma de rizodepósitos. Estos depósitos son formas inmovilizadas de carbono que no se transforman inmediatamente en CO<sub>2</sub> y por tanto se podrían considerar como una fijación neta de CO<sub>2</sub> atmosférico por el cultivo. Dado que este estudio evaluará los impactos ambientales a 100 años, durante este período de tiempo el carbono retenido en el suelo se vuelve a emitir. Por este motivo no se considera la fijación de CO<sub>2</sub> de la porción de la planta que queda en el suelo (Lal *et al.*, 1997; Macedo *et al.*, 2008; Weil *et al.*, 2004).

### *Modelado del producto evitado por producción del DDGS*

La producción del alimento animal DDGS evita llevar a cabo actividades necesarias para obtener un alimento animal de características similares al obtenido en planta.

Tal como se mencionó en “Reglas de asignación” (ítem 3.3.1), el producto que sustituye el valor nutritivo de las proteínas que contiene el DDGS es la pastura. En este caso de estudio se considera una pastura con un 20% de contenido de proteína.

Los insumos y consumos de combustible de maquinaria agrícola para la producción de esta pastura se pueden ver en el Capítulo I.9 del Anexo I. Se diseña un proceso unitario en SimaPro con estas características.

### *Abastecimiento de energía eléctrica durante la fase industrial*

El abastecimiento de energía eléctrica del proceso productivo, proviene de la red eléctrica nacional. Para cuantificar las emisiones y el consumo de energía fósil proveniente de la producción de energía eléctrica se construye un proceso unitario que represente la generación de energía eléctrica en Uruguay. Para esto se construye un escenario de generación de energía por fuentes. Considerando que la matriz eléctrica de Uruguay tiene un fuerte componente hidroeléctrico y este es un recurso de alta variabilidad, se recomienda estimar la matriz eléctrica considerando un período de 5 años, a fin de suavizar la incidencia de este comportamiento. Para ese estudio se estimó la matriz de generación eléctrica en el período 2009 al 2013, que se presenta en la Tabla 3.7.

Las fuentes de la energía térmica fósil se estima utilizando el mismo criterio que para la matriz secundaria, obteniendo los porcentajes de participación que se presentan en la Tabla 3.8 en el período 2009 al 2013.

**Tabla 3.7:** *Generación de energía eléctrica en Uruguay - Porcentaje de participación por fuente (promedio período 2009-2013)*

<b>Fuente</b>	<b>%</b>
Térmica (Fósil)	23
Térmica (Biomasa)	11
Eólica	1
Hidráulica	65
<b>Generación Total</b>	<b>100</b>

*Fuente: DNE, MIEM, Balance Nacional de Energía 2009 al 2013.*

**Tabla 3.8:** Participación por combustible en la generación eléctrica térmica fósil (promedio período 2009-2013)

Fuente	%
Gasoil	55
Fuel oil	44
Gas natural	1
<b>Generación Total</b>	<b>100</b>

Fuente: DNE, MIEM, Balance Nacional de Energía 2009 al 2013.

La matriz eléctrica de Uruguay está sufriendo grandes cambios debido a la fuerte incorporación de energías renovables, donde se prevé que más del 90 % de la energía eléctrica sea producida a partir de fuentes renovables. En base a la demanda de energía eléctrica del país, y las proyecciones de nuevas centrales de generación de energía, se construye un nuevo escenario de matriz de energía eléctrica, el que se presenta en la Tabla 3.9.

**Tabla 3.9:** Nuevo escenario de generación de energía eléctrica en Uruguay – Porcentaje de participación por fuente

Fuente	%
Térmica (Fósil)	4
Térmica (Biomasa)	9
Eólica	43
Solar fotovoltaica	2
Hidráulica	42
<b>Generación Total</b>	<b>100</b>

Fuente: DNE, MIEM. Política energética nacional.

#### *Modelización de producción y transporte de biomasa forestal para la caldera de generación de vapor*

Para representar las emisiones y consumo energético de la cadena productiva forestal, se recogen datos entregados por técnicos forestales del área. Se crea entonces un proceso unitario que representa la producción de *Eucalyptus grandis*, y luego su aporte en la fase industrial (ver Capítulo I.7 del Anexo I)

Para estimar el consumo y las emisiones ocasionadas por transporte de la biomasa forestal, se realiza la suposición de que todo llega como rolos (que luego son chipeados en planta) y que el recorrido medio desde el lugar de su producción hasta la planta industrial es de de 100 km.

#### *Bienes capitales*

Lo escenarios utilizados para representar las actividades de entrada del proceso productivo, provenientes de la BD de SimaPro incluyen la contribución los bienes de capital

(infraestructura). Por lo tanto, cuando se representa por ejemplo el trabajo realizado por maquinaria agrícola, o fabricación de productos químicos, en la misma base de datos también se consideran los insumos necesarios (materias primas y energía) para la fabricación de los equipos y maquinaria y de la infraestructura en general.

### 3.3.4. Evaluación de Impacto (Sima Pro)

Dado el objetivo de este estudio las metodologías de evaluación elegidas son “IPCC 2013 100a” y “Cumulative Energy Demand”. La primera se centra en el calentamiento global, y por lo tanto en la determinación de los GEI y la segunda metodología cuantifica el uso de energía en toda la cadena productiva. En la Tabla 3.10 se presenta información básica de cada una de estas metodologías.

**Tabla 3.10: Metodología de evaluación de impactos**

Metodología	Categorías de Impacto	Descripción
IPCC	Cambio climático	<p>IPCC 2013 es el sucesor del método del IPCC de 2007, que fue desarrollado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Contiene los factores de cambio climático del IPCC con un plazo de 100 años (GWP100) en kg equivalentes de dióxido de carbono.</p> <p>Cambio Climático de 2013. La base científica física. Grupo de Trabajo I contribución al Quinto Informe de Evaluación del IPCC.  <a href="http://www.climatechange2013.org">http://www.climatechange2013.org</a></p>
CED	Cumulative Energy Demand	<p>Método diseñado para calcular la demanda de energía acumulada (CED), basado en el método publicado por ecoinvent versión 2.0.  <a href="http://www.ecoinvent.org">www.ecoinvent.org</a></p> <p>Cuantifica la energía fósil utilizada durante la cadena productiva. Considera la energía necesaria para la producción de insumos de la cadena productiva.</p>

#### IPCC 2013 – 100a

Se utilizan los factores de emisión de IPCC 2013, sucesor del método del IPCC de 2007, considerando el potencial de calentamiento global a 100 años. Esta metodología fue desarrollada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Con esta metodología se determina la emisión de GEI durante la producción de etanol anhidro, expresando los resultados en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente.



### *Cumulative Energy Demand*

Método para calcular la demanda de energía fósil acumulada (CED) de los procesos. Este método fue desarrollado tomando como base el método publicado por Ecoinvent versión 2.0 y luego fue extendido por la empresa PRé-Consultants tomando materias primas disponibles en la base de datos SimaPro 7. Esta metodología cuantifica el uso de energía fósil durante el proceso productivo.

Se consideran todas las entradas y salidas del sistema; desde la energía consumida para la producción de materias primas en la fase agrícola, como los energéticos utilizados para la fabricación de equipos requeridos en ambas fases. Es importante mencionar que la contribución energética proveniente de la radiación solar necesaria para el crecimiento del cultivo no se contabiliza, sino que se considera únicamente el consumo de energía fósil, lo cual repercute favorablemente en el resultado final.

#### **3.3.5. Interpretación de los resultados**

Durante el proceso de armado y realización de ACV, se observan los resultados y se van comparando con resultados de estudios similares y con datos obtenidos de fabricantes, proveedores y técnicos. La observación y verificación de resultados permite corregir y afinar datos de entrada.

Si bien es recomendable que los integrantes del proceso productivo realicen una revisión de los resultados, en este caso no se realiza de manera formal ni exhaustiva debido al objetivo del presente estudio.

#### **3.4. Análisis del proceso industrial**

Se analiza el proceso industrial y el efecto de ciertos parámetros en el consumo de energía, utilizando la herramienta informática Super Pro Designer®, Intelligen Inc. versión 8.0, software de simulación de procesos industriales.

Para este análisis se utilizó resultados experimentales de composición de sorgo grano obtenidos en el estudio “Mejoras en la producción de bioetanol combustible a partir de sorgo grano” (Ramírez, 2014), para la variedad Flash Plus 10, referida en la Tabla 1.10.

Para simular el proceso, se ingresó las unidades de proceso (disponibles en la base de datos) y los flujos de entrada de materiales y determinadas condiciones operativas. Una vez ingresado estos datos, el sistema dimensiona el tamaño y características de los equipos.

Se utilizó información disponible en la base de datos de SuperPro Designer para diferentes materiales: agua, glucosa, dióxido de carbono, etanol, amoníaco, aire, cenizas, almidón, fibras, proteínas, entre otros. Luego de la selección de las unidades de proceso, se elabora el diagrama de flujo, determinando las entradas y las salidas de todos los componentes a lo largo de todo el proceso.

Una vez ingresada la información, se realiza el balance de masa y energía. La información obtenida en este software, es luego comparada con los datos nominales brindados por ALUR.

Se determina el consumo eléctrico y el consumo de vapor del proceso de un caso base y posteriormente se realizan análisis de sensibilidad de ciertos parámetros; contenido de almidón, eficiencia de la fermentación y relación sólido-líquido.

### **3.4.1. Descripción del proceso simulado**

En este apartado se detallan las características de cada una de las etapas del proceso simulado.

La planta se abastece de sorgo limpio y seco (humedad inferior al 14%) que proviene de diferentes centros de acopio. La planta industrial dispone de tres silos para el almacenamiento de sorgo grano (limpio y seco) de 6.000 toneladas de capacidad cada uno.

#### *Almacenamiento*

Se almacena el grano limpio y seco (humedad por debajo del 14%) en 3 silos de 6.000 toneladas de capacidad cada uno. Desde allí se transporta el grano a la siguiente etapa de molienda.

#### *Molienda*

Previo a la etapa de gelatinización, el grano debe de ser molido. La molienda del grano se realiza en molinos de martillos con una capacidad unitaria de 23,5 t/h, donde se obtendrá una harina de 0,3 mm de diámetro que será trasladado a la sección de mezcla.

#### *Mezcla, gelatinización y cocción – conversión del almidón*

Para la producción de bioetanol a partir de un material amiláceo por fermentación con la levadura *Sacharomyces cerevisiae*, el almidón debe hidrolizarse previamente a unidades de glucosa. En el caso de referencia se utiliza la hidrólisis enzimática.

Antes del agregado de la enzima de hidrólisis, se gelatiniza el granulo de almidón. La gelatinización consiste en mezclar el gránulo con agua y someterlo a altas temperaturas, provocando la ruptura de los enlaces de hidrogeno entre las cadenas poliméricas, debilitando el orden molecular dentro del gránulo. Si se calienta a temperaturas superiores a las de gelatinización, resulta una adicional extracción de amilosa, lo cual es favorable para la etapa de hidrólisis.

La harina procedente de la molienda, se pre mezclará en forma continua con el agua de proceso en un mezclador helicoidal. La mezcla se envía a un tanque de mezclado donde se mantiene a una temperatura debajo de la temperatura de gelatinización (menor a 64°C). En esta etapa se adiciona el 40% del total de  $\alpha$ -amilasa utilizada durante el proceso. Esta mezcla se bombea en forma continua a través de un calentador de inyección directa de vapor (Jet Cooker), elevando su temperatura a 125 °C. El tiempo de retención en el Jet Cooker es de 20 minutos. Finalmente el mosto será descomprimido en un tanque de licuefacción, donde se mantendrá durante 90 minutos a una temperatura de 85 °C. En esta etapa se agrega el 60% restante de  $\alpha$ -amilasa para terminar de provocar hidrolisis enzimática del almidón. Los vapores flash de este tanque serán recuperados en el evaporador de vinazas: de las 8 toneladas hora de vapor que ingresan al Jet Cooker, se recuperan 5 toneladas hora.

A la salida del tanque de licuefacción se encuentran intercambiadores de calor de carcasa y tubos para bajar la temperatura en el entorno de los 35 °C, temperatura de entrada al tanque de fermentación. El agente de enfriamiento es agua de torre.

### *Sacarificación y fermentación*

El proceso de fermentación y sacarificación se realiza en forma simultánea. La enzima de sacarificación es la glucoamilasa o amiloglucosidasa (AMG). La amilopectina es degradada parcialmente únicamente por la AMG. La AMG ataca los extremos no reductores del sustrato, formando mayor cantidad de glucosa y menor cantidad de oligosacáridos.

Las fermentación alcohólica es llevada a cabo por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.

El rendimiento global de sacarificación y fermentación es de 89%, según datos nominales de la planta (Fuente: ALUR, 2014). Este valor concuerda con valores revisados en bibliografía (Ramírez, 2014), presentados en la Tabla 1.9.

Se trabaja con 4 fermentadores que operan de manera de dar continuidad al proceso. Cada fermentador tiene una capacidad volumétrica de 1800 m<sup>3</sup> y el volumen útil es de 1200 m<sup>3</sup>.

Las condiciones de pH y temperatura de fermentación y sacarificación son 3,5-4,5 y 30-35 °C, respectivamente. Los tanques de fermentación mantienen la temperatura a través de enfriadores externos. El tiempo de fermentación es de 48 a 60 horas. Durante la fermentación, se puede incorporar urea como nutriente. Se consume aproximadamente 6,2 kg de urea por cada 1000 litros de etanol. Considerando los días de operación en el año y el volumen de etanol producido por día, se estima 432 toneladas anuales de urea.

Además en esta etapa, según el desarrollo de la fermentación, también debe adicionarse antiespumante. Se estima una adición de 260 kg de antiespumante por día.

Para contribuir a la hidrólisis, se adiciona proteasa. La cantidad utilizada depende del transcurso de la sacarificación y fermentación, y se estima en 60 kg de proteasa por día.

Si bien la levadura a través de su metabolismo produce etanol, este producto es tóxico a partir de ciertas concentraciones. En concentraciones entre 8 y 18% de etanol, se observa inhibición del crecimiento microbiano, disminución del tamaño celular, menor viabilidad y menor consumo de glucosa.

La propagación de la levadura de fermentación se realiza previamente en un tanque separado al cual se le adicionará parte del mosto proveniente de la licuefacción, glucoamilasa y levaduras.

El dióxido de carbono formado en la fermentación se extrae de los tanques de fermentación a través de columna de lavado de CO<sub>2</sub>, donde se recupera el alcohol arrastrado y el CO<sub>2</sub> es emitido a la atmósfera. En esta etapa se generan 100 toneladas de CO<sub>2</sub> por día.

Una vez finalizada la fermentación, se procede a transferir el mosto a la unidad de separación del etanol.

### *Separación de etanol*

La concentración de alcohol en los caldos de cultivos resultantes de los procesos de fermentación es de aproximadamente 10 % (m/m). El etanol anhidro (de calidad 99,8 % (v/v)), se obtiene por destilación y deshidratación.

El etanol producido debe satisfacer las especificaciones establecidas en la norma nacional de Alcohol etílico anhidro combustible - Requisitos, UNIT 1122:2009. En la Tabla 3.11 se presenta las especificaciones establecidas en esta norma:

**Tabla 3.11:** Requisitos técnicos del alcohol etílico anhidro combustible

Propiedad	Unidad	Especificación (límites)	
		Mínimo	Máximo
Grado alcohólico a 20°C	% (v/v)	99,6	
Densidad absoluta a 20°C	kg/m <sup>3</sup>	--	791,5
Contenido de etanol	% (v/v)	99,2	--
Contenido de metanol	% (v/v)	--	0,4
Contenido de agua	% (v/v)	--	0,4
pH	-	6,5	9,0
Acidez total (como ácido acético)	mg/L	--	30
Conductividad eléctrica a 25°C	µS/m	--	500
Contenido de cobre	mg/kg	--	0,07
Contenido de ión cloruro inorgánico	mg/kg	--	10
Aspecto	Límpido y exento de material en suspensión o precipitado		
Color	Incoloro		

Fuente: Norma UNIT 1122:2009.

### Unidad de Destilación

Un aspecto importante del proceso industrial de producción de etanol es el balance hídrico. Exceso de agua agregada al proceso implica mayor consumo de energía para separar el etanol formado. La destilación es una de las etapas de mayor consumo de energía y el mismo aumenta cuando mayor es la cantidad de agua a eliminar.

La unidad de destilación produce aproximadamente 10.700 kg/h de bioetanol combustible 92% m/m a partir del mosto fermentado previamente. Posee dos columnas principales, una de mosto y otra de rectificación.

El mosto fermentado se precalienta en los pre-calentadores y luego ingresa en la columna de mosto. Los vapores de la parte superior de esta columna, se utilizan para calentar el pre calentador del mosto que ingresa. El material sólido se separa y deposita en el fondo del calentador. Esta columna trabaja a una presión inferior a la atmosférica.

El producto proveniente de la parte superior de la columna del mosto, ingresa a la columna de rectificación. Esta columna opera a una presión positiva, con un máximo de 7 atm en la

parte inferior de la columna. La columna de rectificación se calienta con vapor directo y luego suministra energía térmica al reboiler de la columna de mosto.

El líquido libre de alcohol (vinaza), se recoge en la parte inferior de la columna de rectificación, y es procesado (ver "Centrifugación") para obtener el subproducto de alto contenido de proteínas DDGS. El DDGS es alimento para animales, co-producto del proceso de elaboración de bioetanol.

El alcohol rectificado se sobrecalienta y pasa a través de una columna con tamiz molecular para su deshidratación.

### *Enzimas*

La planta contiene un depósito para almacenamiento y dosificación de enzimas y nutrientes al proceso. Estos depósitos son cámaras frigoríficas aisladas del ambiente exterior debido a que el calentamiento y la exposición solar podrían provocar una reducción de la actividad biológica y el deterioro de los mismos.

Se debe disponer de dos tanques de 15 m<sup>3</sup> previstos para las enzimas  $\alpha$ -amilasa y glucoamilasa y su correspondiente sistema de bombeo.

En esta sección también se dispone de un sistema de dosificación de antiespumante a los fermentadores para el control de la formación de espuma dentro de los mismos.

### *Sistema de deshidratación*

Esta unidad está compuesta por dos torres de deshidratación que trabajan en forma paralela y alternada; mientras que una deshidrata el alcohol a sobrepresión la otra se regenera a vacío. Cada una de estas torres contiene un tamiz molecular, compuesto por una criba de zeolita, material sintético de elevada porosidad. La deshidratación consiste en la adsorción selectiva del agua en el lecho de la criba molecular.

El alcohol se obtiene deshidratado 99,8% (v/v) de la torre de criba molecular en forma de vapor, se condensa y se almacena en dos tanques de 80 m<sup>3</sup> de capacidad. La corriente diluida se recircula a la columna de rectificación.

### *Separación de sólidos*

Las vinazas procedentes de la destilación del mosto de cereal fermentado, pasan por un proceso de decantación, centrifugación, evaporación y secado para producir DDGS.

La centrifugación separa a las vinazas en dos porciones, la sólida llamada torta húmeda, y la líquida llamada vinazas claras. Las vinazas claras se almacenan en un tanque para luego pasar a la etapa de "Procesamiento de vinazas".

### *Procesamiento de vinazas*

La vinaza pasa a un evaporador de tres efectos que utiliza como agente de calentamiento vapor vivo y vapor de flashing del proceso (proveniente de la etapa de cocción). La unidad está diseñada para que funcione a contracorriente y tiene una capacidad de 47.000 kg/h de

vinazas claras y es capaz de concentrar desde 9,5% de sólidos totales a 35% de sólidos totales.

Las vinazas claras luego de evaporador son mezcladas con la torta húmeda.

### *Secado de DDGS*

La torta húmeda procedente de la centrifuga y el concentrado proveniente del evaporador, ingresan a un mezclador de alta velocidad para asegurar la óptima absorción del jarabe a la torta. El secado se compone de un sistema múltiple de secadores de vapor rotativos: tubos calentados por vapor proveniente de la caldera. La masa seca de DDGS se recoge en la tolva que está ubicada en la parte inferior del secadero.

El DDGS se obtiene luego de la sacarificación y de la fermentación, con lo cual la mayor parte de los carbohidratos se destinan a la producción de etanol y de dióxido de carbono en las etapas previas. Por lo tanto el contenido de proteínas del DDGS se concentra entre 2 a 3 veces el contenido inicial, obteniendo un producto de aproximadamente 30% de contenido proteico. Se estima una producción de 8520 kg/h. La Tabla 3.12 presenta valores medios de contenido de DDGS.

**Tabla 3.12: Composición DDGS**

	<b>Contenido (%)</b>
Proteínas	23-27
Grasas	5-8
Humedad	8-12
FDA* + FDN**	53-64

*Fuente: ALUR, 2014.*

*\*FDA: fibra digestible ácida*

*\*\*FDN: fibra digestible neutra*

Los gases provenientes del secado de DDGS, pasan por un oxidante térmico regenerativo, donde se oxidan los compuestos combustibles volátiles, completando la combustión y obteniendo dióxido de carbono y agua. La oxidación térmica regenerativa también recupera el calor de los gases de escape.

### *Pelletización del DDGS*

A través de un pelletizador, se transforma el polvo de la torta seca en pequeños gránulos cilíndricos.

### *Sistema de refrigeración del agua de proceso*

La planta contiene 2 torres de refrigeración de tiro inducido a contracorriente que acondicionará el agua de refrigeración del proceso. El agua de refrigeración ingresa a la torre a 40°C y sale al proceso a 22°C aproximadamente.

### *Caldera a biomasa*

La planta tiene dos calderas alimentadas a biomasa forestal (básicamente eucalipto) para la generación de vapor para abastecer el proceso. Puede recibir rolos de 7 metros de largo como máximo y diámetro promedio de 15 cm, los cuales se chipean antes de ingresar a caldera. Tiene una capacidad nominal de producción de vapor sobrecalentado de 33 t/h a 12 atm.

La demanda de vapor es de 55 t/h a 12 atm, para lo cual se requiere 17 t/h de biomasa forestal de 45% de humedad.

#### *Captación y tratamiento de agua*

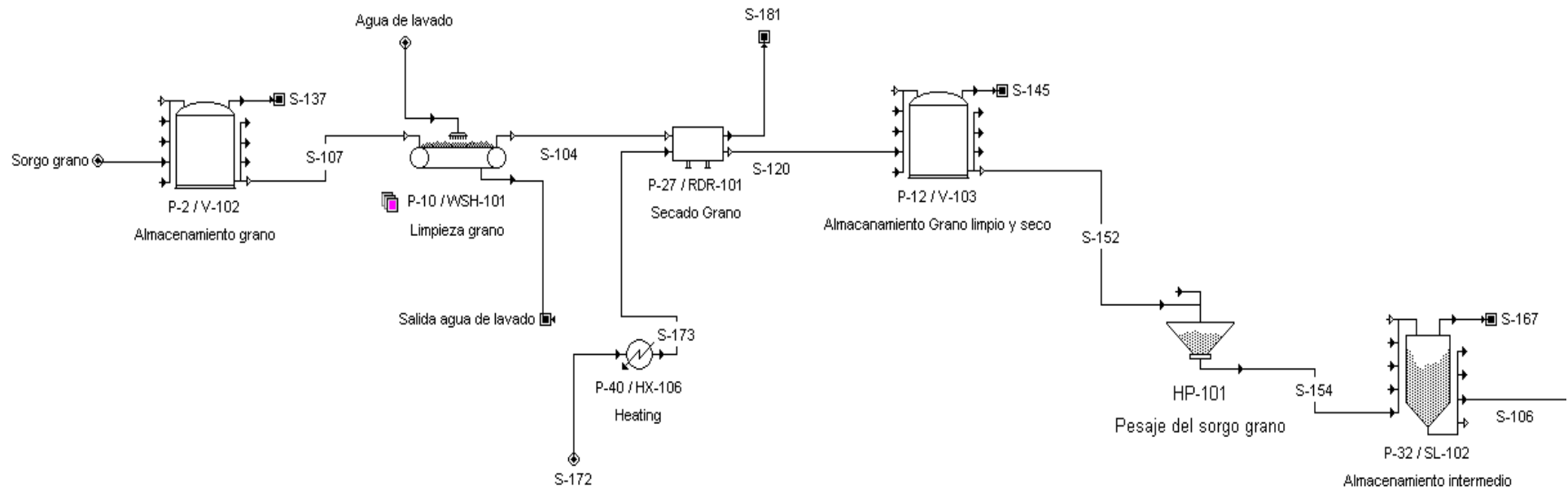
El tratamiento de agua consta de una primera etapa de clarificación-filtración, con una capacidad neta de producción de 200 m<sup>3</sup>/h, y una segunda etapa de ósmosis inversa que permite alcanzar una producción de agua de calidad “agua desmineralizada” de 20 m<sup>3</sup>/h.

El agua a tratar proviene del río Uruguay, y se utilizan bombas de impulsión para trasladar el agua hasta la planta.

El agua proveniente de la clarificación se almacena en un tanque de 2000 m<sup>3</sup>, la cual puede ser posteriormente utilizada para la osmosis inversa, procesos industriales, limpieza, lavado de filtros, etc. Este tanque tiene una solución de hipoclorito de sodio para prevenir el deterioro del agua almacenada. El agua proveniente de la ósmosis inversa se almacena en un tanque de 1000 m<sup>3</sup> para agua mineralizada.

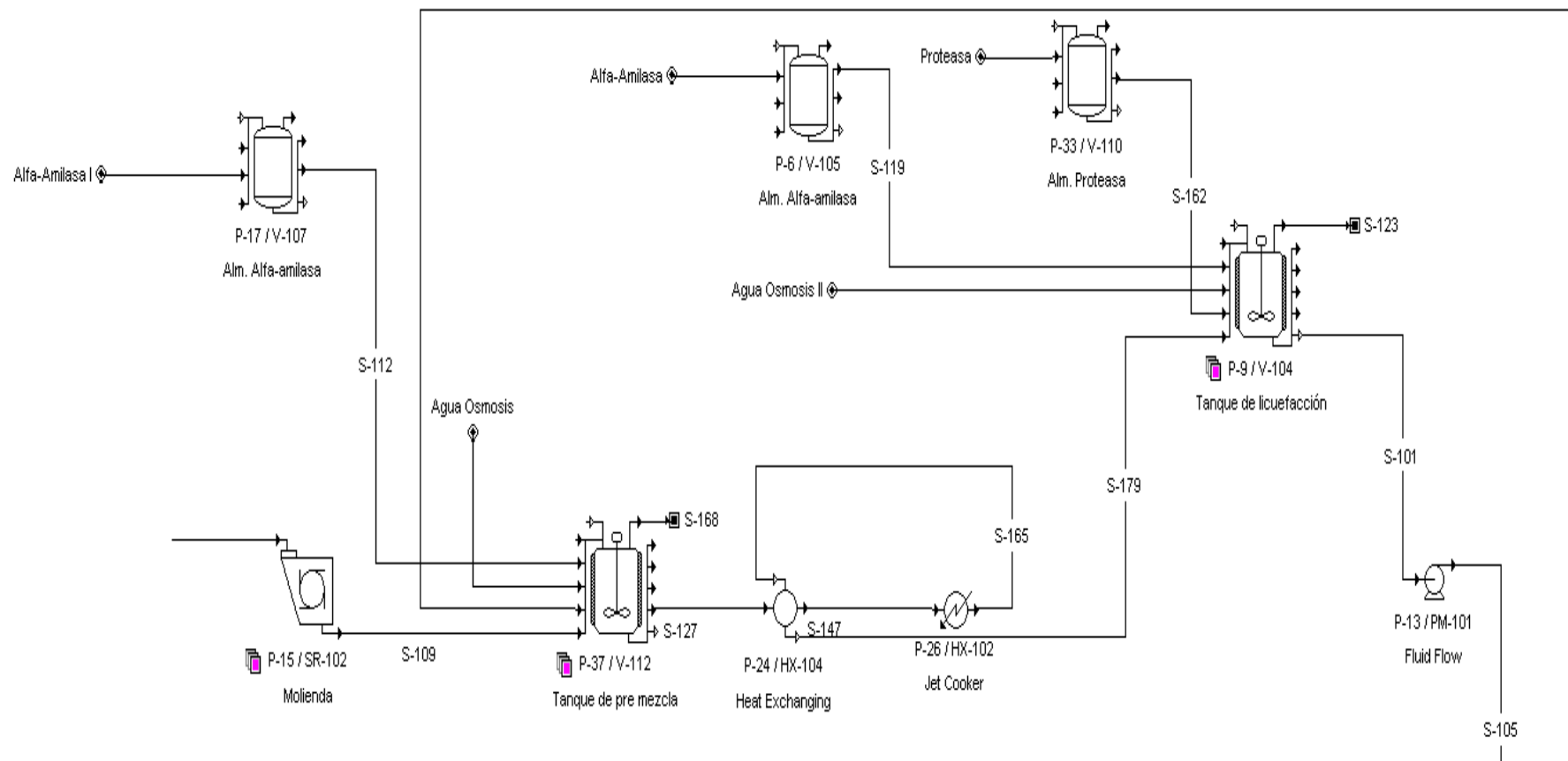
La fuente de información de los datos presentados en este apartado es ALUR, y corresponden a valores nominales entregados en los años 2013 y 2014 y de las siguientes citas bibliográficas: Ramírez, 2014; Macedo *et al.*, 2008.

Las Figuras 3.5 a la 3.9 presentan diagramas simplificados por etapas del proceso simulado.

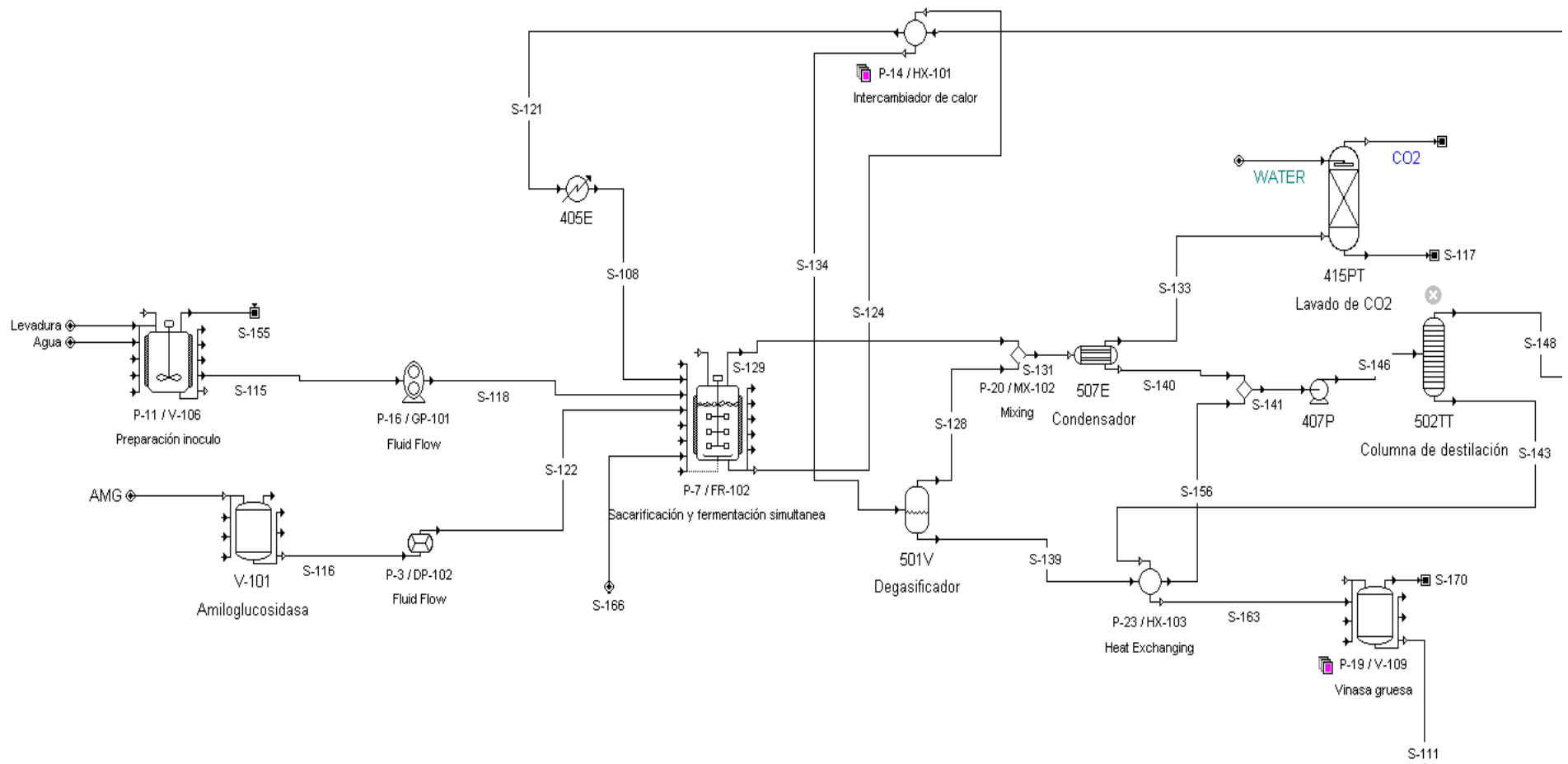


**Figura 3.5:** Diagrama de flujo simplificado de la recepción de sorgo grano, limpieza, secado, pesaje y almacenamiento intermedio, del proceso simulado.

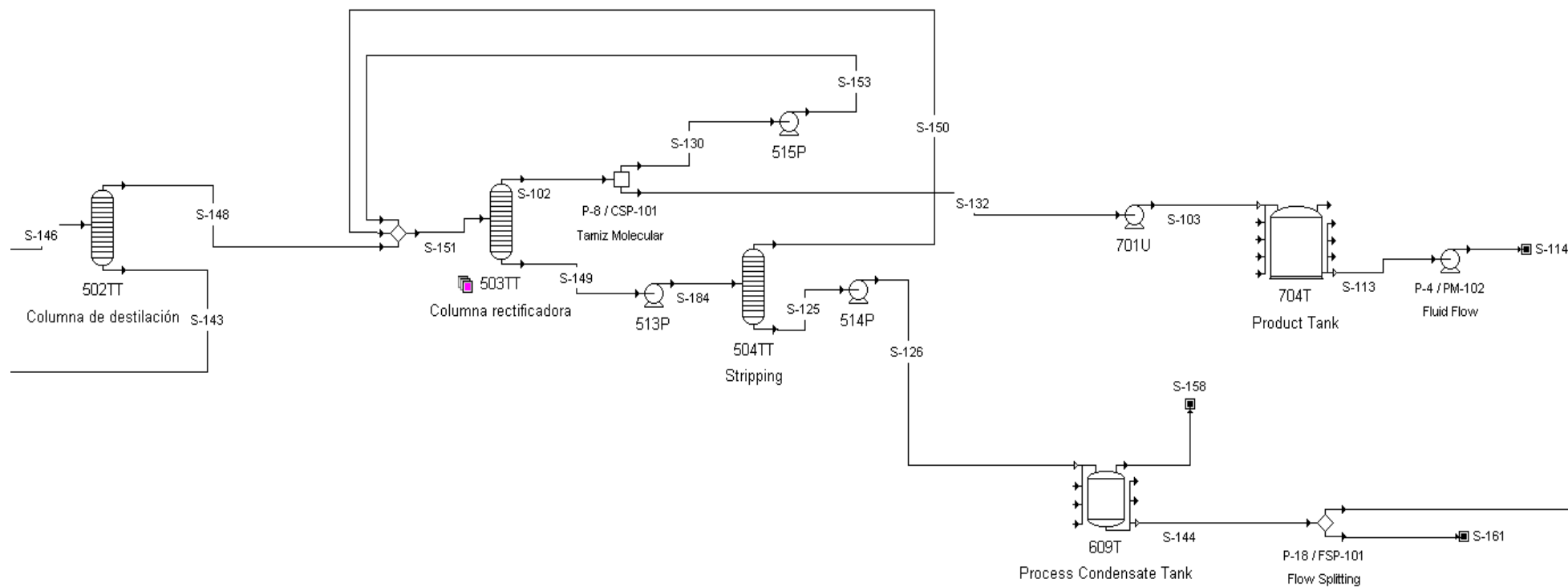




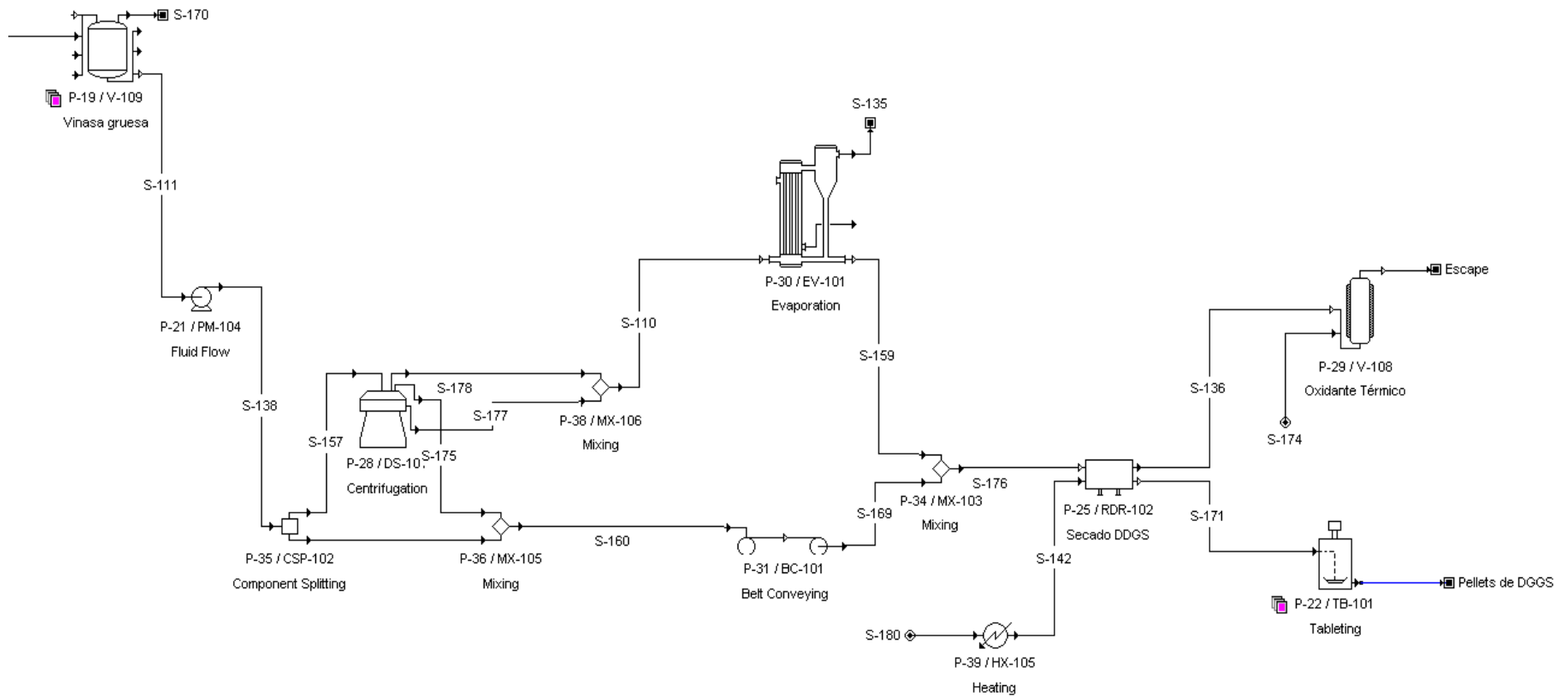
**Figura 3.6:** Diagrama de flujo simplificado de la molienda, mezcla, gelatinización y cocción, del proceso simulado.



**Figura 3.7:** Diagrama de flujo simplificado de la sacarificación y fermentación simultáneas, preparación y entrada a este tanque del inoculo, entrada de la amiloglucosidasa, degasificador, condensador, columna de destilación y lavado de CO<sub>2</sub>, del proceso simulado.



**Figura 3.8:** Diagrama de flujo simplificado de la separación del etanol; columna de destilación, rectificación, stripping, tamiz molecular, y salida de producto final etanol de 99,8% (w/w), del proceso simulado



**Figura 3.9:** Diagrama de flujo simplificado del tratamiento de la vinaza y producción final de DDGS: centrifugación, evaporación, secado de DDGS, pelletización, del proceso simulado.

En la siguiente Tabla 3.13 se presentan características generales de los equipos utilizados en el modelo en Super Pro.

**Tabla 3.13:** Características generales equipos usados en la simulación del proceso

Etapa	Equipo	Descripción	Detalle
Pretratamiento de materia prima	P2 / V-102	Almacenamiento de sorgo grano	Temperatura: 20°C
	P10 / WHS-101	Limpieza de grano	Caudal de agua 500 L/h Capacidad 16 t/h (x2)
	P27 / RDR-101	Secado de grano	Capacidad 0,219 t/h Velocidad de evaporación 20 (kg/h)/m <sup>3</sup> Requerimiento de vapor 2 kg/kg evaporado
	P12 / V-103	Almacenamiento de grano limpio y seco	Temperatura: 20°C
	HP-101	Pesaje del grano	
	P32 / SR-102	Almacenamiento intermedio	Temperatura: 20°C
	P15 / SR-102	Molienda	Capacidad 12,57 t/h
Gelatinización y licuefacción	P37 / V-112	Tanque de pre mezcla	Temperatura : 60°C
	P-24 / HX-104	Intercambiador de Calor	Coficiente de transferencia 1500 W/m <sup>2</sup> K Área de transferencia 854 m <sup>2</sup> Temperatura salida del medio 100 °C
	P26 / HX-102	Jet Cooker	Temperatura: 125 °C Tiempo de residencia: 20 min Coficiente de transferencia 5678 W/m <sup>2</sup> K
	P9 / V-104	Tanque de licuefacción	Temperatura: 85°C Tiempo de residencia: 90 min
Sacarificación y fermentación simultánea	P14 / HX-101	Intercambiador de calor	Coficiente de transferencia 851 W/m <sup>2</sup> K Área de transferencia 100 m <sup>2</sup> Temperatura salida del medio 45°C
	405E	Intercambiador de calor	Coficiente de transferencia 933 W/m <sup>2</sup> K Área de transferencia 1393 m <sup>2</sup> Temperatura salida del medio 30°C
	P7 / FR-102	Tk. Sacarificación y fermentación	Volumen 1450 m <sup>3</sup> Volumen útil 83% Cantidad de fermentadores: 4 Temperatura: 32°C
	P-11 / V-106	Preparación inculo	Temperatura: 32°C Volumen: 2,38 m <sup>3</sup>

Etapa	Equipo	Descripción	Detalle
	V-101	Amiloglucosidasa	Temperatura: 64°C Volumen: 2,63 m <sup>3</sup>
Recuperación de Etanol	501V	Degasificador	Temperatura de operación 81°C Volumen: 7 m <sup>3</sup> Eficiencia transferencia calor 90%
	507E	Condensador	Coefficiente de transferencia de calor 450W/m <sup>2</sup> K Eficiencia de la transferencia 85 % Temperatura de operación 38°C Remueve el 98,1 % etanol (m/m)
	415PT	Lavado de CO <sub>2</sub>	Difusividad fase gas: 123 cm <sup>2</sup> /s Difusividad fase líquida: 13 cm <sup>2</sup> /s
	P-23 / HX-103	Intercambiador de calor	Coefficiente de transferencia 851 W/m <sup>2</sup> K Área de transferencia 100 m <sup>2</sup> Temperatura salida del medio: 45°C
	502TT	Columna destilación	Eficiencia por plato 36% Velocidad lineal por vapor 1.6 m/s Temperatura de operación condensador: 104°C Temperatura de operación reboiler: 115,3°C
	503TT	Columna rectificadora	Eficiencia del plato 40% Velocidad lineal vapor 0.069 m/s Número de platos 39 Temperatura condensador 90°C Temperatura reboiler 114°C
	504TT	Stripping	Eficiencia 80 % Número de etapas 14 Temperatura condensador 90°C Temperatura reboiler 114°C
	P8 / CSP-101	Tamices moleculares	Capacidad 15 t/h Remueve agua restante 97%
	Tratamiento de vinazas / Producción de DDGS	P-19 / V-109	Almacenamiento vinaza gruesa
P35 / CSP-102		Separación de sólidos	Capacidad: 107 t/h
P28 /DS 10X		Centrifuga	Tasa de rendimiento: 90,7 m <sup>3</sup> /h
P30 / EV-101		Evaporador	Capacidad de evaporación: 48047 kg/h
P25 / RDR-102		Secado de DDGS	Componentes volátiles inicial: 79% Componentes volátiles final: 10%
P39 / HX-105		Calentamiento aire	Temperatura inicial: 25°C Temperatura final: 104°C
P29 / V-108		Oxidante Térmico	
P22 / TB-101		Pelletizador	Capacidad: 1586 pellets/s

### 3.4.2. Análisis de sensibilidad de parámetros industriales

El caso base para realizar los análisis de sensibilidad es el descrito en el ítem 3.1.

Para analizar el efecto de ciertos parámetros sobre el proceso industrial, se seleccionó 3 variables que inciden sobre la producción de bioetanol (Guigou, 2013). Estas variables fueron; contenido de almidón, eficiencia de la fermentación y relación sólido-líquido durante la sacarificación y fermentación simultánea.

Como ya fue mencionado, el principal componente de los granos de sorgo es el almidón, el que puede variar entre un 70 a 80% de la materia seca del grano (Rooney *et al.*, 1986). Para el análisis de sensibilidad de la composición de almidón se tomó el rango establecido en la Tabla 3.15.

La relación sólido/líquido es un aspecto que juega un rol importante en el consumo de energía durante el proceso industrial. Una relación alta podría eventualmente disminuir la eficiencia de la fermentación, pero la siguiente etapa de separación del etanol se consumiría menos energía debido al menor contenido de agua del producto resultante en la fermentación. En la Tabla 3.14 se presenta la concentración de etanol al finalizar las etapas de sacarificación y fermentación simultáneas para las tres relaciones sólido-líquido seleccionadas para este estudio.

**Tabla 3.14:** Concentración de etanol a la salida del fermentador

Relación sólido-líquido	Etanol (g/L)
1:5	62
1:4	77
1:3	87

*Fuente: Ramírez, 2014.*

Se estudió un parámetro por vez, dejando fijos los valores de los demás parámetros. En la Tabla 3.15 se muestran los valores que se mantuvieron constantes, correspondiente a la fila de caso base, y los valores de los parámetros que se variaron en cada análisis.

**Tabla 3.15:** Parámetros y valores de sensibilidad

Valor estudiado	Factor		
	Eficiencia fermentación (%)	Contenido de almidón (%)	Relación sólido-líquido
Caso base	89	72	1:4
Valor menor	82	60	1:3
Valor mayor	95	80	1:5

### 3.5. Estudio de sensibilidad global

Se evaluó el impacto de la variación de los siguientes parámetros o actividades sobre los resultados del ACV realizado:

- Manejo del suelo en la fertilización
- Rendimiento del cultivo (kg cultivo/ ha)
- Distribución del etanol a los centros de mezcla
- Nuevas fuentes para la generación de energía eléctrica (ver Tabla 3.9)

Respecto a la fase agrícola, la actividad de fertilización es responsable de un porcentaje de la emisión de GEI de la cadena productiva. Por tanto resulta interesante estudiar qué impacto tiene, por ejemplo, incorporar modificaciones en el manejo del suelo, que permitan la disminución del uso de fertilizantes, y contribuyan a mejorar el balance de energía y de emisiones.

Respecto al rendimiento del cultivo se analizará el impacto que tiene este en los resultados de emisiones y balance de energía.

En la Tabla 3.16 se presenta los valores de los niveles de uso de fertilizantes y rendimiento de cultivo, utilizados para evaluar el impacto de estos factores en los resultados.

**Tabla 3.16:** *Parámetros de sensibilidad global*

Valor estudiado	Factor	
	Fertilizante - urea (kg/ha)	Rendimiento del cultivo (kg/ha)
Caso base	100	4030
Valor menor	50	3000
Valor mayor	80	5000

#### *Análisis de impacto de la Inclusión de la distribución de Etanol hasta los centros de mezcla*

Para analizar el impacto del transporte del bioetanol a los 5 centros de mezcla, ubicados en las plantas de distribución de combustible de ANCAP, se estiman distancias medias desde Paysandú a los centros de acopio, tal como se indica en la Tabla 3.17.

**Tabla 3.17:** *Distancia desde Paysandú hasta los centros de mezcla*

Centro de mezcla	Distancia (km)	Porcentaje de etanol
La Tablada	370	80
Juan Lacaze	330	5
Paysandú	0	5
Durazno	240	5
Treinta y Tres	360	5

*Fuente: ALUR, 2014.*



Se incluirá entonces en los resultados el consumo de energía fósil y las emisiones de GEI por el transporte del biocombustible para ser mezclado con la gasolina.

## 4. Resultados y Discusión

Se presentan los resultados obtenidos en el balance de energía y emisión de gases de efecto invernadero de los diferentes escenarios analizados.

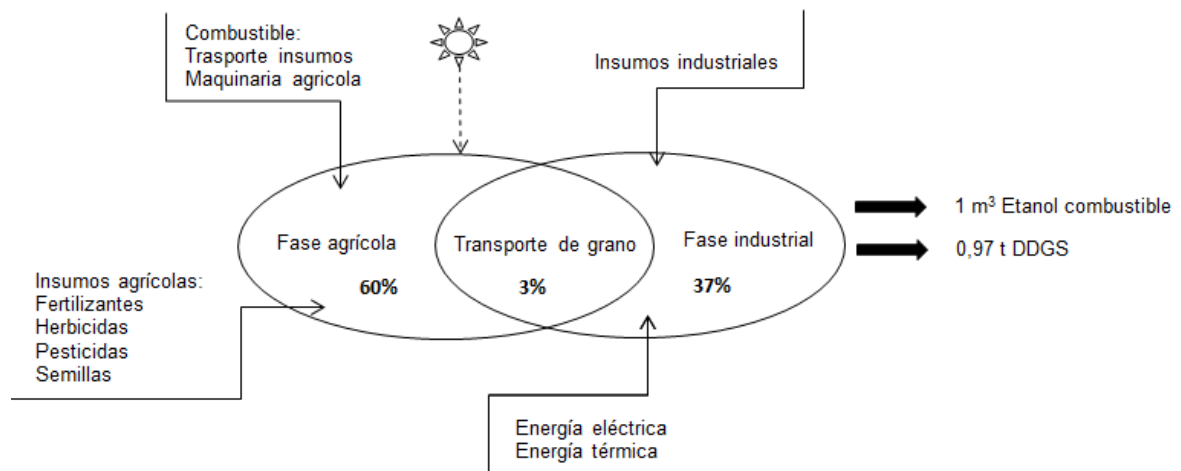
### 4.1. ACV para el uso de energía

La Tabla 4.1 presenta el consumo de energía en MJ, desglosado por fase y por actividad dentro de cada fase. Como energía de salida se considera la energía contenida en un m<sup>3</sup> de bioetanol medido por su poder calorífico inferior, y la energía que se evita en la producción de pasturas para alimento animal, debido a su sustitución por el DDGS producido.

El consumo de energía evaluado, tal como lo establece el método “Cumulative Energy Demand” corresponde a la energía fósil consumida durante el proceso y corresponden a los valores presentados en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Balance de Energía – Entradas y salidas de energía

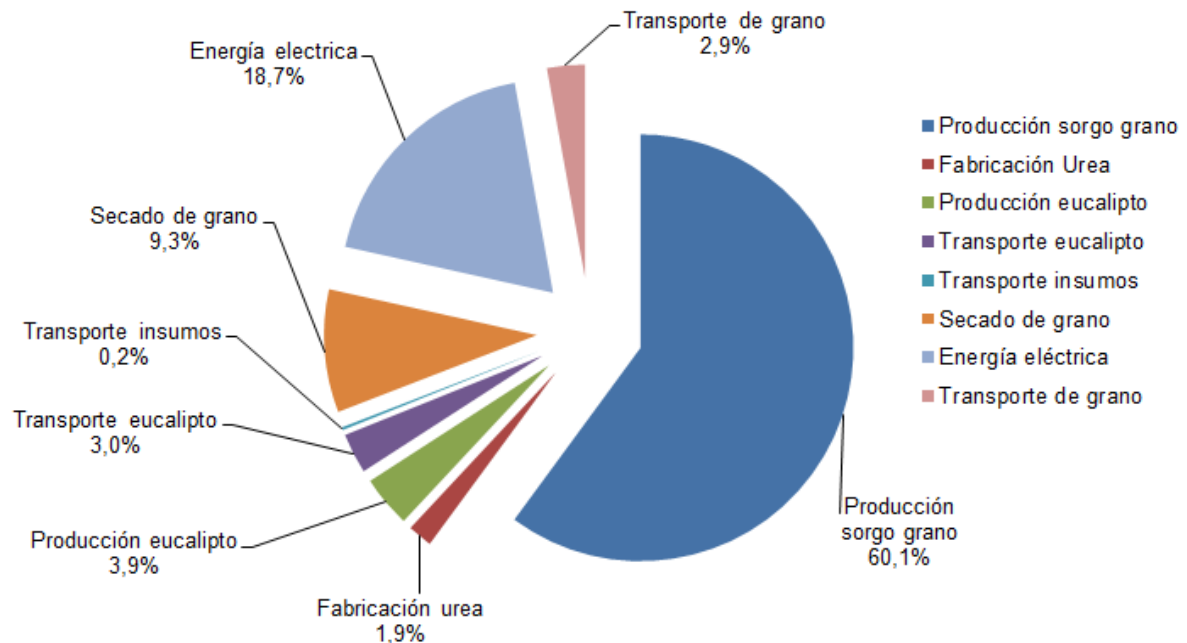
Actividad/Producto	Entrada de energía (MJ/m <sup>3</sup> etanol)	%	Salida de energía (MJ/m <sup>3</sup> etanol)
<b>Fase agrícola</b>			
Fabricación de fertilizantes	2670	29,9	
Fabricación de herbicida	1124	12,6	
Fabricación de insecticida	128	1,4	
Transporte insumos (combustible)	664	7,4	
Manejo agrícola (combustible)	775	8,7	
<b>Total fase agrícola</b>	<b>5362</b>	<b>60,0</b>	
<b>Transporte materia prima</b>			
Transporte grano (combustible)	<b>257</b>	<b>3,0</b>	
<b>Fase industrial</b>			
Producción eucaliptos	349	3,9	
Transporte eucaliptus (combustible)	271	3,0	
Transporte insumos (combustible)	19	0,2	
Energía eléctrica (primaria)	1664	18,7	
Secado de grano	830	9,3	
Fabricación de urea (para fermentación)	167	1,9	
<b>Total fase industrial</b>	<b>3302</b>	<b>37,0</b>	
<b>Producto evitado</b>			
Producción pasturas (alimento animal)			1280
<b>Energía producida</b>			
Etanol 99,8% v/v			21137
<b>TOTAL</b>	<b>8921</b>		<b>22417</b>
<b>Salidas/Entradas (EROI)</b>		<b>2,5</b>	



**Figura 4.1:** Balance de energía (MJ /m³ etanol)

La salida de energía del proceso es 2,5 veces mayor a la energía fósil consumida durante el mismo. El balance de energía da un saldo positivo, de 13,5 GJ por m³ de etanol producido. La Figura 4.1 muestra de forma más simplificada la contribución de cada una de las etapas principales del proceso.

A continuación se presenta la distribución de los aportes por cada actividad durante todo el proceso productivo.

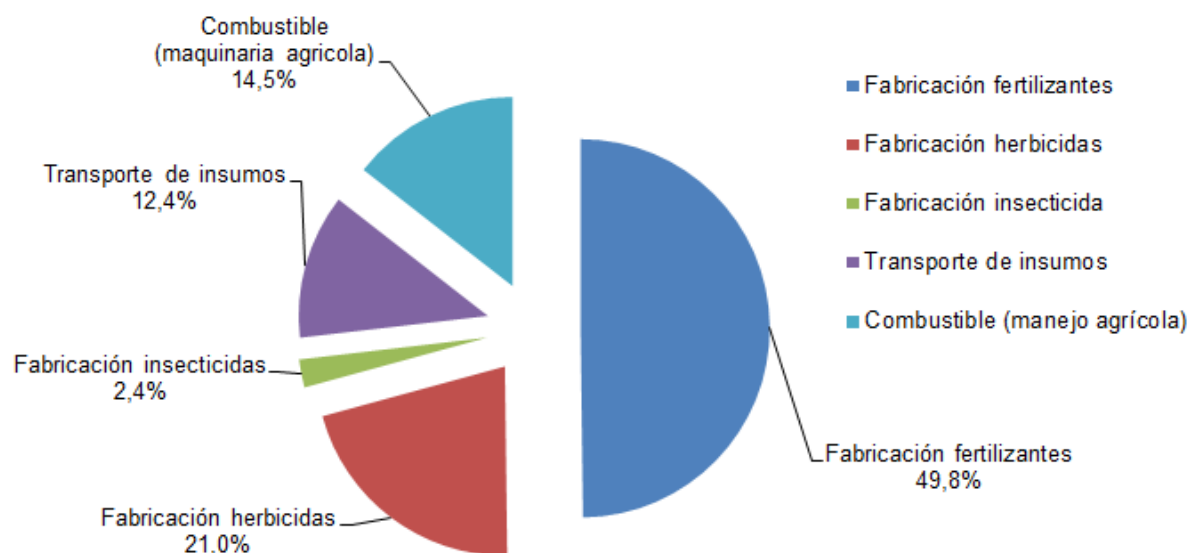


**Figura 4.2:** Consumo de energía por actividades durante el proceso productivo

El consumo de energía mayor se da durante la fase agrícola durante la producción del cultivo de sorgo grano, representando el 60% del total.

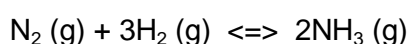
El eucalipto es la materia prima para la generación de vapor en caldera. Por lo tanto, la energía consumida para su producción y transporte que se observa en la Figura 4.2, representan el consumo de energía para la generación de vapor que abastece el proceso industrial.

Si se analiza la contribución en el consumo de energía de cada actividad de la fase agrícola, la que se presenta en la Figura 4.3.



**Figura 4.3:** Contribución de consumo de energía por actividad durante la fase agrícola

Dentro de la fase agrícola, lo que conlleva el mayor consumo de energía fósil es la fabricación de fertilizantes, llegando casi al 50% del total. Los fertilizantes urea y fosfato de di amónico tienen alto contenido de amonio el cual es sintetizado a través del método Haber-Bosch. El proceso de Haber – Bosch es la reacción de nitrógeno e hidrógeno gaseosos para producir amoníaco.



Alrededor del 78,1% del aire que nos rodea es nitrógeno molecular,  $\text{N}_2$ . El elemento como molécula diatómica gaseosa es muy estable y relativamente inerte debido al enlace triple que mantiene los dos átomos de nitrógeno fuertemente unidos. Como la reacción natural es muy lenta, se acelera con un catalizador de hierro y óxidos de aluminio y potasio permitiendo que el equilibrio se alcance con mayor rapidez. Los factores que aumentan el rendimiento, al desplazar el equilibrio de la reacción hacia los productos (Principio de Le Châtelier), son las condiciones de alta presión (150-300 atm) y altas temperaturas (400-500°C). El hidrógeno utilizado en este proceso se obtiene a partir de gas natural o metano, el cual se hace reaccionar con vapor de agua en presencia de catalizadores, como el óxido de níquel. Se trata de un proceso muy intensivo en el consumo de energía.

El transporte de insumos y el combustible utilizado para las operaciones agrícolas son actividades que también tienen peso en el total de la fase agrícola, representando 12,4 y 14,5% respectivamente.

Se realizó el estudio de sensibilidad para analizar el impacto de la modificación de ciertas variables en el resultado de la relación entre energía obtenida sobre la energía consumida.

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad sobre el global del proceso por la afectación del rendimiento del cultivo en el cociente EROI.

**Tabla 4.2:** EROI obtenidos variando el rendimiento del cultivo

Inputs/Outputs Energía	Rendimiento (kg/ha)		
	3000	4030	5000
Energía entrada (MJ/m <sup>3</sup> )	11149	8921	7662
Energía salida etanol (MJ/m <sup>3</sup> )	21137		
Productos evitados (alimento animal) (MJ/m <sup>3</sup> )	1280		
<b>Salida / Entrada = EROI</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>2,9</b>

Del análisis de sensibilidad respecto al rendimiento del cultivo, se observa que el impacto en los resultados es significativo, elevando la tasa EROI un 25% por arriba de su valor inicial, al mejorar el rendimiento a 5000 kg por ha.

Debido al gran peso de los fertilizantes en la contribución de la energía consumida durante el proceso productivo y considerando la posibilidad de utilizar fertilizantes más eficientes que permitan reducir su cantidad utilizada, se realizó un análisis que evalúa la afectación en el resultado de EROI. Los resultados se presentan a en la Tabla 4.3, donde se observa que el EROI mejora nuevamente en un 16% al utilizar la mitad de la urea que se utiliza en el caso base.

**Tabla 4.3:** EROI obtenidos variando la cantidad de urea utilizada

Inputs/Outputs Energía	Uso de fertilizante urea (%)		
	100	80	50
Energía entrada (MJ/m <sup>3</sup> )	8921	8491	7847
Energía salida etanol (MJ/m <sup>3</sup> )	21137		
Productos evitados (alimento animal) (MJ/m <sup>3</sup> )	1280		
<b>Salida / Entrada = EROI</b>	<b>2,5</b>	<b>2,6</b>	<b>2,9</b>

A continuación se presenta el resultado al considerar el nuevo escenario de generación de energía eléctrica en el Uruguay (ver Tabla 3.9).

**Tabla 4.4:** Sensibilidad por modificación de escenario de generación de energía eléctrica

Inputs/Outputs Energía	Generación energía eléctrica	
	Actual	Nuevo escenario
Energía entrada (MJ/m <sup>3</sup> )	8921	6995
Energía salida etanol (MJ/m <sup>3</sup> )	21137	
Productos evitados (alimento animal) (MJ/m <sup>3</sup> )	1280	
<b>Salida / Entrada = EROI</b>	<b>2,5</b>	<b>3,2</b>

El cambio en la matriz energética, bajo las suposiciones realizadas, impacta fuertemente en los resultados de balance de energía, pasando de 2,5 a 3,2 en términos de tasa de retorno de energía EROI.

## 4.2. Análisis del proceso industrial

La energía consumida en la fase industrial se presenta en la Tabla 4.5 y es el resultado entregado por el programa SuperPro Designer versión 8, el cual arroja datos de consumo de energía secundaria: vapor y energía eléctrica.

La primera verificación realizada es la comparación entre los valores arrojados por el simulador de procesos SuperPro y los datos nominales de planta entregados por técnicos de ALUR. En la siguiente Tabla 4.5 se presenta la comparación entre consumo de vapor y energía eléctrica.

**Tabla 4.5:** Energía consumida en la fase industrial

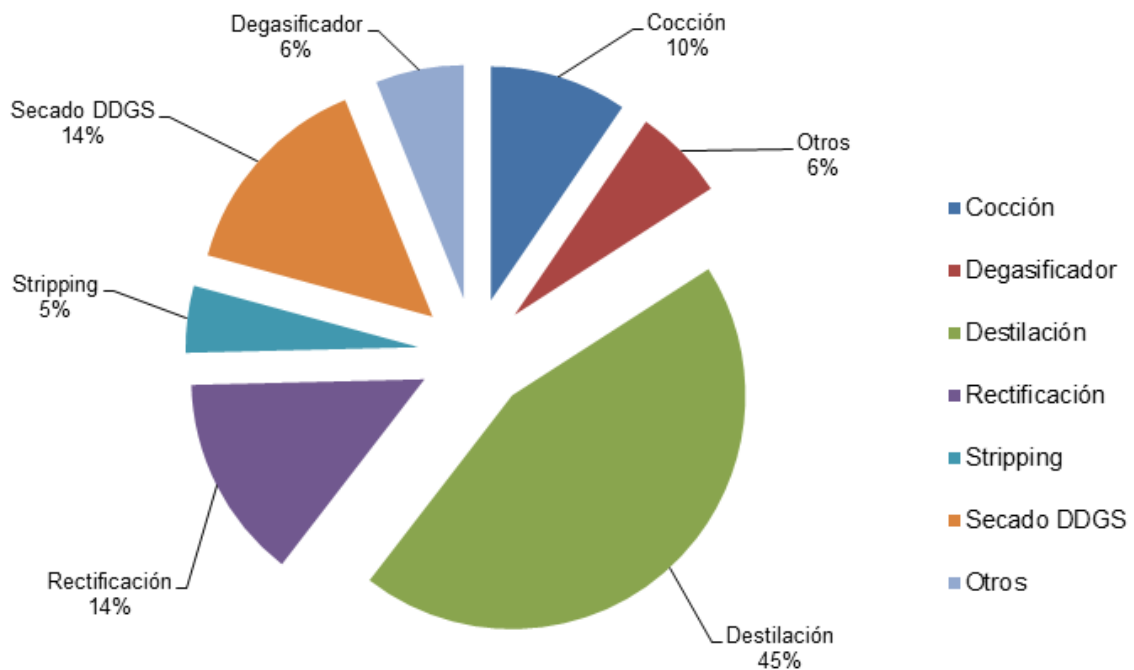
	Dato industrial	Proceso modelado SuperPro
	GJ/m <sup>3</sup>	
Vapor	11,2	8,9
Energía eléctrica	2,0	0,9

Los valores presentados en la Tabla 4.5 son del mismo orden, teniendo en cuenta que el proceso simulado no corresponde exactamente al proceso industrial existente. No obstante, el modelo puede ser considerado válido para evaluar la contribución relativa de cada etapa al consumo total de energía y realizar el estudio de sensibilidad con relación a la incidencia de la variación de algunos parámetros del proceso como el contenido de almidón del grano de sorgo, la eficiencia de fermentación y la relación sólido líquido.

La distribución del consumo de energía en la fase industrial se presenta en la Tabla 4.6, donde se puede observar que se atribuye casi en 70% a la etapa de separación del etanol.

**Tabla 4.6:** Contribución de componentes de la fase industrial según SuperPro

Etapa	GJ/m <sup>3</sup>	%
Cocción	0,9	10
Degasificador	0,6	6
Destilación	4,4	45
Rectificación	1,4	14
Stripping	0,5	5
Secado DDGS	1,4	15
Otros	0,6	6
<b>Total</b>	<b>9,8</b>	<b>100</b>



**Figura 4.4:** Contribución de componentes de la fase industrial según SuperPro

Tal como se observa en la Tabla 4.6 y Figura 4.4, la mayor parte del consumo proviene de la separación del etanol, luego de la etapa de fermentación y sacarificación. El consumo en etapas está asociado casi en su totalidad al consumo de vapor.

Se analizó el impacto de los parámetros industriales mencionados anteriormente; contenido de almidón del grano, la relación sólido líquido con la cual se trabaja al comenzar la fermentación y sacarificación simultánea, y la eficiencia de la fermentación. El resultado evaluado es la variación de la energía consumida por  $m^3$  de etanol producido, al modificar estas tres variables.

La Tabla 4.7 presenta los resultados obtenidos de energía consumida en la fase industrial, al modificar el contenido de almidón del grano y la eficiencia de la etapa de fermentación de etanol según lo indicado en el capítulo de "Materiales y métodos".

**Tabla 4.7:** Energía consumida en la fase industrial

	Contenido de almidón en el grano (%)		
	60%	72% (caso base)	80%
Energía consumida fase industrial ( $GJ/m^3$ )	11,7	9,8	8,9
	Eficiencia de la fermentación		
	85%	90% (caso base)	95%
	10,4	9,8	9,4

Tal como se esperaba, se observa que a mayor contenido de almidón la energía consumida por  $m^3$  de etanol producido es menor. Esto se debe a que si bien la energía consumida

durante el proceso productivo es similar en los tres escenarios, el rendimiento final del proceso es mejor debido a que se tiene mayor contenido de almidón que se transformará glucosa y luego en etanol durante la sacarificación y fermentación.

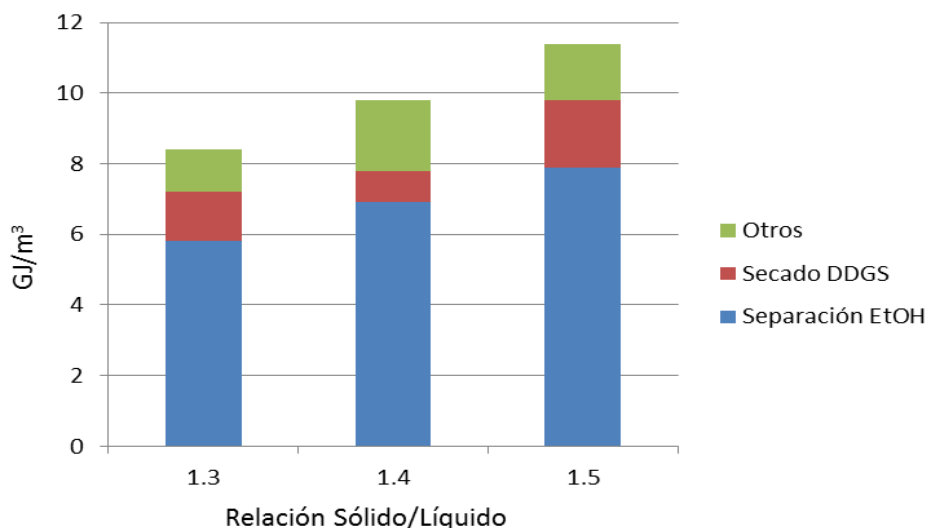
Respecto al impacto que tiene la eficiencia de la fermentación, se observa algo similar a lo mencionado anteriormente. Cuanto mayor es la eficiencia de la fermentación mejor rendimiento productivo global se obtiene, con lo cual la energía consumida por m<sup>3</sup> de etanol es menor.

Se realiza un análisis de la variación de la relación sólido líquido durante la sacarificación y fermentación simultáneas, y los resultados se presentan en la Tabla 4.9 a continuación:

**Tabla 4.8:** Energía consumida en fase industrial – variable relación sólido/líquido

	Relación Sólido / Líquido		
	1.3	1.4 (caso base)	1.5
<b>Separación de etanol</b>	5,8	6,9	7,9
<b>Secado de DDGS</b>	1,4	0,9	1,9
<b>Energía consumida TOTAL en FI (GJ/m<sup>3</sup>)</b>	8,4	9,8	11,4

Lo mismos resultados de la Tabla 4.8 se presentan la Figura 4.5, donde a través de un gráfico de barras se visualiza el efecto de la relación sólido líquido en el consumo total de energía.



**Figura 4.5:** Consumo de energía en fase industrial según relación sólido/líquido

La relación sólido líquido afecta a la energía consumida durante el proceso productivo, donde la diferencia significativa desde el punto de vista energético se da en el consumo de esta destinada a la separación del agua del producto final. Se observa que los mayores consumos se dan durante la separación del agua del mosto proveniente de la fermentación y durante el secado del DDGS.



El efecto de estas variables, afectan entre un 10 y un 15% del consumo de energía en la fase industrial, y un 5 y 8% del total consumido en todo el proceso: industrial y agrícola.

A fin de comparar y relativizar los resultados de este estudio con otros análisis similares realizados con anterioridad, se presenta una tabla comparativa, donde se puede observar resultados de diversos estudios, de procesos productivos que parten de diferentes materias primas para la obtención de bioetanol combustible.

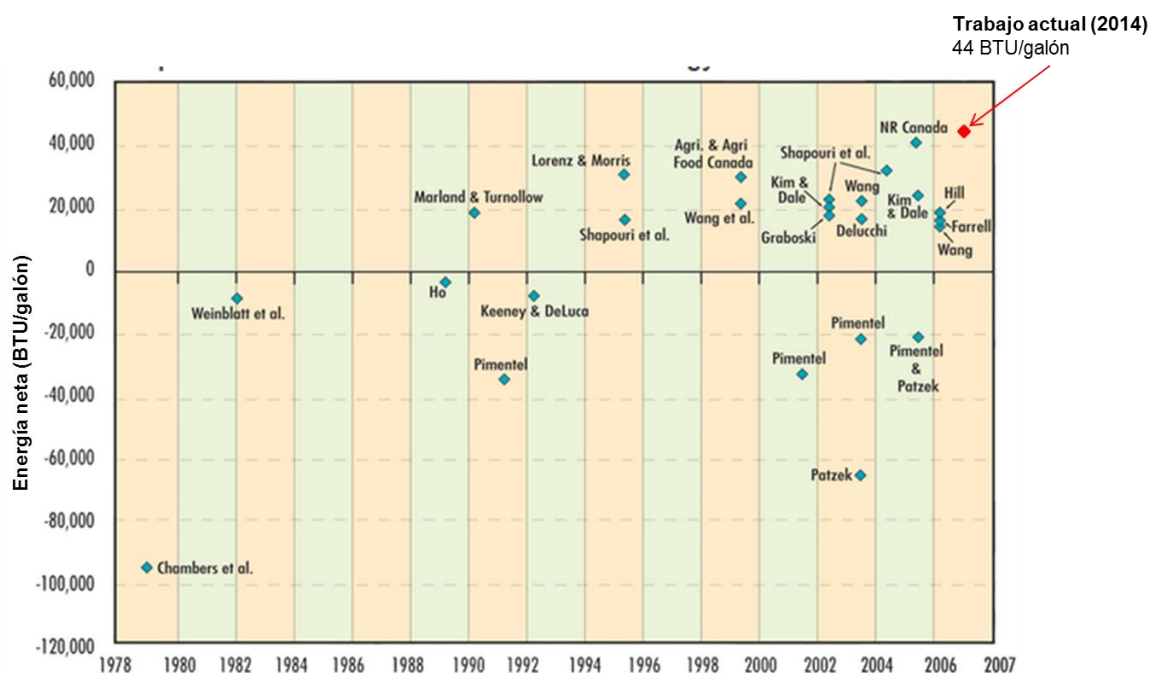
**Tabla 4.9:** Comparación de valores de energía neta consumida y tasa EROI de diversos estudios para diferentes materias primas y zonas geográficas

<b>Materia prima</b>	<b>Sitio</b>	<b>Energía neta consumida (GJ/m<sup>3</sup>)</b>	<b>EROI (salida/entrada)</b>	<b>Autor, año.</b>	<b>Límites del sistema</b>
Caña de azúcar	Uruguay/Bella Unión	3,9	5,0	Ferrari <i>et al.</i> , 2007	De la cuna al tanque.
Caña de azúcar	Brasil	2,7	9,0	Macedo <i>et al.</i> , 2008	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Caña de azúcar	Brasil		8,0	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Remolacha	Noroeste de Europa		1,5	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Sorgo dulce	China		6,8	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Sorgo grano	Uruguay/Paysandú	8,9	2,5	Actual	De la cuna al tanque de almacenamiento en plant industrial.
Maíz	Estados Unidos	13,4	1,6	Kim <i>et al.</i> , 2005	De la cuna al uso.
Maíz	Estados Unidos		1,1	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Trigo	Noroeste de Europa		1,4	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Trigo	Bélgica		2,2	Belboom <i>et al.</i> , 2015	De la cuna al uso. El consumo de energía de la fase agrícola lo toma de Gnasonou <i>et al.</i> (2009) y la fase industrial lo toma del propio estudio.
Mandioca	Tailandia		2,0	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.

Tal como se observa en la Tabla 4.10, los resultados son favorables en la totalidad de los estudios presentados, siendo el valor EROI superior a la unidad y por lo tanto obteniendo una salida de energía superior a la energía fósil utilizada para el proceso productivo. Los resultados notoriamente más favorables se observan para la caña de azúcar en Brasil y en el norte de Uruguay, y para el sorgo dulce en China, en cuales casos se produce entre 5 y 9 veces la energía fósil utilizada durante el proceso. Los cultivos amiláceos, en general presentan resultados no tan favorables como los sacarígenos, siendo el sorgo grano en Paysandú uno de los que entrega mejores resultados. Esta diferencia podría deberse a diferentes razones, como por ejemplo, las distancias recorridas por los diferentes cultivos a la planta industrial, o por ejemplo a la tasa de aplicación de fertilizantes, considerando que la tasa de aplicación de nitrógeno en el Uruguay es baja si se compara con la utilizada en otros países (Guillermo Siri Prieto, comunicación personal, noviembre 2015).

El Departamento de Energía de Estados Unidos ([www.energy.gov](http://www.energy.gov)), realizó una recopilación de estudios que evalúan el balance energético de la producción de bioetanol de maíz. Se presentan sus resultados en la Figura 4.6. Se observa que algunos autores (Shapouri *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2003) han determinado que el balance energético es favorable, mientras otros (Patzek *et al.*, 2005; Pimentel *et al.*, 2005) devuelven balances de energía negativos. El resultado del presente trabajo se incluye en dicha Figura a efectos de comparación.

La variabilidad de los resultados se debe, como se mencionó anteriormente, a las características de cada sistema estudiado como ser clima, características del suelo, tecnología utilizada, hipótesis y consideraciones realizadas en cada uno de ellos, entre otros.



**Figura 4.6:** Balance de energía del etanol a partir de maíz. Adaptado de: Department of Energy, U.S.

### 4.3. ACV para la emisión de GEI

El ACV para la estimación de la emisión de GEI, permite cuantificar las emisiones durante el proceso productivo. Se realiza además una estimación de la cantidad de emisiones que son evitadas por sustitución de la gasolina por el etanol combustible.

Para mezclas de bajo contenido de etanol (hasta 10% de contenido de etanol) teniendo en cuenta que la eficiencia del motor no varía significativamente (Macedo *et al.*, 2008; Morales *et al.*, 2015), es posible estimar que un litro de gasolina es sustituido por un litro de etanol combustible. Bajo esta consideración, y teniendo en cuenta que las emisiones de la gasolina son aproximadamente 2,82 kg CO<sub>2</sub> eq./litro de gasolina, se puede decir que por cada metro cúbico de etanol, se evitan 2820 kg CO<sub>2</sub> eq.

2,82 kg CO<sub>2</sub> eq. /L gasolina => 2.820 kg CO<sub>2</sub> eq./ m<sup>3</sup> etanol

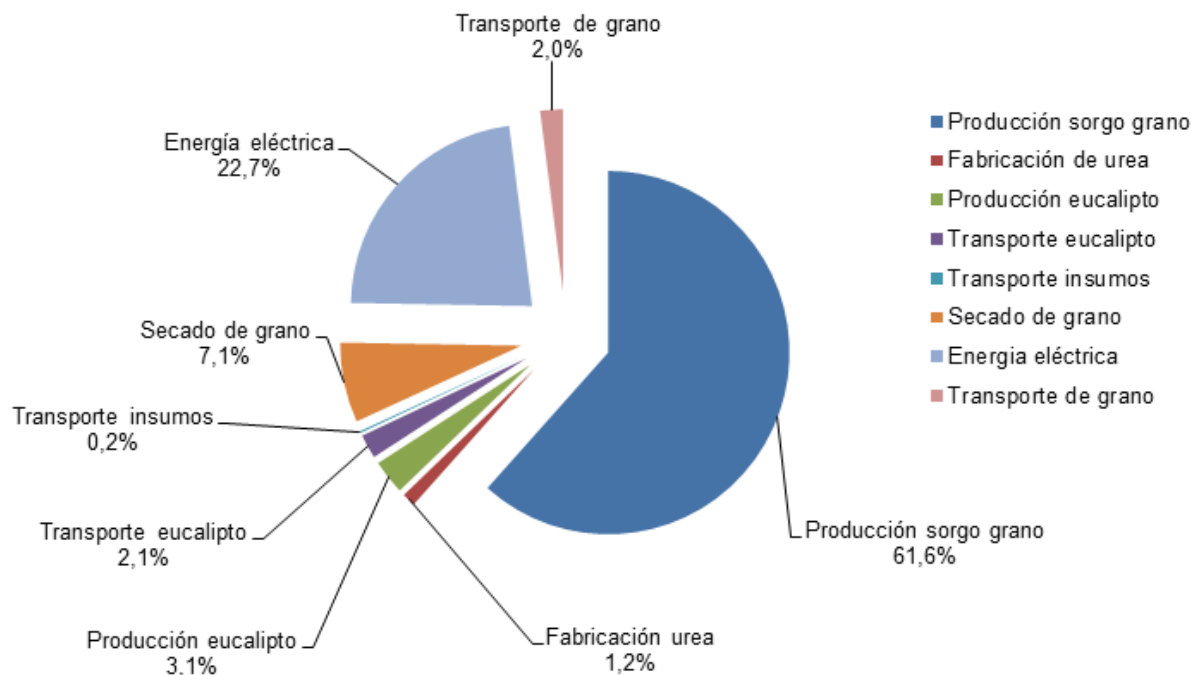
**Tabla 4.10: Balance de emisiones de efecto invernadero**

Actividad/Producto	Emisiones (kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>3</sup> etanol)	%	Emisiones evitadas (kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>3</sup> )
<b>Fase agrícola</b>			
Fabricación fertilizantes	145	19,1	
Aplicación fertilizante	139	18,4	
Fabricación herbicida	73	9,6	
Fabricación Insecticida	8	1,1	
Transporte insumos (combustible)	44	5,9	
Manejo agrícola (combustible)	51	6,8	
<b>Total fase agrícola</b>	<b>460</b>	<b>60,9</b>	
<b>Transporte materia prima</b>			
Transporte grano (combustible)	<b>16</b>	<b>2,1</b>	
<b>Fase industrial</b>			
Producción eucalipto	24	3,1	
Transporte eucalipto (combustible)	16,4	2,2	
Transporte insumos (combustible)	1	0,2	
Energía eléctrica	175,0	23,2	
Secado de grano	55	7,3	
Fabricación de urea (para fermentación)	9	1,2	
<b>Total fase industrial</b>	<b>296</b>	<b>39,1</b>	
<b>Producto evitado</b>			
Pasturas artificiales (alimento animal)			185
<b>Emisión evitada</b>			
Gasolina no utilizada			2820
<b>TOTAL</b>	<b>756</b>		<b>3005</b>
<b>% Emisiones evitadas</b>			$((3005-756)/3005)*100 =$ <b>75 %</b>

La segunda columna de la Tabla 4.10 presenta la emisión de GEI (kg CO<sub>2</sub> equivalente) de cada actividad de la cadena productiva. La cuarta columna de la misma tabla presenta las emisiones evitadas que se consideran de la sustitución del mismo volumen de gasolina, y las emisiones correspondientes a la producción de pasturas de avena sustituidas por el DDGS producido.

Las emisiones de GEI se estiman en 756 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de etanol producido o 36 g CO<sub>2</sub>eq/MJ de etanol producido.

En la Figura 4.7 se puede observar claramente la contribución de las diferentes actividades en la emisión de GEI.



**Figura 4.7:** Contribución en la fase industrial

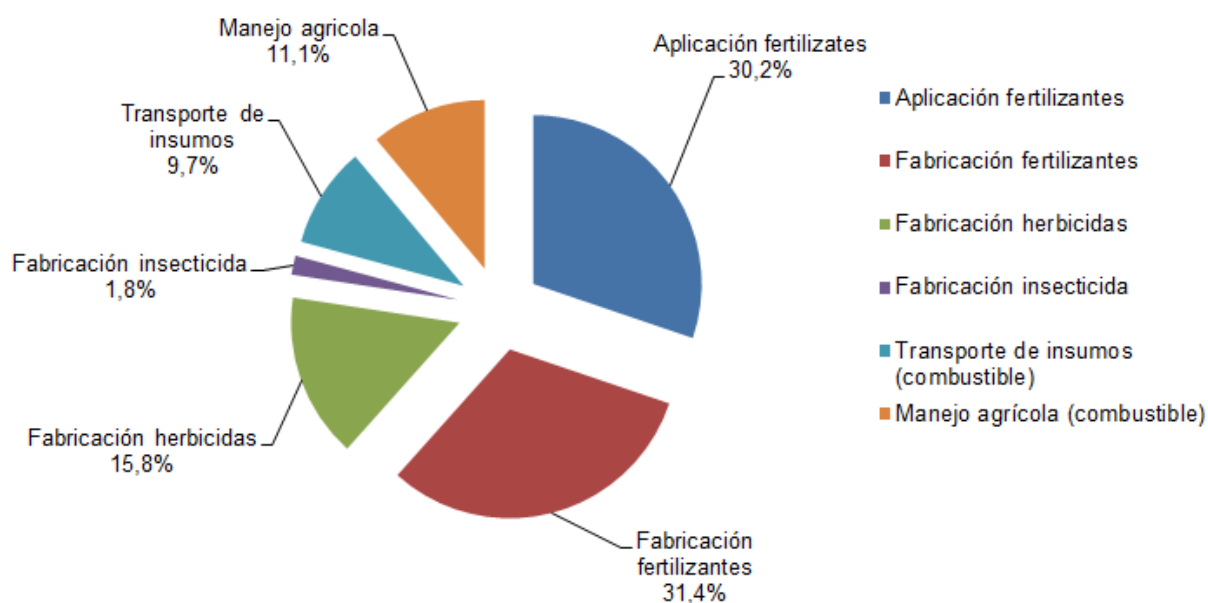
En la Figura 4.7 se puede observar que la fase agrícola o producción del sorgo grano, es la que mayor peso tiene en cuanto a la emisión de GEI, representando más de un 60% del total, similar a los resultados obtenidos respecto al balance de energía.

En este sentido en la Figura 4.8 se presenta el desglose de la contribución de las diferentes actividades de la fase agrícola. Se observa que la fabricación y aplicación de fertilizantes pesa más de un 60% del total.

El uso o aplicación de fertilizantes nitrogenados a las plantas es un proceso ineficiente, donde las plantas normalmente asimilan el 50 por ciento del nitrógeno aplicado. La principal causa de esta baja eficiencia se debe a la pérdida de nitrógeno del sistema suelo - planta a través de procesos de lixiviación, escorrentía, erosión, o por emisiones gaseosas. La importancia relativa de cada una de estas causas, varía de lugar el sitio y otras condiciones que varían con el tiempo. La pérdida de nitrógeno en forma de gases es el mecanismo dominante en muchos sistemas de producción agrícola. Los procesos de pérdidas incluyen volatilización, nitrificación, y desnitrificación, resultando en la liberación a la atmósfera de NH<sub>3</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, y de nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>). El óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) es un gas de efecto invernadero y es uno de los gases mayormente generados por aplicación de fertilizantes. La

desnitrificación biológica es la reducción del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) o nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) a gases de óxidos de N y  $\text{N}_2$  molecular por bacterias esencialmente aeróbicas. La nitrificación, es la oxidación biológica del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a  $\text{NO}_2^-$  o  $\text{NO}_3^-$  bajo condiciones aeróbicas. Bajo condiciones limitadas de oxígeno los nitrificantes pueden usar el  $\text{NO}_2^-$  como electrón terminal aceptor para evitar la acumulación del  $\text{NO}_2^-$  tóxico, mediante el cual se producen el  $\text{N}_2\text{O}$  y el  $\text{NO}$ . (FAO, 2014).

La fabricación de herbicidas también contribuye de manera significativa en la contribución de emisión de GEI representando el 15,8% de la fase agrícola, el uso de combustible para maquinaria agrícola 11,1%, transporte de insumos 9,7% y fabricación de insecticida que representa casi el 2% de la emisión de la fase agrícola.



**Figura 4.8:** Contribución de las actividades de la fase agrícola

Estos resultados también fueron analizados realizando modificaciones a diferentes parámetros, como rendimiento del cultivo y tasa de fertilización.

**Tabla 4.11:** Sensibilidad por rendimiento del cultivo

Emisiones	Rendimiento (kg/ha)		
	3000	Caso base 4030	5000
Emisiones generadas (kg $\text{CO}_2$ eq/m <sup>3</sup> )	649	756	498
Emisiones gasolina (kg $\text{CO}_2$ eq/m <sup>3</sup> )	2820		
Emisiones pasturas (kg $\text{CO}_2$ eq/m <sup>3</sup> )	185		
<b>Diferencia = Emisiones evitadas</b>	<b>2087</b>	<b>2250</b>	<b>2342</b>
<b>% emisiones evitadas</b>	<b>69</b>	<b>75</b>	<b>78</b>

Se obtienen resultados más favorables en cuanto a las emisiones de GEI cuando se obtienen mejores rendimientos de cultivo, debido a que la relación entre los insumos requeridos por kg de grano producido mejora.

Se realiza un análisis similar modificando la tasa de fertilización, donde se obtienen resultados significativamente mejores cuando se disminuye la tasa de fertilización. Estos resultados se presentan en la Tabla 4.12.

**Tabla 4.12:** Sensibilidad por tasa de fertilización

Emisiones	Uso de fertilizante urea (%)		
	100	80	50
Emisiones generadas (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	756	735	705
Emisiones gasolina (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	2820		
Emisiones pasturas (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	185		
<b>Diferencia = emisiones evitadas</b>	<b>2249</b>	<b>2270</b>	<b>2301</b>
<b>% emisiones evitadas</b>	<b>75</b>	<b>76</b>	<b>77</b>

A continuación se presenta el impacto que tiene el cambio de escenario de generación de energía eléctrica en el Uruguay.

**Tabla 4.13:** Sensibilidad por modificación de escenario de generación de energía eléctrica

Emisiones	Generación energía eléctrica	
	Matriz base	Nueva matriz
Emisiones generadas (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	756	580
Emisiones gasolina (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	2820	
Emisiones pasturas (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	185	
<b>Diferencia = emisiones evitadas</b>	<b>2250</b>	<b>2425</b>
<b>% emisiones evitadas</b>	<b>75</b>	<b>81</b>

Tal como se esperaba, los resultados en cuando a la emisión de GEI al incorporar fuentes de energía renovable a la matriz de energía eléctrica impactan fuertemente en los resultados, ya que este insumo es muy significativo en la fase industrial de esta cadena productiva.

Al igual que para el análisis de consumo de energía, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos en este estudio con resultados de otros estudios de similares características. Los datos comparativos se presentan en la Tabla 4.14.

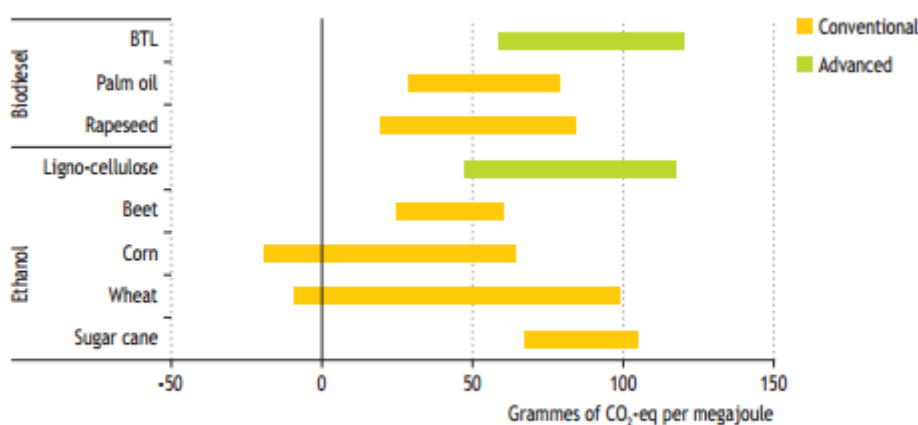
**Tabla 4.14:** Comparación de valores de emisiones y porcentaje de emisiones evitadas de diferentes autores, para diferentes materia primas y lugares geográficos.

<b>Materia prima</b>	<b>Sitio</b>	<b>Emisiones (g CO<sub>2</sub>/MJ etanol)</b>	<b>% emisiones evitadas</b>	<b>Autor, año.</b>	<b>Límites del sistema</b>
Caña de azúcar	Uruguay/Bella Unión	7,0	76,7	Ferrari <i>et al.</i> , 2007	De la cuna al tanque.
Caña de azúcar	Brasil	20,6	76,7	Macedo <i>et al.</i> , 2008	De la cuna al tanque de almacenamiento de la planta. Valores de 2005/2006.
Caña de azúcar	Brasil	20	77,5	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Caña de azúcar	Unión Europea		71	Directiva del Parlamento Europeo	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Remolacha	Noroeste de Europa	48	45,9	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Remolacha	Unión Europea		61	Directiva del Parlamento Europeo	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Sorgo dulce	China	22	75,2	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Sorgo grano	Uruguay/Paysandú	35,7	75,2	Actual	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Amilaceos	Italia/Siena	22,4	74,7	Patrizi <i>et al.</i> , 2013	Los cultivos son los disponibles en la región que se estudia y en la proporción en que son utilizados.
Trigo	Bélgica	40	54,9	Belboom <i>et al.</i> , 2015	De la cuna al uso.
Trigo	Noroeste de Europa	54	39,1	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Trigo	Suiza	47	47,0	Gnansounou <i>et al.</i> , 2009	De la cuna al tanque de almacenamiento de la planta (WtT pag .4927)
Maíz	Estados Unidos	37,3	57,9	Kim <i>et al.</i> , 2005	De la cuna al uso.
Maíz	Estados Unidos	87	1,9	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Maíz	Unión Europea		56	Directiva del Parlamento Europeo	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.
Mandioca	Tailandia	40	54,9	Vries <i>et al.</i> , 2010	De la cuna al tanque de almacenamiento en planta industrial.



Las emisiones de los procesos estudiados que se presentan en la Tabla 4.15 son del mismo orden. Los gramos de CO<sub>2</sub> emitido se encuentran entre 7, para el caso de la caña de azúcar en el norte de Uruguay, y 87 para la mandioca en Estados Unidos. El porcentaje de emisiones evitadas también resulta significativo, excepto para el caso de la mandioca en Estados Unidos, donde se estima un 1,9% de emisiones evitadas, con lo cual considerando que este tipo de estudios tienen cierto grado de incertidumbre, no sería posible asegurar que el proceso efectivamente resulte en emisiones evitadas. En términos generales, al igual que para la energía consumida, se observan mejores resultados para los cultivos sacarígenos que para los amiláceos.

En la Figura 4.9 se presentan resultados de emisión de GEI para la producción de etanol de diferentes materias primas, resultado de un análisis realizado por la IEA en el año 2010. Se observa los rangos de valores de gramos de CO<sub>2</sub> equivalente por MJ para diferentes materias primas. Los amiláceos como trigo y maíz se encuentran entre valores negativos y hasta 100 g CO<sub>2</sub> por MJ de etanol, con lo cual un valor de 35,7 g CO<sub>2</sub> eq. /MJ de etanol para sorgo grano, sería a priori un valor favorable.



Note: Excludes land-use changes.  
Source: Adapted from IEA (2009b).

**Figura 4.9:** Gráfico comparativo de emisiones de GEI por MJ de etanol producido  
Fuente: IEA, World Energy Outlook 2010.

Tal como se mencionó anteriormente, se analizó el impacto de incluir en el estudio la distribución de etanol a los centros de mezcla. En la Tabla 4.16 se presentan los resultados generales de incorporar al análisis la distribución del etanol a los centros de acopio.

**Tabla 4.16:** Escenario con distribución de etanol

	Caso Base	Con distribución de etanol
kg CO <sub>2</sub> / m <sup>3</sup> etanol	756	779
g CO <sub>2</sub> / MJ etanol	36	37
MJ/ m <sup>3</sup> etanol	8921	9361
EROI	2,5	2,4

Dados los supuestos y aproximaciones realizadas en torno a las distancias recorridas para la distribución del bioetanol y los grados de mezcla en cada centro, se podría estimar que el impacto que tiene incluir el transporte del etanol en los resultados finales en cuanto al consumo de energía, es de aproximadamente el 5 % del total del caso base donde no se considera. Respecto al impacto en los resultados en relación a la emisión de GEI, se puede estimar que incidiría en aproximadamente 2,5% sobre el análisis que no considera esta etapa. Tal como se observa en la Tabla 4.16, tanto los gramos por MJ de etanol producido, como la tasa de EROI, experimentan variaciones muy pequeñas.

## 5. Conclusiones

Se realizó el análisis de ciclo de vida del bioetanol combustible de sorgo grano producido bajo las condiciones agroindustriales existentes en Paysandú, Uruguay, para el uso de energía y emisión de GEI, desde la “cuna al tanque”. Se consideró el uso de mezclas de gasolina de hasta 10% (v/v), el uso de leña y electricidad como fuentes de energía en la fase industrial y la co-producción de DDGS como alimento animal usando como regla de asignación la pastura de avena como producto evitado. En base a la información recopilada y las hipótesis realizadas, siguiendo los lineamientos de la metodología establecida por las normas ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, se tuvieron los siguientes resultados:

- El balance energético es favorable, la energía obtenida en el proceso es mayor a la energía fósil consumida durante el mismo. Se estimó que se producen 2,5 MJ de energía en forma de etanol por cada MJ de energía fósil utilizada en toda la cadena de producción (EROI: 2,5) que equivale a una producción neta de energía de 13,5 GJ/m<sup>3</sup> etanol.
- Se evita un 75,2% de emisiones de gases de efecto invernadero, respecto al uso del combustible fósil de referencia sustituido (gasolina).
- La co-producción de DDGS como sustituto de pasturas de avena tiene poco efecto, tanto en el balance energético como en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Se observó un incremento de la EROI de 2,4 a 2,5 y de las emisiones evitadas de 73,2 a 75,2%.
- Las contribuciones al consumo de energía y la emisión de GEI debidas a un nuevo escenario que considera el transporte del bioetanol producido, desde el tanque hasta las plantas de mezcla y distribución, mostraron no ser significativas. Al considerar dichas contribuciones se obtuvieron valores de EROI y de reducción de GEI de 2,4 y 74% respectivamente.
- Si se considera un nuevo escenario, de una matriz eléctrica nacional con una mayor participación de las fuentes renovables, los valores de EROI y de reducción de emisiones de GEI son más favorables. En este escenario se observa un incremento de EROI a 3,2 y de emisiones evitadas de GEI a 80,7%.
- Los valores observados de producción de energía neta y de reducción neta de GEI están en el rango superior de niveles reportados por otros autores para el etanol de amiláceos, estimados bajo otras condiciones de producción y diferentes metodologías.
- La fase agrícola implica el mayor consumo de energía (60%) y de emisiones de GEI (61%), siendo la fabricación y aplicación de fertilizantes la principal contribución. El estudio de sensibilidad realizado mostró un importante impacto de la tasa de fertilización y del rendimiento agrícola.
- En la fase industrial, el principal consumo de energía está en la recuperación de etanol por destilación. Ese consumo es mayor cuando la concentración de etanol alcanzada es baja. El estudio de sensibilidad mostró un fuerte impacto de la relación sólido-líquido utilizada. Mayores relaciones sólido líquido reducen el consumo de energía, siempre que pueda mantenerse un rendimiento industrial alto. El estudio de sensibilidad también mostró que un aumento en el contenido de almidón de los granos y de la eficiencia de fermentación reducen el consumo de energía favorablemente.

- Las principales oportunidades de mejora en la fase agrícola podrían de estar orientadas a:
  - la reducción en el uso de fertilizantes sintéticos, uso de fertilizantes de mayor eficiencia en el aprovechamiento del nitrógeno aplicado, desarrollo de fertilizantes provenientes de residuos agroindustriales
  - menor consumo de combustibles fósiles en la fabricación de fertilizantes, a través por ejemplo del mayor uso de fuentes renovables o mayor incorporación y uso de biocombustibles para las diferentes actividades agrícolas.
  
- Las principales oportunidades de mejora en la fase industrial podrían de estar orientadas a:
  - desarrollo de tecnología de separación de etanol con una mayor eficiencia energética (menor consumo de energía)
  - desarrollo de enzimas y levaduras aptas para la transformación de suspensiones de alta relación sólido-líquido.

## 6. Consideraciones finales

Para el uso práctico de las conclusiones referentes al uso de la energía o de la emisión de GEI, debieran tenerse en cuenta otras consideraciones (fuera del alcance de este trabajo) ambientales o económicas. A modo de ejemplo la co-producción de DDGS o la distribución del etanol a las plantas de distribución no pesan significativamente en el balance energético o en la reducción de emisiones de GEI, pero tienen un impacto económico.

La confiabilidad de los resultados del análisis de ciclo de vida realizado depende de la adecuación de los datos utilizados para las condiciones y prácticas existentes en el país. Un aspecto crítico es la realización de medidas e investigaciones específicas de modo de construir o generar bases de datos propias que permitan obtener conclusiones más ajustadas a la realidad local. Esto es particularmente clave en la etapa de cultivo, que es la de mayor contribución a los parámetros estudiados. Se identificaron los siguientes aspectos que debieran profundizarse mediante estudios nacionales:

- Disponer de datos relativos a como variaciones en la aplicación de fertilizantes (tasa, tipo, método) afectan el rendimiento agrícola, tanto en términos de biomasa como de contenido de almidón así como medir los factores de emisión o de uso de la energía correspondientes.
- Determinar, en términos de rendimiento del motor, la relación volumétrica de equivalencia de sustitución de la gasolina por etanol para diferentes mezclas gasolina - etanol para las condiciones locales tales como parque automotor, características de manejo, condiciones climáticas, características de la gasolina, etc. En este estudio se consideró que para mezclas de hasta un 10% de etanol, la relación es un volumen de etanol equivale a un volumen de gasolina, en base a datos de bibliografía.
- Evaluar las relaciones de sustitución usadas, en términos de valor nutricional (contenido proteico), de pasturas de avena por DDGS. Podría ser conveniente evaluar otro tipo de alimento sustituido o una combinación de alimentos sustituidos por DDGS.
- Verificar las emisiones de la combustión a ser consideradas en el análisis del ciclo de vida realizado para el eucalipto como fuente de energía industrial. En el estudio se consideró la combustión completa del eucalipto y por lo tanto el valor de emisiones evitadas resultante podría ser sobre-estimado (el valor real debiera ser menor).

## 7. Bibliografía

- Alcoholes del Uruguay S.A. (ALUR) <http://www.alur.com.uy/> (acceso 11-08-2015)
- Alcoholes del Uruguay S.A. (ALUR). 2009. Impacto Socio-Económico de ALUR en Bella Unión. <http://www.alur.com.uy/articulos/2009/impacto-socio-economico-de-alur-en-bella-union.pdf> (acceso 13-08-2015)
- Alzate, C. C., & Toro, O. S. (2006). Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass. *Energy*, 31(13), 2447-2459.
- Azzopardi, B., & Mutale, J. (2010). Life cycle analysis for future photovoltaic systems using hybrid solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1130-1134.
- Bennetzen, E. H., Smith, P., Soussana, J. F., & Porter, J. R. (2012). Identity-based estimation of greenhouse gas emissions from crop production: case study from Denmark. *European Journal of Agronomy*, 41, 66-72.
- Bioenergy Greenhouse Gas Emissions in Europe ([www.bioGrace.net](http://www.bioGrace.net))
- Bongaarts, J. (1992). Population growth and global warming. *Population and Development Review*, 299-319.
- BP, 2004, Statistical Review of World Energy. [http://www.uned.es/experto-energia/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2005.pdf](http://www.uned.es/experto-energia/statistical_review_of_world_energy_full_report_2005.pdf) (acceso 11-08-2015)
- BP 2011. BP Statistical Review of World Energy. [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de\\_de/PDFs/brochures/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2011.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/statistical_review_of_world_energy_full_report_2011.pdf) (acceso 13-08-2015)
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2004). Soil aeration and temperature. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, New York, 265-306.
- Bravo Rodríguez, V., Jurado Alameda, E., Martínez Gallegos, J. F., Reyes Requena, A., García López, A. I., Sampaio Cabral, J. M. & Pina da Fonseca, L. J. (2006). Modification of the activity of an alpha-amylase from *Bacillus licheniformis* by several surfactants. *Electronic Journal of Biotechnology*, 9(5).
- Cardona, C. A., Quintero, J. A., & Paz, I. C. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. *Bioresource technology*, 101(13), 4754-4766.
- CEPAL, 2010. Informe: Uruguay, análisis del sector transporte. [http://publicaciones.caf.com/media/1131/IS\\_URUGUAY.pdf](http://publicaciones.caf.com/media/1131/IS_URUGUAY.pdf)
- Chang, D., Lee, C. K. M., & Chen, C. H. (2014). Review of life cycle assessment towards sustainable product development. *Journal of Cleaner Production*, 83, 48-60.
- Chang, Y. J., Sproesser, G., Neugebauer, S., Wolf, K., Scheumann, R., Pittner, A., & Finkbeiner, M. (2015). Environmental and Social Life Cycle Assessment of Welding Technologies. *Procedia CIRP*, 26, 293-298.

- CMNUCC, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. [http://unfccc.int/portal\\_espanol/informacion\\_basica/la\\_convencion/items/6196.php](http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/items/6196.php) (acceso 08-08-2015)
- Contreras, A. M., Rosa, E., Perez, M., Van Langenhove, H., & Dewulf, J. (2009). Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 772-779.
- Croce M.J., Juarez F., Rica R. & M.D. Ferrari (2008). Análisis del ciclo de vida del etanol combustible de caña de azúcar en Uruguay: balance de energía y evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero. IV Encuentro Regional de Ingeniería Química, AIQU, Montevideo; 2008.
- de Vries, S. C., van de Ven, G. W., van Ittersum, M. K., & Giller, K. E. (2010). Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation conversion techniques. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 588-601.
- Diario Oficial de la Unión Europea. 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.
- DNE, MIEM. Balance Energético Nacional <http://www.dne.gub.uy/> (acceso 11-08-2015)
- DNE, MIEM. Encuesta de consumo y uso de la energía en la industria, 2013. [http://www.dne.gub.uy/documents/15386/0/Informe\\_Encuesta\\_Industria%202013.pdf](http://www.dne.gub.uy/documents/15386/0/Informe_Encuesta_Industria%202013.pdf) (acceso 13-11-2015).
- Dufey, A. (2006). *Biofuels production, trade and sustainable development: emerging issues* (No. 2). IIED.
- Ecoinvent 3. Shortcuts Methodology of ecoinvent 3. 2015. <http://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/what-do-the-shortcuts-such-as-ch-rer-row-and-glo-mean.html>
- Ecoinvent Centre. 2007. Life cycle inventories of Bioenergy, version 2, 2007. Econinvent.
- Elbehri, A., Segerstedt, A., & Liu, P. (2013). *Biofuels and the sustainability challenge: a global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Elgowainy, A., Han, J., Cai, H., Wang, M., Forman, G. S., & DiVita, V. B. (2014). Energy efficiency and greenhouse gas emission intensity of petroleum products at US refineries. *Environmental Science & Technology*, 48(13), 7612-7624.
- Eštoková, A., & Porhinčák, M. (2012). Reduction of primary energy and CO<sub>2</sub> emissions through selection and environmental evaluation of building materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), 704-712.
- European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010.
- FAO. 1996. Secado de grano y secadoras. <http://www.fao.org/docrep/x5028s/x5028s00.htm> (acceso 13-08-2015)

- FAO. 2013. Biofuels and sustainability challenge: a Global Assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. <http://www.fao.org/docrep/017/i3126e/i3126e.pdf> (acceso 11-08-2015).
- FAO. 2014. "Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH<sub>3</sub>, NO y N<sub>2</sub>O provenientes de tierras agrícolas". <http://www.fao.org/3/a-y2780s.pdf> (acceso 5-11-2015).
- Fazio, S., & Monti, A. (2011). Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops. *Biomass and Bioenergy*, 35(12), 4868-4878.
- Ferrari, M. D., Guigou, M., & Lareo, C. (2013). Energy consumption evaluation of fuel bioethanol production from sweet potato. *Bioresource technology*, 136, 377-384.
- García&Valverde, R., Cherni, J. A., & Urbina, A. (2010). Life cycle analysis of organic photovoltaic technologies. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(7), 535-558.
- 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.
- 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.
- Global nitrous oxide calculator. 2014. Manual: [http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/documentation/The\\_Global\\_Nitrous\\_Oxide\\_Calculator\\_User\\_Manual\\_version\\_1\\_2\\_4.pdf](http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/documentation/The_Global_Nitrous_Oxide_Calculator_User_Manual_version_1_2_4.pdf) (acceso 13-08-2015)
- GNOC. Joint Research Centre (<http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/>) (acceso 13-08-2015)
- González-García, S., Moreira, M. T., Feijoo, G., & Murphy, R. J. (2012). Comparative life cycle assessment of ethanol production from fast-growing wood crops (black locust, eucalyptus and poplar). *Biomass and Bioenergy*, 39, 378-388.
- He, B. Q., Shuai, S. J., Wang, J. X., & He, H. (2003). The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. *Atmospheric Environment*, 37(35), 4965-4971.
- Hodge, C. (2002). Ethanol use in US gasoline should be banned, not expanded. *Oil & Gas Journal*, 100(37), 20-20.
- Holdgate, M. W. (1989). *Climate change: Meeting the challenge*. Commonwealth Secretariat. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2014.html>
- IEA. 2010. World Energy Outlook. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2010.pdf> (acceso 13-08-2015)
- IEA. Key World Energy Statistics. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013.pdf>



- IEA. Land Use and climate change mitigation. 2013. <http://task39.org/files/2013/05/Bioenergy-Land-Use-Change-and-Climate-Change-Mitigation-1.pdf> (acceso 11-08-2015)
- IEA. World Energy Outlook. <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/> (acceso 11-08-2015).
- ILCD Handbook, International Reference Life Cycle Data System, Framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators. Marzo 2010. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- Informe IPCC 2013: PCG. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf)
- IPCC. 2006. Directrices del IPCC para inventarios nacionales de GEI. (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index>) (acceso 13-08-2015)
- IPCC, 2007. GWP [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html) (acceso 13-08-2015)
- IPCC 2007. Report. Cambios en el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso atmosféricos. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1-1.html) (acceso 11-08-2015)
- IPCC 2011. Report: [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren\\_report\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf) (acceso 13-08-2015)
- IPCC (2011) Reporte anual de Fuentes de energía renovable y mitigación del cambio climático. [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren\\_report\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_report_es.pdf) (acceso 13-08-2015)
- Irigoyen A., Perrachon J., (2007). Plan Agropecuario, Revista nro. 153 [http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R123/R123\\_52.pdf](http://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R123/R123_52.pdf)
- Jiang, Q., Li, T., Liu, Z., Zhang, H., & Ren, K. (2014). Life Cycle Assessment of an Engine with Input-Output Based Hybrid Analysis Method. *Journal of Cleaner Production*, 78, 131-138.
- Kaltschmitt, M., G. A. Reinhardt, and T. Stelzer (1997). "Life cycle analysis of biofuels under different environmental aspects." *Biomass and Bioenergy* 12.2: 121-134.
- Karatzos, S., McMillan, J. D., & Saddler, J. N. (2014). The Potential and Challenges of Drop-in Biofuels. In *IEA Bioenergy Task* (Vol. 39).
- Khan, M. A., Khan, M. Z., Zaman, K., & Naz, L. (2014). Global estimates of energy consumption and greenhouse gas emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 336-344.
- Kim, S., Dale, B. E., & Jenkins, R. (2009). Life cycle assessment of corn grain and corn stover in the United States. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(2), 160-174.
- Kwiatkowski J.R., McAloon A.J., Taylor F., Johnston D.B., 2006. Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. *Industrial Crops and Products*, 23: 288-296.

- Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43(1), 81-107.
- Larnaudie, V., Rochon E. Ferrari, M.D. & Lareo C. (2015). Energy evaluation of fuel bioethanol production from sweet sorghum using very high gravity (VHG) conditions. *Renewable Energy* (en publicación).
- Lechón, Y. et al. (2005): Análisis del ciclo de vida de combustibles para el transporte. Fase I. Análisis del ciclo de vida comparativo del etanol de cereales y de la gasolina. *Energía y cambio climático*.
- López-Mtz, J. D., Díaz, A. E., Martínez, E. R., & Valdez, C. R. D. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra*, 19(4), 293-299.
- Lu, Y., & Xu, W. (2013). Study on design of life circle assessment system for chemical products. *Journal of Chemical & Pharmaceutical Research*, 5(11).
- Macedo, I. D. C., Leal, M. R. L. V., & Da Silva, J. E. A. R. (2004). Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. Government of the State of São Paulo.
- Macedo, M. O., Resende, A. S., Garcia, P. C., Boddey, R. M., Jantalia, C. P., Urquiaga, S., & Franco, A. A. (2008). Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *Forest Ecology and Management*, 255(5), 1516-1524.
- Maity, J. P., Bundschuh, J., Chen, C. Y., & Bhattacharya, P. (2014). Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives—A mini review. *Energy*, 78, 104-113.
- Marta Alfaro, Ing. Agr., Ph.D. y Rodolfo Saldaña P., Bioquímico Centro Regional de Investigación, INIA, Remehue . 2014. Consorcio Lechero Chile. <http://www.consorcirolechero.cl/chile/documentos/composicion-de-alimentos-para-ganado-bovino.pdf> (acceso 13-08-2015)
- MGAP. 2014. Anuario Estadístico Agropecuario, 2014. <http://www.mgap.gub.uy/Dieaanterior/Anuario2014/Diea-Anuario%202014-Digital01.pdf> (acceso 13-08-2015)
- MGAP. 2014. Encuesta Agrícola Invierno 2014. [file:///C:/Users/TACHI/Downloads/Encuesta+Agr%2525c3%2525adcola+Invierno+2014%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/TACHI/Downloads/Encuesta+Agr%2525c3%2525adcola+Invierno+2014%20(1).pdf) (acceso 08-08-2015)
- Mileto, C., Vegas, F., Soriano, L. G., & Cristini, V. (Eds.). (2014). *Vernacular Architecture: Towards a Sustainable Future*. CRC Press.
- Moncada, J., Tamayo, J. A., & Cardona, C. A. (2014). Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery. *Chemical Engineering Science*, 118, 126-140.
- Morales, M., Quintero, J., Conejeros, R., & Aroca, G. (2015). Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1349-1361.

Moriizumi, Y., Suksri, P., Hondo, H., & Wake, Y. (2012). Effect of biogas utilization and plant co-location on life-cycle greenhouse gas emissions of cassava ethanol production. *Journal of Cleaner Production*, 37, 326-334.

OECD-FAO.2014. Agricultural Outlook, 2014-2023. [https://www.embrapa.br/documents/1024963/1025740/OECD-FAO\\_Agricultural\\_Outlook\\_2014-2023/20082926-0f88-4159-970a-2a1c65795c47](https://www.embrapa.br/documents/1024963/1025740/OECD-FAO_Agricultural_Outlook_2014-2023/20082926-0f88-4159-970a-2a1c65795c47) (acceso 13-08-2015)

Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28-39

Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., & van Vuuren, D. (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.

Paustian, K. A. O. J. H., Andrén, O., Janzen, H. H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., & Woomer, P. L. (1997). Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management*, 13(s4), 230-244.

Pieragostini, C., Aguirre, P., & Mussati, M. C. (2014). Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. *Science of The Total Environment*, 472, 212-225.

Pimentel, D. (2003). Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Natural Resources Research*, 12(2), 127-134.

Pimentel, D., & Patzek, T. W. (2005). Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. *Natural Resources Research*, 14(1), 65-76.

Pimentel, D., Patzek, T., & Cecil, G. (2007). Ethanol production: energy, economic, and environmental losses. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (pp. 25-41). Springer New York.

Pineda Jaimes, N. B., Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., & Plata Rocha, W. (2009). Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes: Una aproximación a los procesos de deforestación. *Investigaciones geográficas*, (69), 33-52.

Polakovič, M., & Bryjak, J. (2004). Modelling of potato starch saccharification by an *Aspergillus niger* glucoamylase. *Biochemical Engineering Journal*, 18(1), 57-63.

Pre Consultat. 2014. SimaPro Tutorial Manual, versión 8. <http://www.pre-sustainability.com/simapro-tutorial> (acceso 13-08-2015)

Ramírez B. (2014) Mejoras en la producción del bioetanol combustible a partir de sorgo grano. Tesis de Maestría en Biotecnología, Facultad de Ciencias, UDELAR.

Ramírez, M. E., Meza, B. C., Ortíz, P. R., Limas, E. A., & Serrato, F. B. (2009). Fertilización orgánica y prácticas de conservación sobre el rendimiento de sorgo de temporal. In *Avances en estudios sobre desertificación: aportaciones al Congreso Internacional sobre Desertificación en memoria del profesor John B. Thornes, (Murcia, 2009). Advances in studies on desertification: contributions to the International Conference on Desertification in memory of professor Jo* (pp. 677-680). Universidad de Murcia.

- Renó, M. L. G., Lora, E. E. S., Palacio, J. C. E., Venturini, O. J., Buchgeister, J., & Almazan, O. (2011). A LCA (life cycle assessment) of the methanol production from sugarcane bagasse. *Energy*, 36(6), 3716-3726.
- RFA. 2013. Battling for the barrel. Ethanol Industry Outlook.
- Rocha, W. P., Delgado, M. G., & Sendra, J. B. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, (13), 293.
- Rodriguez, V. B., Alameda, E. J., Gallegos, J. F., Requena, A. R., & Lopez, A. I. (2006). Enzymatic Hydrolysis of Soluble Starch with an  $\alpha$ -Amylase from *Bacillus licheniformis*. *Biotechnology Progress*, 22(3), 718-722.
- Rooney, L. W., & Pflugfelder, R. L. (1986). Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *Journal of Animal Science*, 63(5), 1607-1623.
- Sanchez, O. J., & Cardona, C. A. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 99(13), 5270-5295.
- Santoyo-Castelazo E., Azapagic A. (2014). Sustainability assessment of energy system: Integrating environmental, economic and social aspects. *Journal of Cleaner Production*. Volume 80, pages 119-138.
- SpeedAgro S.R.L. MSDS (Material Safety Data Sheet) - Hoja de seguridad Fecha / Actualizada el: 01.09.2010 Producto: SpeedWet Maxion [http://www.speedagro.com.ar/productos/hojas\\_de\\_seguridad/Hoja\\_de\\_seguridad\\_SpeedWet\\_Maxion\\_NG\\_Septiembre\\_2010\\_.pdf](http://www.speedagro.com.ar/productos/hojas_de_seguridad/Hoja_de_seguridad_SpeedWet_Maxion_NG_Septiembre_2010_.pdf)
- Stehfest, E., & Bouwman, L. (2006). N<sub>2</sub>O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(3), 207-228.
- Tangle, L. (1988). Preparing for climate change. *BioScience*, 14-18.
- Tasić, M. B., & Veljković, V. B. (2011). Simulation of fuel ethanol production from potato tubers. *Computers & Chemical Engineering*, 35(11), 2284-2293.
- The carbón funds. 2008. Imagen efecto invernadero <http://thecarbonfunds.com/panoramaambiental/efectoinvernadero.html> (acceso 13-08-2015)
- U.S. Department of Energy. 2007. Energy Efficiency and Renewable Energy. (<http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/345.pdf>) (acceso 13-08-2015)
- UN (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo "Nuestro futuro común" (Informe Brundtland), Organización de Naciones Unidas. <http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/42/427> (acceso 11-08-2015)
- UN (1992) Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Organización de Naciones Unidas. <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm> (acceso 11-08-2015)

- Van Den Wall Bake, J. D., Junginger, M., Faaij, A., Poot, T., & Walter, A. (2009). Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 644-658.
- Vázquez, D., Carrasco-Letelier, L., D'Ottone, F., Resquín, F., Scoz, R., Vilaró, F., & Terra, J. (2012, May). Evaluating the sustainability of potential agro-industrial chains (sweet sorghum, grain sorghum, sweet potato and forestry) for agroenergy production. In *Final USDA-INIA workshop of ECPA Project "Evaluating the sustainability of potential agro-industrial chains for agroenergy production"*.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., & Lan, C. Q. (2008). CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(5), 707-718.
- Weidema, B. P. (2006a). The integration of economic and social aspects in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(1), 89-96.
- Weidema, B. P. (2006b). Social impact categories, indicators, characterisation and damage modelling. In *Presentation for the 29th Swiss LCA Discussion Forum*, 2006-06-15.
- Weidema, B. P. (2009). Using the budget constraint to monetarise impact assessment results. *Ecological Economics*, 68(6), 1591-1598.
- Weidema B P, Bauer C, Hischier R, Mutel C, Nemecek T, Reinhard J, Vadenbo C O, Wernet G. (2013). Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre WEO, 2007.
- Weil, R. R., & Magdoff, F. (2004). 1 Significance of Soil Organic. *Soil organic matter in sustainable agriculture*, 1.
- Wiloso, E. I., Heijungs, R., & de Snoo, G. R. (2012). LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5295-5308.
- Wyman, C. E. (1994). Ethanol from lignocellulosic biomass: technology, economics, and opportunities. *Bioresource Technology*, 50(1), 3-15.

## **Anexo I – Datos de inventario**

En este Anexo se presenta la información recopilada y utilizada para la etapa de inventario del ACV, y para la representación de diferentes actividades dentro del proceso productivo en estudio.

### **I.1 – Datos de entrada**

### **I.2 – Insumos fase agrícola**

### **I.3 – Transporte de insumos para la fase agrícola (barco y camión)**

### **I.4 – Emisión de N<sub>2</sub>O durante la aplicación de fertilizantes y contenido en el rastrojo**

### **I.5 – Datos generales fase industrial**

### **I.6 – Transporte de insumos en fase industrial**

### **I.7 – Producción de eucaliptus**

### **I.8 – Secado de granos en centros de acopio**

### **I.9 – Producción de pasturas de avena**

### **I.10 – Transporte de bioetanol a los centros de mezcla del país**

## I.1 – Datos de entrada

### Centralización de datos

Unidad funcional: 1 m <sup>3</sup> de EtOH	
Rendimiento grano (kg/ha)	4030
Hectareas para produc. semillas 1 ha	0.06
Factor multiplicador semillas = 1,06	1.06
t de grano/día	552
t grano/MJ etanol	0.12

<b>% operación al año</b>		0.9
<b>EtOH</b>	211	m <sup>3</sup> /d
	8.8	m <sup>3</sup> /h
	6.9	t/h
	21137	MJ/m <sup>3</sup>
	0.789	ton/m <sup>3</sup>
<b>DDGS</b>	8527	kg/h
	970	kg/m <sup>3</sup>

Actividad	Entradas y salidas	Item	Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Observaciones	
<b>Fase Agrícola</b>	Insumos	Herbicidas	Glifosato	3.18	L/ha	1.34E-03	kg/kg grano	Datos de consumo proporcionados por ALUR. Para cuantificar gasto de energía para su producción se tomará una referencia de la BD de Econinvent. Densidad = 1,70 kg/l	
			Atrazina líquida	3.18	L/ha	9.39E-04	kg/kg grano	Densidad 1,19 kg/l	
			Dual gold (metacloro)	1.59	L/ha	4.34E-04	kg/kg grano	Densidad 1,10 g/cm <sup>3</sup>	
		Insecticida	Lorsban	1.06	L/ha	3.68E-04	kg/kg grano	Herbicida organofosforado. Densidad 1,4 g/cm <sup>3</sup>	
		Fertilizantes	Fosfato di amónico	106	kg/ha	2.63E-02	kg/kg grano		
			Urea	106	kg/ha	2.63E-02	kg/kg grano		
		Coadyudantes	speed wet maxion	0.106	kg/ha	2.63E-05	kg/kg grano	Para barbecho.	
			agral 90	1.06	kg/ha	2.63E-04	kg/kg grano		
	Energía directa	Transporte en de los insumos de la fase agrícola	Barco				1.24671	tkm	Ver capítulo "Transporte insumos FA" - Transporte en Barco
			Camión				0.04441	tkm	Ver capítulo "Transporte insumos FA" - Transporte en Camión
Gasoil		Maquinaria	18.304	kg/ha cultivada	0.00481	kg	Barbecho, siembra, fertilización, cosecha utilizado por las maquinarias. La diferencia con los valores que se manejan en España podría ser porque el barbecho aquí es químico. Densidad gasoil: 0,832 kg/l		
<b>Transporte sorgo</b>	Energía directa	Transporte grano	Camión			70	kgkm	El transporte es 100% vía terrestre. Supuesto: 70 km recorridos desde la producción del cultivo a la planta. Se representa en el escenario como 1 kg de grano por 70 km de recorrido.	

Actividad	Entradas y salidas	Item	Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Unidad	Observaciones
Fase Industrial	Insumos	Grano	grano de sorgo	552	t/d	2616	kg/m <sup>3</sup> etanol	
		Enzimas	alfa amilasa	200	kg/d	0.9479	kg/m <sup>3</sup> etanol	
			Proteasa	181.82	kg/d	0.8617	kg/m <sup>3</sup> etanol	
			AMG	200	kg/d	0.9479	kg/m <sup>3</sup> etanol	
		Levadura	Sac. Cereviceae	33.3	kg/d	0.1580	kg/m <sup>3</sup> etanol	Se utilizan 35 kg/fermentador. 1000 kg por mes.
		Nutrientes	Urea		kg	6.2	kg/m <sup>3</sup> etanol	
		Antiespumante	Antiespumante	260	kg/d	1.2	kg/m <sup>3</sup> etanol	
	Eucalipto	rolos			1.93	t/m <sup>3</sup> etanol	Rolos para la quema en caldera de producción de vapor. Pero lo que se consume en la planta es 17 t/h a 45% humedad. Ver en hoja de datos madera planta.	
	Energía directa	Camión	Transporte rolos			193.4	t*km	Se consumen 1,9 toneladas por m <sup>3</sup> de etanol producido, y se considera un recorrido promedio de 100 km.
		Camión	Transporte insumos Fase Industrial			7.10	tkm/m <sup>3</sup> etanol	Ver hoja de transporte de insumos de la fase industrial.
		Barco	Transporte insumos Fase Industrial			52.28	tkm/m <sup>3</sup> etanol	Ver hoja de transporte de insumos de la fase industrial.
		Gasoil	Secado de grano (centros de acopio)			224	MJ/kg sorgo	Ver cálculo en hoja de "Secado de grano"
		Energía eléctrica	Consumo Planta Industrial			553	kWh/m <sup>3</sup> etanol	Consumo de 3500 MWh por mes.
	Productos	Final	Etanol			211	m <sup>3</sup> /d	
DDGS					8527	kg/h		



## I.2 – Insumos fase agrícola

Dato	Descripción	Unidad	Valor	Observaciones
Distancia de cultivos a la planta PAY	Distancia promedio de los predios que cultivan y proveen a ALUR de sorgo grano	km	70	
Transporte Grano	Capacidad de los camiones	t	30	
Consumo gasoil	Barbecho	L gasoil/ha	1	
Consumo gasoil	Siembra	L gasoil/ha	7	
Consumo gasoil	Fertilización	L gasoil/ha	1	
Consumo gasoil	Aplicación Insecticida	L gasoil/ha	1	
Consumo gasoil	Cosecha	L gasoil/ha	12	
Fertilizante	Por ha o por tonelada cosechada	kg/ha cultivada	100	Fosfato di amónico (N-P-K: 18-46-0)
Fertilizante	Por ha o por tonelada cosechada	kg/ha cultivada	100	Urea (N-P-K: 46, 0, 0)
Funguicidas/Herbicidas	Por ha cultivada	L/ha cultivada	3	Herbicida: glifosato
Funguicidas/Herbicidas	Por ha cultivada	L/ha cultivada	3	Herbicida: atrazina líquida
Funguicidas/Herbicidas	Por ha cultivada	L/ha cultivada	1.5	Herbicida: duald gold
Coadyuvante	Por ha cultivada	L/ha cultivada	0.1	Coadyudante: speed wet maxion
Coadyuvante	Por ha cultivada	L/ha cultivada	1	Coadyudante: agral 90
Insecticida	Por ha cultivada	L/ha cultivada	1	Insecticida: lorsban
Riego	Litros de agua por ha cultivada	L/ha cultivada	0	no se riega artificialmente
Rendimiento del cultivo	Cantidad de sorgo cosechado (entero)	kg grano/ha cultivada	4030	
Semilla	Cantidad necesaria			Para cultivar una hectárea se requiere de semillas producidas por 0,06 hectáreas.

### I.3 – Transporte de insumos para la fase agrícola por barco y por camión

<b>Rendimiento grano</b>	4030	kg/ha
--------------------------	------	-------

**Distancias en barco:** desde país de origen hasta puerto de Montevideo

Cantidad de insumo (kg)	kg/ha	Origen (supuesto)	ton por kg de grano	Puerto (supuesto)	Millas maritimas*	km	tkm
Fosfato di amonico	106	China	2.63E-05	Shangai	11345	21011	0.553
Urea	106	China	2.63E-05	Shangai	11345	21011	0.553
Losban	1.5	China	3.68E-07	Shangai	11345	21011	0.008
Dual gold	1.7	China	4.34E-07	Shangai	11345	21011	0.009
Glifosato	5.4	China	1.34E-06	Shangai	11345	21011	0.028
Speed Wet Maxion	0.1	China	2.63E-08	Shangai	11345	21011	0.001
Agral 90	1.1	China	2.63E-07	Shangai	11345	21011	0.006
Atrazina	3.8	China	9.39E-07	Shangai	11345	21011	0.020
						<b>TOTAL</b>	<b>1.176</b>

Referencia distancias: Centro de Navegación Uruguayo: <http://www.cennave.com.uy/content/view/267/160/>

\*Conversión: 1 milla maritima 1852 m

## I.4 – Emisión de N<sub>2</sub>O durante la aplicación de fertilizantes y contenido en el rastrojo

**Descripción:** La estimación de la emisión de Oxido Nitroso (N<sub>2</sub>O) por aplicación de fertilizantes y por el rastrojo que permanece en el suelo luego de la cosecha, se realiza utilizando la herramienta Global Nitrous Oxide Calculator (GNOC), desarrollada por Joint Research. Esta herramienta fue desarrollada por la Unión Europea para armonizar las metodologías de cálculo de los diferentes países de la UE y la metodología sigue los requerimientos establecidos en los informes de UE de 2011 y 2014.

\*Para acceder al manual de la herramienta: [http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/documentation/The\\_Global\\_Nitrous\\_Oxide\\_Calculator\\_User\\_Manual\\_version\\_1\\_2\\_4.pdf](http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/documentation/The_Global_Nitrous_Oxide_Calculator_User_Manual_version_1_2_4.pdf)

Los datos de las características del suelo, que se deben de ingresar a la herramienta fueron brindados por Osvaldo Pérez de INIA.

- pH suelo = 5,5-7,5
- Alta tolerancia al estrés hídrico
- Aropiado para cultivarse en condiciones de secano
- Suelo mineral con cierto % de materia orgánica

Valor	Unidad	Referencia
0.814	kg N <sub>2</sub> O	por hectarea cultivada
215.6	kg CO <sub>2</sub> eq	
0.053	kg CO <sub>2</sub> eq	por kg de grano producido

Potencial de calentamiento del N <sub>2</sub> O	265
---	-----

Contribución	kg N <sub>2</sub> O	%
Aplicación	0.4953	60.88
Residuos suelo	0.5795	71.23

\*Para acceder al manual de la herramienta: [http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/documentation/The\\_Global\\_Nitrous\\_Oxide\\_Calculator\\_User\\_Manual\\_version\\_1\\_2\\_4.pdf](http://gnoc.jrc.ec.europa.eu/documentation/The_Global_Nitrous_Oxide_Calculator_User_Manual_version_1_2_4.pdf)

The screenshot displays the GNOG - Global Nitrous Oxide Calculator interface. It features a header with the European Commission logo and the text 'JOINT RESEARCH CENTRE GNOG - Global Nitrous Oxide Calculator'. The main area is divided into 'Select/Insert Parameters' and 'Environmental Parameters'. The 'Select/Insert Parameters' section includes dropdown menus for Crop (Sorghum), Soil Type (mineral), and Irrigation (no), along with input fields for Fresh Yield (3040), Mineral Fertilizer F<sub>SN</sub> (64), and Manure F<sub>ON</sub> (0). The 'Environmental Parameters' section includes dropdown menus for Eco-Climatic Zone (Tropical Moist), Climate Class (Temperate Continental), Vegetation Class (Cereals), Soil pH (5.5 - 7.3), Soil Organic C (%), Soil Texture (Fine), and Leaching (no). A 'Calculate' button is present. Below the input fields, there is a 'Result: Total N<sub>2</sub>O Emissions' section with a table showing Location ID (1466 - 1466), Country name (URUGUAY), Total soil N<sub>2</sub>O emissions [kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>] (0.8136), and Total soil N<sub>2</sub>O emissions [g CO<sub>2</sub>eq MJ<sup>-1</sup> crop] (0.81399). On the right side, there is a map showing the location of Paysandú, Uruguay.

## I.5 – Datos generales fase industrial

Dato	Unidad	Valor	Observaciones
Capacidad de Producción diaria. En base anhidra. Valor nominal o de diseño.	m <sup>3</sup> etanol/d	211	
Capacidad de Producción anual	m <sup>3</sup> etanol/año	69,630	330 días al año x 24 h.
Capacidad de almacenamiento de sorgo grano	t	18,000	18000 toneladas
Producción de DDGS	t/año	67,455	DDGS con una producción de 8517 kg /h.
Capacidad de procesamiento. Valor de diseño.	t procesada/d	552	
Tiempo de operación de la planta	días en el año	330	
Eficiencia de la fermentación	%	89	
Tiempo de fermentación sorgo grano	h	48-60	
Consumo eléctrico total por día de producción para sorgo grano	MWh/mes	3500	
Consumo de vapor total por día de producción de sorgo grano	kg/h	43,879	
Temperatura de fermentación	°C	32-33	
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento para la fermentación	°C	22	
Temperatura de salida del agua de enfriamiento para la fermentación	°C	27.8	
Capacidad del fermentador sorgo grano. Volúmen útil.	m <sup>3</sup> de carga	5220	4 fermentadores de 1450 m <sup>3</sup> y un depósito de vino de 2000 m <sup>3</sup> .
Flujo másico de entrada al destilador	kg/h	68,513	

## I.6 – Transporte de insumos en la fase industrial

**Distancias en barco:** desde país de origen hasta puerto de Montevideo

Insumo	t/año	t/h	t/m <sup>3</sup> etanol	Origen (supuesto)	Puerto (supuesto)	Millas maritimas*	km	tkm
AMG	60	6.94E-03	7.90E-04	EEUU	NY	5825	10787.9	8.521
Alfa amilasa	60	6.94E-03	7.90E-04	Brasil	Bahia	1725	3194.7	2.523
Proteasa	60	6.94E-03	7.90E-04	UE	Rotterdam	6270	11612.04	9.172
Levadura	12	1.39E-03	1.58E-04	EEUU	NY	5825	10787.9	1.704
Urea	432	5.00E-02	5.69E-03	Brasil	Bahia	1725	3194.7	18.169
Antiespumante	85.8	9.93E-03	1.13E-03	EEUU	NY	5825	10787.9	12.185
							<b>TOTAL</b>	<b>52.275</b>

Fuente distancias: Centro de Navegación Uruguayo: <http://www.cennave.com.uy/content/view/267/160/>

\*Conversión 1 milla maritima 1852 m

**Distancias en camión:** distancia recorrida dentro del país de origen (380 km) y dentro de Uruguay (Montevideo-Paysandú: 380 km)

Insumo	t/m <sup>3</sup> etanol	Distancia Mvdeo Pay	km en el país origen*	tkm
AMG	7.90E-04	380	760	0.600
Alfa amilasa	7.90E-04	380	760	0.600
Proteasa	7.90E-04	380	760	0.600
Levadura	1.58E-04	380	760	0.120
Urea	5.69E-03	380	760	4.322
Antiespumante	1.13E-03	380	760	0.858
			<b>TOTAL</b>	<b>7.102</b>

\*Se estima que en el país de origen se recorre un camino similar al que se recorre desde Montevideo hasta Paysandú. Se multiplica por dos.

## I.7 – Insumos para producción de eucaliptus

**Descripción:** La biomasa utilizada para abastecer la caldera de vapor, es el eucalipto. Los rolos de eucalipto se producen y transportan a la planta industrial con el fin de alimentar la caldera y generar vapor para el proceso industrial. La producción de eucalipto requiere de la aplicación de químicos, fertilizantes, esticidas herbicidas y de manejo agrícola durante las diferentes etapas incluyendo la cosecha. Se recogió y cunificó información de estas actividades.

El eucalyptus grandis, que es la especie cultivada con fines energeticos, el período de crecimiento es de aroximadamente 10 años y pasado dicho tiempo, se cosechan aproximadamente 30 toneladas por hectárea por año, con una humedad de aproximadamente el 45%.

Un metro cubico de rolos de 45% de humedad pesa aproximadamente una tonelada.

Datos generales		
Producción Etanol	8.8	m <sup>3</sup> /h
Madera (45% hum)consumida por hora	17.0	t/h
Madera (45% hum)consumida por m3 etanol	1.9	t/m <sup>3</sup>
Madera consumida por m3 etanol	1.9	t/m <sup>3</sup> etanol

Producción Rolos (E. grandis)	Cantidad	Unidades
Rendimiento	30	m3/ha/año
Periodo crecimiento (turno)	10	años
Producción por turno	300	t/turno
Rendimeinto en peso	30	t/ha/año

Insumo	Cantidad por ha	Cantidad por t	Observaciones
Fosfato dimaonico (kg)	117	0.39	Se aplica 90 gramos por planta. Se plantan aproximadamente 1300 plantas por ha.
Glifosato (kg)	15	0.05	
Gasoil cosecha (l)	900	3	Se utilizan 3 itros de gasoil por m3 sólido de madera. Considerando una relación de 1 m <sup>3</sup> por tonelada y que cumplido el período de crecimiento (10 años) se producen aproximadamente 300
Gasoil siembra, laboreo y otros (l)	80	0.27	

*Estos insumos se aplican una unica vez en el período de 10 años de crecimiento y luego se cosechan aproximadamente 300 toneladas por ha.*

<b>Emisión por aplicación de fertilizante</b>	<b>Unidades</b>	<b>Observaciones</b>
210.6	kg N/ha/year      N in synthetic fertilizer	
18	N en glifosato	
4.0E-02	kg N <sub>2</sub> O por ha/año.	Este valor se calcula con la planilla Biograce GHG calculation tool, versión 1.
1.3E-03	kg N <sub>2</sub> O por ton eucalyptus	
265	Potencial de calentamiento del N <sub>2</sub> O	
3.5E-01	kg CO <sub>2</sub> por ton eucalyptus	

Fuente: Biograce - IPCC Chapter 11 report. BioGrace GHG calculation tool for electricity, heat and cooling. Versión 1.

## I.8 – Secado de granos en centros de acopio

Consumo de energía para el secado de grano, pasando de 20 % de humedad en base seca a 14 % de humedad (en bs).

Referencia: Departamento de agricultura FAO, "Secado de granos y secadoras" <http://www.fao.org/docrep/x5028s/X5028S03.htm>

Una secadora convencional, tipo torre, correctamente construida y mantenida, tiene un consumo energético de aproximadamente **1000 kcal por kg de agua evaporada**. Esta cantidad se compone de la siguiente manera:

Tipo de consumo de energía	Cantidad	Unidad
Calor necesario para evaporar 1 kg de agua (entalpía)	600	kcal
Pérdida por el calor sensible que se va en el aire usado (entalpía del aire entrando a 20 y saliendo a 90 °C)	310	kcal
Perdidas de calor por conducción, radiación y convección hacia el exterior (2-5 % del total)	30	kcal
Pérdida por el calor transportado por el grano	80	kcal
<b>Total</b>	<b>1020</b>	<b>kcal</b>

Poder calórico del Gasoil	10100	kcal/kg
---------------------------	-------	---------

Para tomar un cao conservador, se considera que el grano ingresa con un 20% de humedad, y el secado deba llevar al grano de 20 a 14 % de humedad.

1 ton grano 20% humedad en base seca	200	kg agua
1 ton grano 14% humedad en base seca	140	kg agua
En una tonelada de grano se evaporan	60	kg agua
Para evaporar 60 kg de agua se requieren	61200	Kcal

Se consumen 61200 kcal por tonelada de grano en base seca.

Energía (kcal)	61200	1140	kg grano
	53684	1000	kg grano

Por cada ton de sorgo grano al 14% se consumen 53684 kcal.

53684	224.4	MJ
-------	-------	----



## I.9 – Producción de pasturas de avena

¡Error! Vínculo no válido.

Relación de sustitución de productos

7	kg pastura	4.6	kg DDGS
1.5	kg pastura	1	kg DDGS

Las pasturas artificiales de avena, que son las representadas en este caso, tienen un contenido estimado de proteínas del 20%, mientras que el DDGS tiene un 30% de contenido en proteínas aproximadamente.

El contenido de proteínas es determinante en relación al aporte nutritivo en el alimento animal, y sobre eso se calcula el grado de sustitución entre un alimento y otro.

Por lo tanto si el animal se alimenta con 7 kg de pastura por día, digamos que su requerimiento en proteínas sería de 1,4 kg de proteína por día.

Para poder abastecer al animal con esta cantidad de proteínas con DDGS, se requeriría la siguiente cantidad de DDGS.

1	kg DDGS	0.3	kg proteína
4.7	kg DDGS	1.4	kg proteína

Por lo tanto, para poder abastecer con 1,4 kg diarios de proteína, necesitaré 4,7 kg de DDGS diarios. Por lo tanto por cada 7 kg de pasturas, necesito 4,7 kg de DDGS.

Si por cada m<sup>3</sup> de etanol se producen 970 kg de DDGS, lo que se evita de producir por cada m<sup>3</sup> de etanol producido es 1444 kg de pasturas.

7	kg pasturas avena	4.7	kg DDGS
1444.5	kg pasturas avena	970	kg DDGS

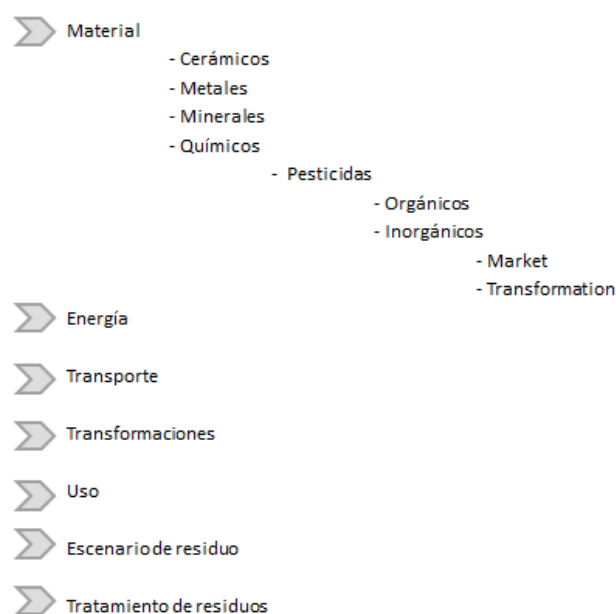
## **I.10 – Transporte de bioetanol a los centros de mezcla del país**

¡Error! Vínculo no válido.

## Anexo II - Base de datos Ecoinvent versión 3

La BD Ecoinvent versión 3, consta de más de 10.000 conjuntos de datos relacionados entre sí. Estos conjuntos de datos son escenarios de procesos, los cuales se presentan bajo dos enfoques, el de consecuencia (“consequential”) y el de atribución (“attributional”). El de consecuencia describe los efectos ambientales de un cambio realizado sobre un determinado escenario. El de atribución estima las cargas ambientales de un escenario determinado. La elección de un modelo atribucional, o de uno consecuencial puede entregar resultados muy diferentes (Weidema et al., 2013). Para este estudio, los escenarios utilizados de la base de datos de Ecoinvent versión 3, son los de enfoque de atribución por defecto.

Los procesos o escenarios de las BD se organizan por tipo de productos y sectores según sea fabricación de materiales, generación de energía, transporte, transformaciones, uso, escenario de residuos y tratamiento de residuos. Dentro de cada uno de estos existen subdivisiones que permite ordenar un nivel más los datos disponibles. Luego de las subcategorías, el árbol culmina bajo las opciones de “Market” y “Transformation”. “Transformation” implica la realización de actividades humanas que transforman determinados elementos de entrada en salidas, por ejemplo la transformación de rolos de madera, en bancos de madera. “Market” implica la transferencia de un bien o producto y refiere a la actividad de intermediario o de mercado, donde toma un producto ya transformado del productor, y lo entrega al consumidor, donde no hay un proceso de transformación. La siguiente Figura 1 se ejemplifica la desagregación de los procesos disponibles, hasta alcanzar las opciones de Market y Transformation.



**Figura 1:** Categorías de los escenarios de las bases de datos

Al seleccionar la categoría de interés (una de las opciones del árbol anterior), se encuentran los procesos correspondientes, bajo tres modelos de sistemas: atribucional por defecto, atribucional con reciclado y consecuencial, y a su vez cada uno de estos tres modelos como “Unit” o “System”. Los procesos o escenarios “Unit” y “System” en cuanto a las cargas ambientales entregan los mismos resultados, la diferencia es la forma de presentar la información. Mientras los “Unit” muestran sus inputs como procesos unitarios que ingresan desde la tecnosfera, los “System” presentan las entradas directamente desde la naturaleza,

recorriendo hacia atrás los procesos unitarios que precedieron al proceso en estudio y sumando todas las cargas ambientales.

A modo de ejemplo, en la Figura 2 se presentan los escenarios disponibles al realizar una búsqueda avanzada de fabricación de fertilizantes y de urea en particular.

Nombre	/	Ud.	Tipo de residuo	Proyecto	Estado
Urea, as N {RER}  production   Alloc Def, S		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, default - system	Ning.
Urea, as N {RER}  production   Alloc Def, U		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, default - unit	Ning.
Urea, as N {RER}  production   Alloc Rec, S		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, recycled content - system	Ning.
Urea, as N {RER}  production   Alloc Rec, U		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, recycled content - unit	Ning.
Urea, as N {RER}  production   Conseq, S		kg	no definido	Ecoinvent 3 - consequential - system	Ning.
Urea, as N {RER}  production   Conseq, U		kg	no definido	Ecoinvent 3 - consequential - unit	Ning.
Urea, as N {RoW}  production   Alloc Def, S		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, default - system	Ning.
Urea, as N {RoW}  production   Alloc Def, U		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, default - unit	Ning.
Urea, as N {RoW}  production   Alloc Rec, S		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, recycled content - system	Ning.
Urea, as N {RoW}  production   Alloc Rec, U		kg	no definido	Ecoinvent 3 - allocation, recycled content - unit	Ning.
Urea, as N {RoW}  production   Conseq, S		kg	no definido	Ecoinvent 3 - consequential - system	Ning.
Urea, as N {RoW}  production   Conseq, U		kg	no definido	Ecoinvent 3 - consequential - unit	Ning.

**Figura 2:** Ejemplo de búsqueda de la fabricación del fertilizante urea

Tal como se observa en la Figura 2, otra característica que se presenta en la lista de los escenarios disponibles, a través de las siglas presentadas entre corchetes, es el país donde se desarrolla dicho escenario. Este código internacional es definido por la norma ISO 3166-1-alpha-2.

### **Anexo III – Fichas de escenarios de procesos**

El presente Anexo presenta las fichas de los escenarios utilizados para representar la fabricación de insumos, y actividades vinculadas al proceso en estudio. Estos escenarios son parte de la BD de Ecoinvent versión 3.

**III.1 – Atrazina**

**III.2 – Dual gold**

**III.3 – Fostafo diamónico**

**III.4 – Glifosato**

**III.5 – Lorsban**

**III.6 – Urea**

**III.7 – Transporte barco**

**III.8 – Transporte camión**

**III.9 – Central de energía eólica**

**III.10 – Central de energía hidráulica**

**III.11 – Central de energía térmica (fósil)**

**III.12 – Consumo de diésel**

**III.13 – Secado de grano**

### III.1 – Fbricación de atrazina

<b>Activity</b>	
Activity Name	atrazine production
Type	UnitProcess
General Comment	This dataset represents the production of atrazine (1 kg of active ingredient). Raw materials are modelled with a stoichiometric calculation. Energy consumption is modelled with data from a similar process. The emissions are estimated. Infrastructure is included with a default value.
Included Activities Start	From reception of precursors (ammonia, cyanuric chloride, ethanol, isopropanol, and sodium hydroxide) at the factory gate.
Included Activities End	This activity ends with atrazine at the factory gate. The dataset includes the input materials, energy uses, infrastructure and emissions. The dataset doesn't include emulsives, additives etc.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 2021:Manufacture of pesticides and other agrochemical products
<b>Geography</b>	
Shortname	RoW
Longname	Rest-of-World
Comment	The inventory is modelled for Europe.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	Pesticides
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2000
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	Transports and emissions are modelled with standard methods. This dataset has been copied from an original dataset covering the geography RER. The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.2 – Fabricación de Dual gold

<b>Activity</b>	
Activity Name	metolachlor production
Type	UnitProcess
General Comment	<p>Production of metolachlor including materials, energy uses, infrastructure and emissions.</p> <p>[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	
Included Activities End	Production of metolachlor including materials, energy uses, infrastructure and emissions.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 2021:Manufacture of pesticides and other agrochemical products
System : Value	EcoSpold01Categories: agricultural means of production/pesticides
<b>Geography</b>	
Shortname	RoW
Longname	Rest-of-World
Comment	The inventory is modelled for Europe.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	pesticides
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2000
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	

System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	Transports and emissions are modelled with standard methods. This dataset has been copied from an original dataset covering the geography RER. The uncertainty has been adjusted accordingly.



### III.3 – Fabricación de fosfato diamónico

<b>Activity</b>	
Activity Name	diammonium phosphate production
Type	UnitProcess
General Comment	<p>Refers to 1 kg N, resp. 1 kg P2O5 in diammonium phosphate with a N-content of 18.0% and a P2O5-content of 46.0%. The multioutput-process 'diammonium phosphate, at regional storehouse' delivers the co-products 'diammonium phosphate, as N, at regional storehouse' and 'diammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse'. Allocation factors are based on the energy requirements of the respective nutrients for the production processes: 60% for 'diammonium phosphate, as N, at regional storehouse' and 40% for 'diammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse' (exceptions see report). The allocated inventories must always be used simultaneously.</p> <p>[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	
Included Activities End	The unit process inventory takes into account the production of diammonium phosphate from ammonia and phosphoric acid. Transports of raw materials and intermediate products to the fertiliser plant as well as the transport of the fertiliser product from the factory to the regional department store were included. Production and waste treatment of catalysts, coating and packaging of the final fertiliser products were not included.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 2012:Manufacture of fertilizers and nitrogen compounds
System : Value	EcoSpold01Categories: agricultural means of production/mineral fertiliser
<b>Geography</b>	
Shortname	RER
Longname	Europe
Comment	According to the reference of this inventory, the European average is derived from mean values of several fertiliser plants within Europe. The production of raw materials and/or intermediates outside Europe was taken into account by considering the production technology in the respective country and the relative import shares.

<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	Production inventory was derived from detailed literature studies and specifications from the manufacturer, relevant for the European production. Transport specifications of the fertiliser product to the regional department store, which were not included in the reference used for this inventory, were complemented by data given in Patyk & Reinhardt (1997).
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	1999
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	

### III.4 – Fabricación de glifosato

<b>Activity</b>	
Activity Name	glyphosate production
Type	UnitProcess
General Comment	<p>Production of glyphosate including materials, energy uses, infrastructure and emissions.</p> <p>[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	
Included Activities End	Production of glyphosate including materials, energy uses, infrastructure and emissions.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 2021:Manufacture of pesticides and other agrochemical products
System : Value	EcoSpold01Categories: agricultural means of production/pesticides
<b>Geography</b>	
Shortname	RoW
Longname	Rest-of-World
Comment	The inventory is modelled for Europe.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	pesticides
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2000
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default

Extrapolations

Transports and emissions are modelled with standard methods. This dataset has been copied from an original dataset covering the geography RER. The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.5 – Fabricació de l'orsban

<b>Activity</b>	
Activity Name	organophosphorus-compound production, unspecified
Type	UnitProcess
General Comment	<p>Production of organophosphorous-compounds including materials, energy uses, infrastructure and emissions.</p> <p>[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	
Included Activities End	Production of organophosphorous-compounds including materials, energy uses, infrastructure and emissions.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 2021:Manufacture of pesticides and other agrochemical products
System : Value	EcoSpold01Categories: agricultural means of production/pesticides
<b>Geography</b>	
Shortname	RoW
Longname	Rest-of-World
Comment	The inventory is modelled for Europe.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	pesticides
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2000
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default

Extrapolations

Transports and emissions are modelled with standard methods. This dataset has been copied from an original dataset covering the geography RER. The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.6 – Fabricación de urea

<b>Activity</b>	
Activity Name	urea production, as N
Type	SystemTerminated
General Comment	<p>Refers to 1 kg N, resp. 2.17 kg urea with a N-content of 46.0%</p> <p>[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	The unit process inventory takes into account the production of urea from ammonia and carbon dioxide. Transports of the intermediate products were included as well as the transport of the fertiliser product from the factory to the regional storehouse. Production and waste treatment of catalysts, coating and packaging of the final fertiliser products were not included. CO <sub>2</sub> -consumption (733 kg CO <sub>2</sub> /ton of urea) during production of urea was not included, since CO <sub>2</sub> arises as a by-product during the production of ammonia. Infrastructure was included by means of a proxy module.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 2012:Manufacture of fertilizers and nitrogen compounds
System : Value	EcoSpold01Categories: chemicals/organics
<b>Geography</b>	
Shortname	RoW
Longname	Rest-of-World
Comment	According to the reference used for this inventory, the European average is derived from mean values of several fertiliser plants within Europe. The production of raw materials and/or intermediates outside Europe was taken into account by considering the production technology in the respective country and the relative import shares.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	Production inventory was derived from detailed literature studies and specifications of the manufacturer, relevant for the European production. Transport specifications of the product to the regional department store, which were not included in the reference used for the inventory, were complemented by data given in Patyk & Reinhardt (1997).

<b>Time Period</b>	
Start Of Period	1999
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	No extrapolations done for inputs, emissions partly extrapolated from emission factors originating from plants in selected European countries. This dataset has been copied from an original dataset covering the geography RER. The uncertainty has been adjusted accordingly.



### III.7 – Transporte barco

<b>Activity</b>	
Activity Name	transport, freight, sea, transoceanic ship
Type	SystemTerminated
General Comment	The dataset represents the entire transport life cycle including the production, operation and maintenance of the transoceanic ship and the construction of the port. It represents as well the transport of good with a transoceanic freight ship with a tank size of aproximately 50'000 dwt and an average of slow speed engine and steam turbine propulsion.
Included Activities Start	Transport starting with the production of one transoceanic ship. Service of the energy use and combustion emissions starts with the consumption of fuel for propelling. From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	The dataset ends with the service of transporting 1 ton over a distance of 1 km. The dataset includes the production, operation and maintenance of one transoceanic ship and construction of one port. The activity of energy use and combustion emissions ends with the service of transporting 1 ton over a distance of 1 km. The dataset includes the consumption of fuel, airborne gaseous emissions, particulate emissions, heavy metal emissions, persistent organic compounds (POPs) emissions, tributyltin compounds emissions to water and until and including the disposal of bilge oil.
<b>Classifications</b>	
System : Value	EcoSpold01Categories: transport systems/ship
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 5012:Sea and coastal freight water transport
<b>Geography</b>	
Shortname	GLO
Longname	Global
Comment	Data from one port in Netherlands is employed as an estimate for international water transportation. Data of the energy use and operation emissions is of global scope.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	The data of the transoceanic ship represents a ship with a tank size of aproximately 50'000 dwt and an average of slow speed engine and steam turbine propulsion. And the data of the port represents the conditions at the Port of Rotterdam in Netherlands. The data of the energy use and combustion emissions represent an average between steam turbine (5%) and diesel engine (95%) propulsion. The fuel used is heavy fuel oil. Fuel consumption and emissions are representative for freight ship with a tank size of aproximately 50'000 dwt. Exhaust emissions from marine diesel engines comprise carbon dioxide, carbon monoxide, oxides of sulphur and nitrogen, partially reacted and non-combusted hydrocarbons and particles. Metals and organic micro-pollutants are emitted in very small quantities. The data represents solid bulk transport.
<b>Time Period</b>	

Start Of Period	1992
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	This dataset has been extrapolated from year 2000 to the year of the calculation (2014). The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.8 – Transporte camión

Activity	
Activity Name	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3
Type	UnitProcess
General Comment	<p>This dataset represents the service of 1tkm freight transport in a lorry of the size class &gt;32 metric tons gross vehicle weight (GVW) and Euro III emissions class. The transport datasets refer to the entire transport life cycle i.e. to the construction, operation, maintenance and end of life of vehicle and road infrastructures. Fuel consumption and emissions are for average European journeys and load factors and not representative of a specific transport scenario. The average load factors are taken from the Tremove model v2.7b (2009) and EcoTransIT (2011) report. These are as follows: Lorry size class Average load factor GVW 3.5-7.5t 0.98t 4.98t 7.5-16t 3.29t 9.29t 16-32t 5.79t 15.79t &gt;32t 19.20t 33.20t The lorry size and load factor determines the GVW and therefore also the fuel consumption and amount of both exhaust and non-exhaust emissions. Non-exhaust emissions are those resulting from tyre, brake and road wear. Fuel consumption and exhaust emissions are taken from v3.1 of the HBEFA model, using the data for Germany and without applying model weighting. There are a higher number of size categories used in HBEFA than in ecoinvent and so the data are grouped in order to fit the lorry size classes used in ecoinvent. The selective catalytic reduction (SCR) technology is around 3 times more common than that of exhaust gas recovery (EGR) as an emissions reduction measure and so the emission factors given in the dataset are weighted to reflect this. The data for the HBEFA categories SCR* and VI* were disregarded. The exhaust emissions caused by the burning of fuel are either fuel dependent (fuel type and quantity) or Euro class dependent. The latter reflect the emission regulations to which the vehicle complies. Regulated emissions are CO, NOx, particulate matter (PM) and total hydrocarbons (HC). Data from the Emissions Inventory Guidebook (EMEP/EEA, 2013) were used for specific exhaust emissions not covered by the HBEFA model. Non-exhaust emissions are accounted for as weight dependent by-products and exist as separate datasets. For road infrastructure the expenditures and environmental interventions due to construction of roads have been allocated based on the gross tonne kilometer performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometer performance. The same assumption on vehicle lifetime performance has been transferred from the ecoinvent v2 datasets of 540 000 km/vehicle. The production, maintenance and disposal of the vehicle are as reported in the ecoinvent (2007) report on transport services. Main data sources: De Ceuster, G., et al. (2009) TREMOVE: Final Report. Model code v2.7b, 2009. European Commission, Brussels. Keller, M. et al. (2010) Handbook emission factors for road transport v3.1, HBEFA. INFRAS, Berne, CH. Knörr, W. et al. (2011) Ecological Transport Information Tool for Worldwide Transports (EcoTransIT): Methodology and data update. Berlin, Hannover, Heidelberg, DE. Ntziachristos, L., et al. (2013) EMEP/EEA air pollutant emissions inventory guidebook 2009: Exhaust emissions from road transport. European Environment Agency, Copenhagen, DK. Spielmann, M., et al. (2007) Transport Services. ecoinvent report No. 14., Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.</p>
Included Activities Start	From combustion of fuel in the engine. The dataset takes as input the infrastructure of the lorry and road network, the materials and efforts needed for maintenance of these and the fuel consumed in the vehicle for the journey.

Included Activities End	The activity ends with the transport service of 1tkm and the emissions of exhaust and non-exhaust emissions into air, water and soil.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 4923:Freight transport by road
System : Value	EcoSpold01Categories: transport systems/road
<b>Geography</b>	
Shortname	RER
Longname	Europe
Comment	<p>The data for road infrastructure reflect Swiss conditions. Data for vehicle operation, maintenance and maintenance represents generic European data. Data for the vehicle disposal reflects the situation. The environmental interventions due to vehicle transport are modelled by environmental interventions due to vehicle operation with impacts due to vehicle maintenance, vehicle disposal, road construction, operation and maintenance of road disposal. So-called demand factors are used to link the transport service component to the functional unit of one tonne kilometre [tkm] (Spielmann &amp; Scholz 2005).</p> <p>References:</p> <p>Spielmann M. and Scholz R. W. (2005) Life Cycle Inventories for Transport Services - European Data for Freight Transport. In: Int J LCA, 10(1), pp.</p>
<b>Technology</b>	
Technology Level	Old
Comment	Diesel and diesel engine. Lorry transport is further differentiated with respect to vehicle emission technology standard (EURO-standard). Technology classifications are based on the EURO standard used widely within the works of the European Environment Agency, particularly in the Inventory Guidebook.
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2009
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	This dataset has been extrapolated from year 2013 to the year of the calculation (2014). The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.9 – Central de energía eólica

<b>Activity</b>	
Activity Name	electricity production, wind, >3MW turbine, onshore
Type	SystemTerminated
General Comment	This dataset represents the production of high voltage electricity at onshore grid-connected wind power plants with a capacity of more than 3MW (3MW excluded) MW in Brazil in 2008. It includes operation and maintenance expenditures as well as infrastructure inputs. Wind load hours have been adapted to . At the moment, the class of onshore > 3 MW wind turbines is approximated with a 4.5 MW onshore wind turbine consisting out of the infrastructure datasets for the "wind turbine construction" and the "network connection construction". The wind turbine's parts are defined to be everything except for the network connection, i.e. rotor, nacelle, tower, and foundation.
Included Activities Start	From operation of the wind power plant to high voltage electricity at the plant. According to (European Communities 2001), electricity produced with wind turbines in a wind power plant is connected to medium voltage or high voltage systems, depending on the size of the windfarm. Normally, each wind turbine contains a transformer from low voltage to medium voltage. The network connection additionally transforms the electricity to high voltage electricity. It is assumed here, that there are no stand-alone grid-connected small wind turbines and that all electricity is connected to the network in form of high voltage electricity. Source: European Communities. 2001. Wind Turbine Grid Connection and Interaction. Deutsches Windenergie-Institut /Tech-wise A/S /DM Energy, p. 7 Tab.2.1 From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	This activity ends with the production of 1kWh of high voltage electricity produced at the power plant and delivered to the grid. This dataset includes - the operation and maintenance of the wind power plant - change of lubricating oil every year This dataset doesn't include - raw materials extraction, decommissioning and waste treatment as these activities are already included in infrastructure datasets - transformation of the electricity produced in order to deliver in to the grid as this is already included in the infrastructure datasets.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 3510:Electric power generation, transmission and distribution
<b>Geography</b>	
Shortname	BR
Longname	Brazil
Comment	
<b>Technology</b>	
Technology Level	Modern
Comment	Technology of an Enercon E-112 4.5MW wind power plant modelled with a dataset for the wind turbine (moving+fixed parts) and a network connection each. See dataset "wind turbine construction, 4.5MW, onshore" for detailed

	technical information.
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2008
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	This dataset has been extrapolated from year 2008 to the year of the calculation (2014). The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.10 – Central de energía hidráulica

<b>Activity</b>	
Activity Name	electricity production, hydro, reservoir, tropical region
Type	SystemTerminated
General Comment	<p>This dataset represents the production of high voltage electricity at grid-connected reservoir hydropower plants in Brazil in 2008. Here, the reservoir hydropower plants are modelled with tropical region plants based on data from Swiss hydropower plants. A representative sample of Swiss dams with a height of more than 30 metres is taken into account for calculating the input. Lifetime is assumed to be 150 years for the structural part and 80 years for the turbines. Greenhouse gas emissions are calculated on the basis of a sample of 9 reservoirs in dos Santos et al. 2006 and taken into account in the form of carbon dioxide and methane. There are great uncertainties on the origin of the CH<sub>4</sub>- and CO<sub>2</sub>-emissions. A part of them are assumed to originate from living biomass and from sewage discharged in the reservoirs and not only from biomass flooded.</p> <p>dos Santos M. A., Rosa L. P., Sikar B., Sikar E. and dos Santos E. O. (2006) Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermopower plants. In: Energy Policy, 34, pp. 481-488.</p>
Included Activities Start	This dataset starts from the power plant ready to produce electricity, i.e. the reservoir filled with water. From (potential) energy in water, entering the power plant. From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	This activity ends with 1kWh of high voltage electricity produced at the power plant and arrived at the busbar. This dataset includes - the area/volume occupied for the barrage, power station, and the lake - a preliminary estimation of emissions of carbon dioxide and methane - operation and maintenance activities and materials of the power plants, such as lubricating oil or mass of water passing through the turbines. This dataset doesn't include - land use for access roads to the reservoir - raw materials extraction, decommissioning and waste treatment as these activities are already included in the infrastructure datasets - transformation of the electricity produced. - dinitrogen oxide emissions
<b>Classifications</b>	
System : Value	EcoSpold01Categories: hydro power/power plants
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 3510:Electric power generation, transmission and distribution
<b>Geography</b>	
Shortname	BR
Longname	Brazil
Comment	Emission data fro 9 hydro plants in Brazil
<b>Technology</b>	
Technology Level	Modern
Comment	Storage power plants have an appendant reservoir. The size of the reservoir can range from daily, monthly to annual storage reservoirs. According to the net head high-pressure, medium-pressure and low-

pressure systems can be distinguished. High- and medium-pressure systems are constructed as dams. High-pressure storage power plants with a head of over 50 meters are very common in Switzerland. For this dataset concrete dams (arch dams and gravity dams) with a height of more than 30 meters are taken into account. Also pumped storage power plants are included because in most cases the data is only available for the overall generation system. The same counts for high- and medium-pressure and alpine run-of-river power plants which are also included in the storage power plant dataset. Due to the fact that the efforts for the plant construction are similar to storage power plants and that the estimated production is comparatively low, high- and medium-pressure run-of-river power plants are covered by the reservoir power station dataset. The technology used in the dataset has an overall efficiency of 82%, more modern technologies show an overall efficiency of about 88%. The overall efficiency is composed of the efficiency of the works water channel, the turbine, the generator and the transformer and are listed below: Efficiency of power plant current modern Works water channel 0.95 0.95 Turbine 0.87 0.91 Generator 0.96 0.98 Transformer 0.98 0.99 Reservoir power plant total without works water channel 0.82 0.88 with works water channel 0.78 0.84 Pumped storage power plant 0.70 0.74 The losses along the works water channel are primarily caused by friction and are calculated from the difference between gross and net head. Based on this calculation the efficiency of the works water channel amounts to 95%. The losses depend on the flow rate and have its maximum at full load. The smaller the cross section of adits and pressure pipelines, the higher the flow velocity and thus the friction losses. In older plants according to Bischof (1992) the efficiency of works water channels could be increased generally more than by replacing turbines and generators. The efficiency losses in turbines depend on the turbine type (Kaplan, Francis, Pelton, etc.), the turbine output and on the ratio between turbined water amount and the rated water amount. In König (1997) examples for curve progressions of the relationship between these variables are shown. For current power plants an efficiency of 87% is assumed, more modern turbines show an efficiency of about 91%. The efficiency of generators depends on the output, the rotation speed of the generator and the cooling system. Some relevant data can be found in König (1997). For today's power plants an efficiency of approximately 96% is assumed, modern generators show an efficiency of about 98%. The efficiency of transformers amounts to 98%, respectively 99%.

References:

Bischof, R. (1992) Modernisierungspotential bei bestehenden Wasserkraftwerken. Vortrag beim Schweizerischen Technischen Verband, Sektion Graubünden, 21. Oktober 1992. Churwalden, Schweiz [unpublished].

König F., von (1985) Bau von Wasserkraftanlagen. C.F. Müller, Karlsruhe.

<b>Time Period</b>	
Start Of Period	2008
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	This dataset has been extrapolated from year 2008 to the year of the calculation (2014). The uncertainty has been adjusted accordingly.



### III.11 – Central de energía térmica (fósil)

<b>Activity</b>	
Activity Name	electricity production, oil
Type	SystemTerminated
General Comment	<p>This dataset has been created as a copy of the dataset for Italy (IT). Production volumes have been adjusted.</p> <p>Emissions, materials use, infrastructure, etc. for oil input to power plants [This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	All energy use, use of chemicals, emissions to air and water including treatment of flue gasses and effluents.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 3510a: Electric power generation based on liquid fuels
System : Value	EcoSpold01Categories: oil/power plants
<b>Geography</b>	
Shortname	BR
Longname	Brazil
Comment	
<b>Technology</b>	
Technology Level	Modern
Comment	Estimation for average technology.
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	1985
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default

Extrapolations

The Annual Production Volume is valid for the year 2008. Uncertainty has been adjusted accordingly

### III.12 – Consumo de diesel

<b>Activity</b>	
Activity Name	diesel, burned in building machine
Type	SystemTerminated
General Comment	<p>This module is based on the data included in the report Oekoinventare von Energiesystemen 1996. The diesel consumption and the emissions are updated using the Swiss "Offroad database" and applied to year 2000. This module should not be used if its relative importance would be high in a certain environmental inventory.</p> <p>[This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report (<a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a>), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]</p>
Included Activities Start	From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	Includes the inputs " building machine" for infrastructure, lubricating oil and fuel consumption, and some measured air emissions as output.
<b>Classifications</b>	
System : Value	EcoSpold01Categories: construction processes/machinery
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 4312:Site preparation
<b>Geography</b>	
Shortname	GLO
Longname	Global
Comment	Certain elementary flows or intermediate product flows are extrapolated from RE conditions.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	Average current technology for one typical machine representing the category.
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	1996
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	

System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	This dataset has been extrapolated from year 2001 to the year of the calculation (2014). The uncertainty has been adjusted accordingly.

### III.13 – Secado de grano

<b>Activity</b>	
Activity Name	heat production, light fuel oil, at industrial furnace 1MW
Type	SystemTerminated
General Comment	Inventory for the operation of an oil boiler, data related to fuel input. [This dataset was already contained in the ecoinvent database version 2. It was not individually updated during the transfer to ecoinvent version 3. Life Cycle Impact Assessment results may still have changed, as they are affected by changes in the supply chain, i.e. in other datasets. This dataset was generated following the ecoinvent quality guidelines for version 2. It may have been subject to central changes described in the ecoinvent version 3 change report ( <a href="http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/">http://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-version-3/reports-of-changes/</a> ), and the results of the central updates were reviewed extensively. The changes added e.g. consistent water flows and other information throughout the database. The documentation of this dataset can be found in the ecoinvent reports of version 2, which are still available via the ecoinvent website. The change report linked above covers all central changes that were made during the conversion process.]
Included Activities Start	From cradle, i.e. including all upstream activities.
Included Activities End	Direct air emissions from combustion, including infrastructure, fuel consumption, waste and auxiliary electricity use.
<b>Classifications</b>	
System : Value	ISIC rev.4 ecoinvent: 3530a: Steam and air conditioning supply based on liquid fuels
System : Value	EcoSpold01Categories: oil/heating systems
<b>Geography</b>	
Shortname	RoW
Longname	Rest-of-World
Comment	Assumption for operation in Europe.
<b>Technology</b>	
Technology Level	Current
Comment	Average non-modulating, non-condensing furnace used in 2000.
<b>Time Period</b>	
Start Of Period	1991
End Of Period	2014
<b>Modelling And Administrative</b>	
<b>Representativeness</b>	
System Model	Allocation, ecoinvent default
Extrapolations	none This dataset has been copied from an original dataset covering the geography Europe without Switzerland. The uncertainty has been adjusted accordingly.