



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO

IV Reunión Nacional de la Red Temática en Bioenergía  
XIII Reunión de la Red Mexicana de Bioenergía  
3er Taller Internacional Biorrefinerías de Pequeña Escala para  
el Desarrollo Rural de America Latina y Europa  
Cuernavaca, 14 de Noviembre del 2017



RED TEMÁTICA DE  
BIOENERGÍA



# Diseño de procesos e impactos ambientales de las biorrefinerías



**Prof. Germán Aroca**

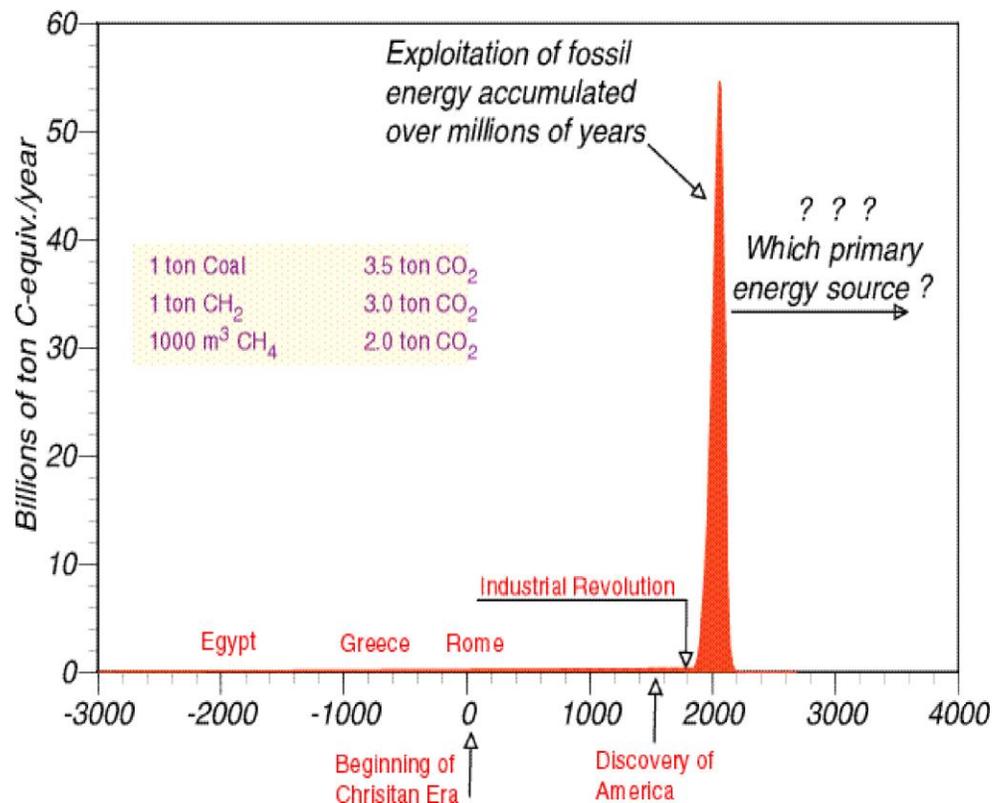
Escuela de Ingeniería Bioquímica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,  
Chile

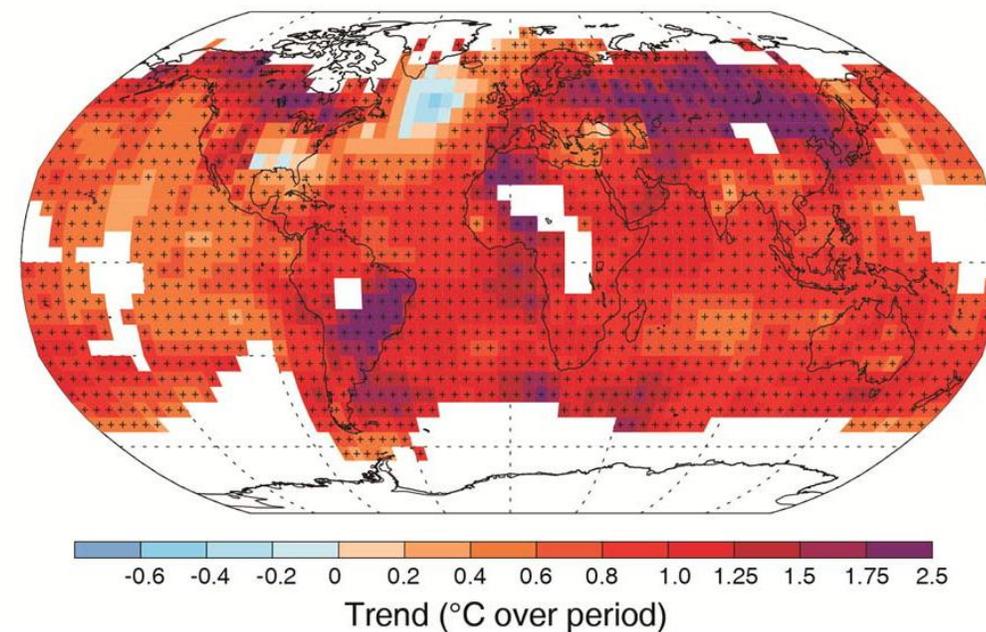
# Contenido

- Introducción
  - Principales motivaciones
- Determinación de Impactos Ambientales
  - Análisis de Ciclo de Vida
- Caso: Alternativas de proceso den la Producción de bioetanol de 2da generación en Chile
  - Diseño de procesos
  - ACV

# Era del Petróleo



(b) Observed change in average surface temperature 1901–2012



(Olander, 2004)



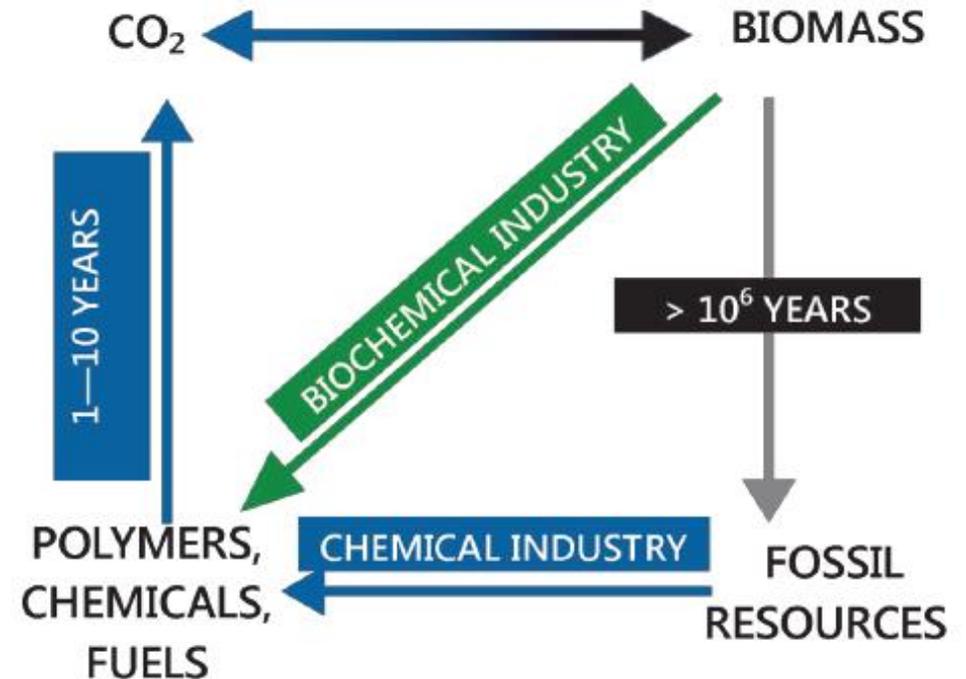
# Emisiones de CO<sub>2</sub> y calentamiento

- Emisión global anual de carbono a la atmósfera es de 6,6 GTon,
- Prefijo Giga :  $10^9$  : 1.000.000.000.-
- 1 GTon C  $\rightarrow$  24,2 GTon CO<sub>2</sub>
- Reservorios de Carbono
  - Atmósfera : 750 GigaToneladas (C)
  - Biomasa : 650 GigaToneladas (C)
  - Suelo : 1.500 GigaToneladas (C)
- Aumento de Carbono en la atmósfera desde antes del periodo pre-industrial es de 200 Gigatoneladas

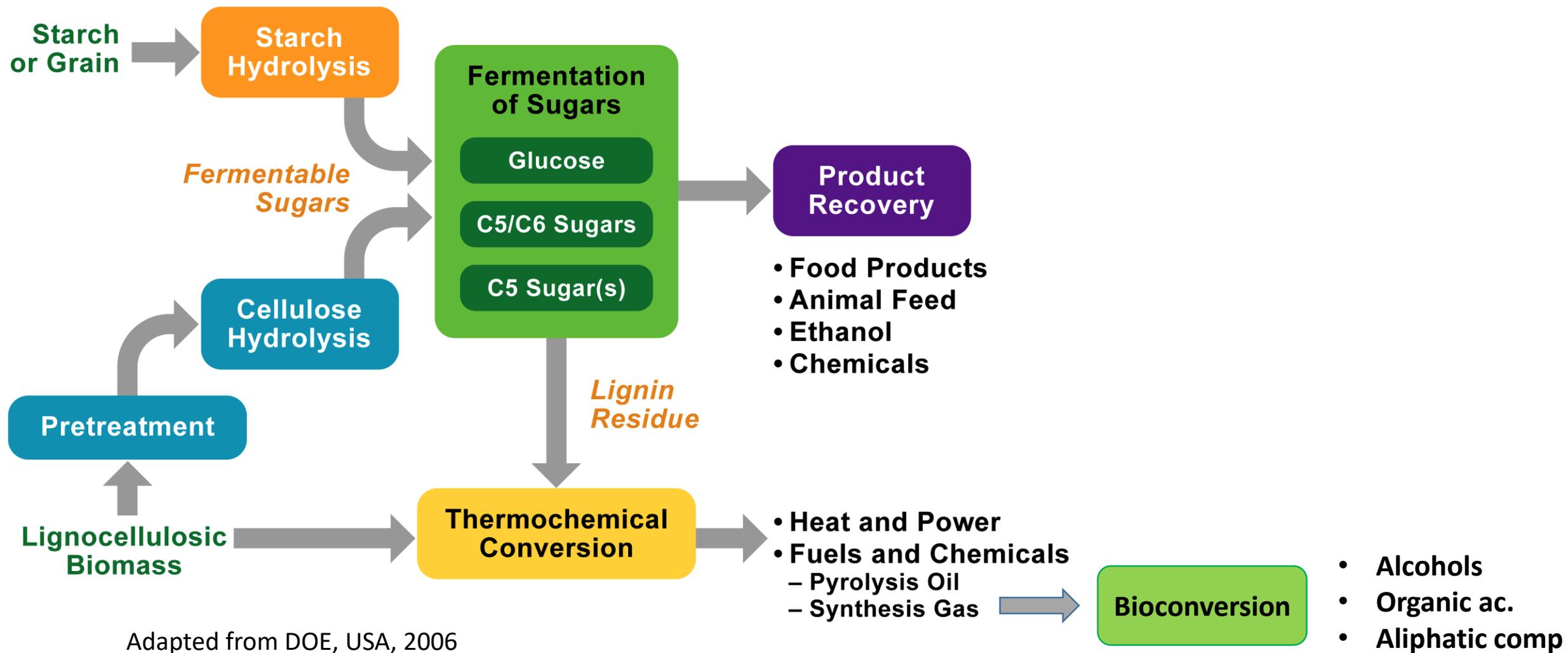


# Emisiones de CO<sub>2</sub> y Calentamiento Global

- Emisión global anual de carbono a la atmósfera es de 6,6 GTon,
- Prefijo Giga :  $10^9$  : 1.000.000.000.-
- 1 GTon C  $\rightarrow$  24,2 GTon CO<sub>2</sub>
- Reservorios de Carbono
  - Atmósfera : 750 GigaToneladas (C)
  - Biomasa : 650 GigaToneladas (C)
  - Suelo : 1.500 GigaToneladas (C)
- Aumento de Carbono en la atmósfera desde antes del periodo pre-industrial es de 200 Gigatoneladas

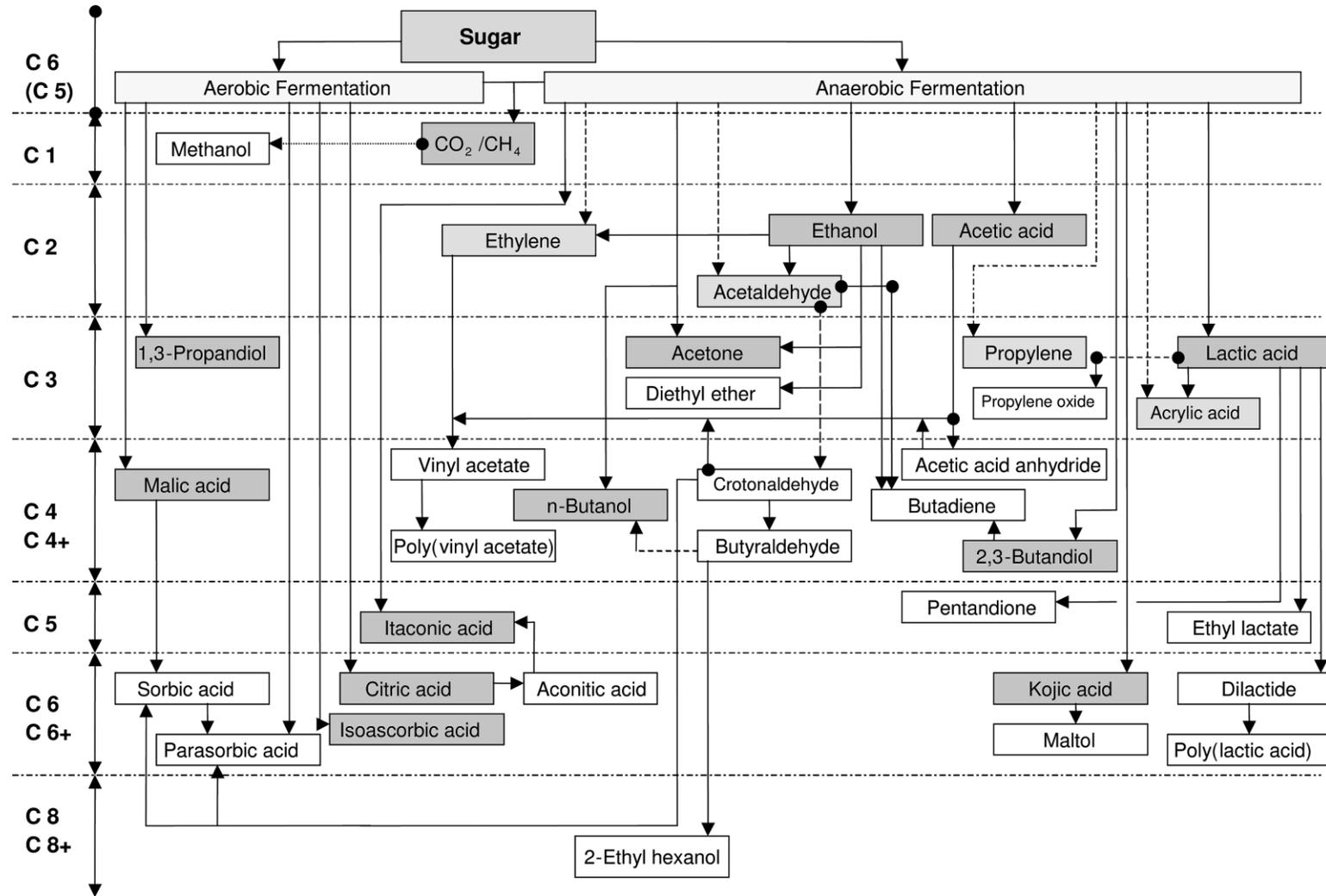


# Integrated Biorefinery

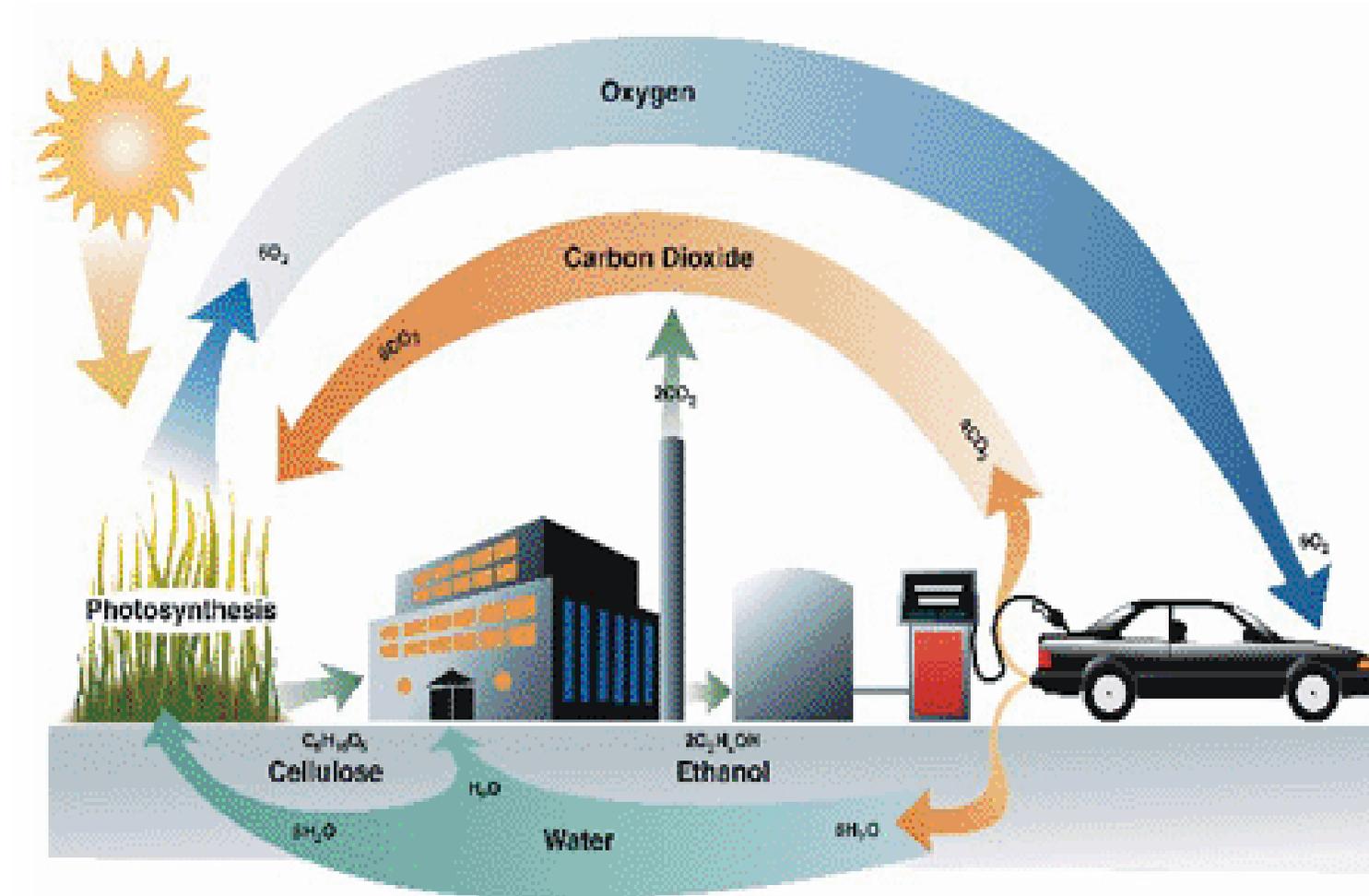


Adapted from DOE, USA, 2006

# Biotechnological sugar-based product family tree.



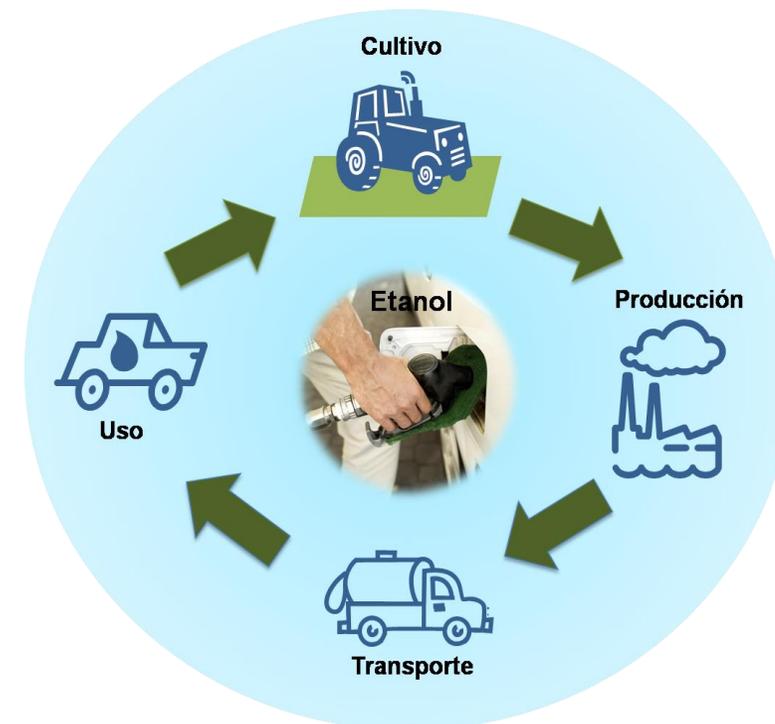
Biocombustibles → Fuentes renovables → Sustentable?



# Análisis de Ciclo de Vida

# Ciclo de Vida

- Conjunto de las etapas de producción, uso y disposición final de un determinado producto o servicio.
- Considera todo lo que ocurre desde la extracción de las materias primas hasta el tratamiento o depuración del último de los residuos que a partir de él se generen (SAIC 2006).



# Ciclo de Vida incluye

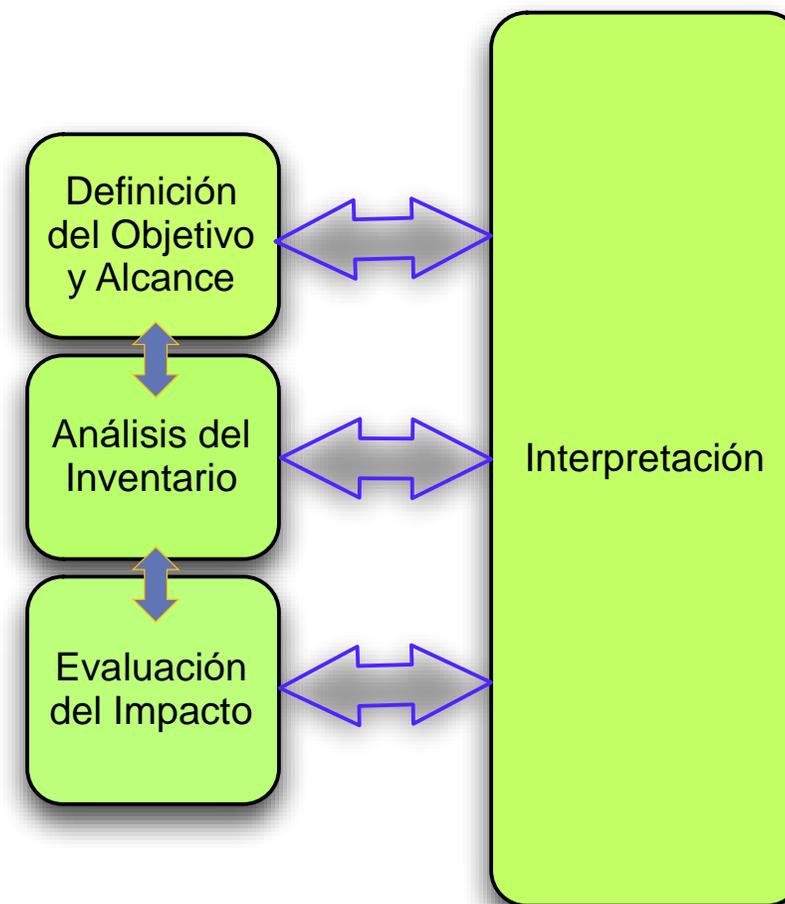
- Obtención de materias primas:
  - Obtención de los recursos naturales requeridos.
- Procesamiento:
  - La manufactura, el envasado y distribución del producto.
- Uso, reutilización y mantención:
  - todo el tiempo de vida útil del producto.
- Reciclaje, tratamiento de residuos:
  - Requerimientos energéticos de los procesos de reciclaje y/o tratamiento
  - Los residuos que van al medio ambiente

# Análisis de Ciclo de Vida

Norma ISO 14040.

**Metodología que evalúa los impactos ambientales** de un determinado producto o servicio.

Considera todo lo que ocurre, **desde la extracción** de las materias primas, **elaboración y uso** del producto **y tratamiento** de los residuos.



# Etapas del ACV

## Definición de Unidad Funcional (UF)

- Cantidad de producto o unidad de servicio que se estudia.

### **Ejemplos:**

#### **Para el caso de un producto, ej.: biocombustible:**

km recorrido, MJ, kg Etanol, L Etanol, etc.

#### **Para el caso de un servicio, ej.: servicio de transporte):**

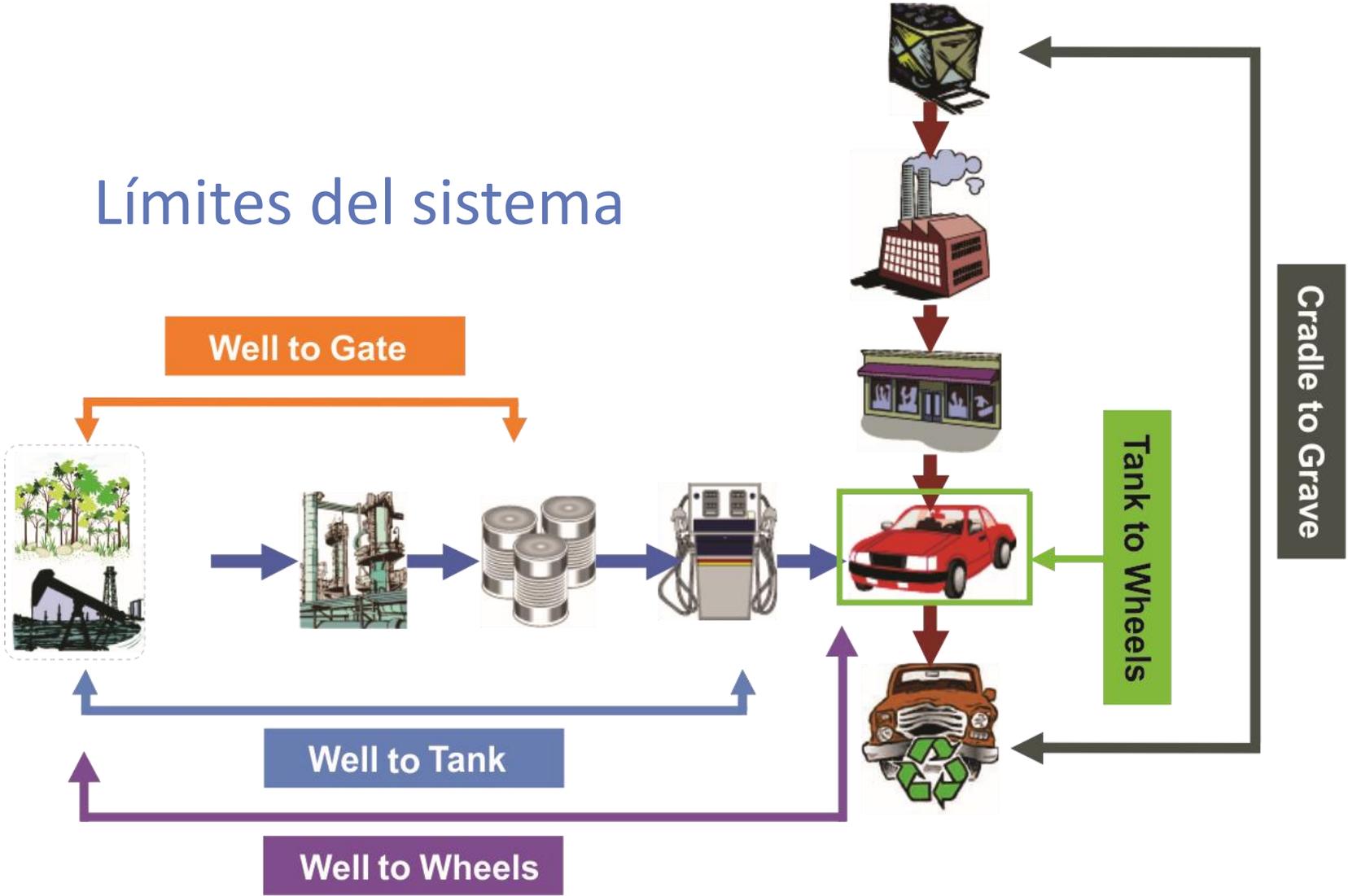
Ton de material transportado, pasajero transportado en una ruta definida.

# Tipos de ACV

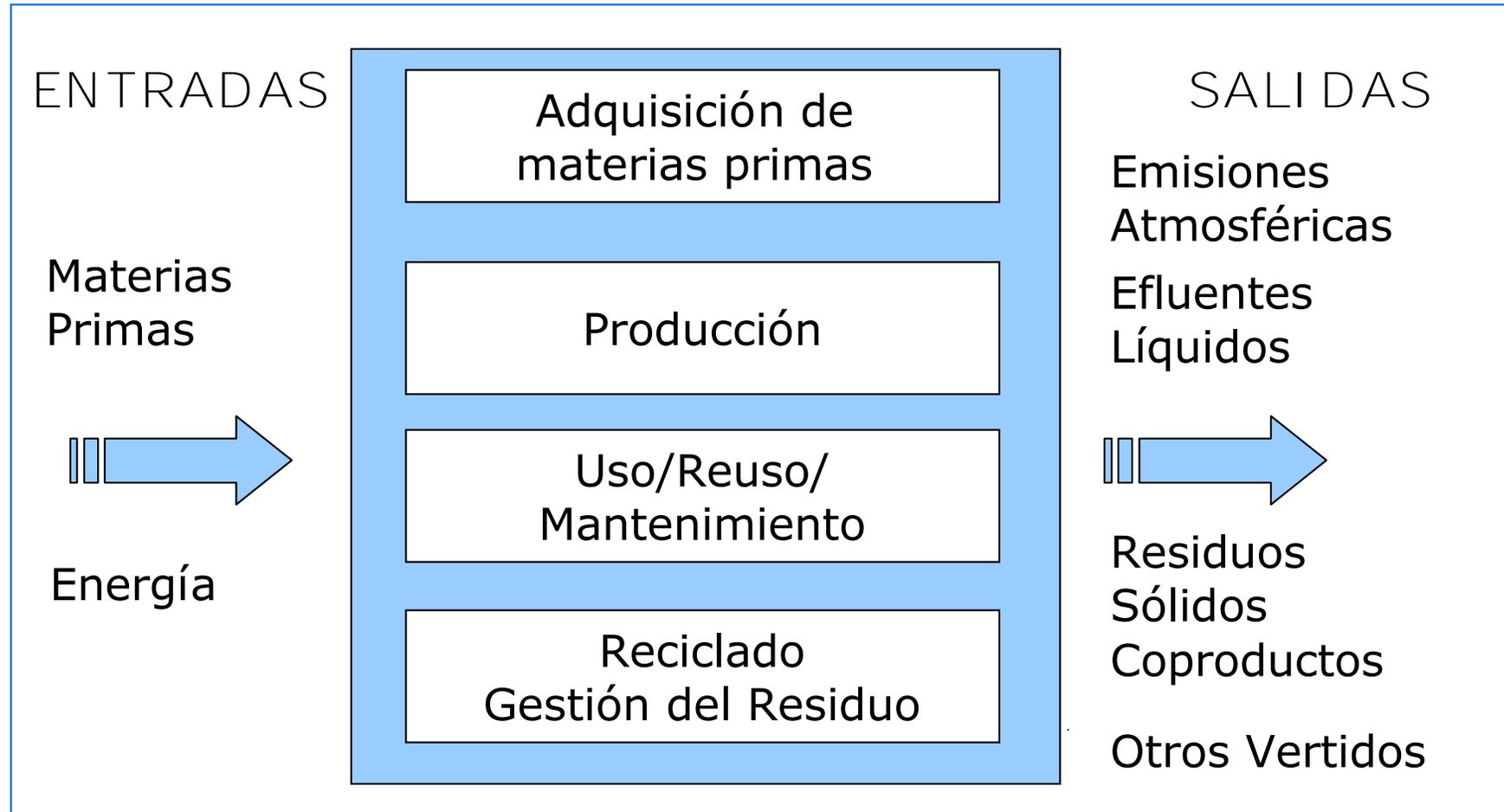
## Límites del Sistema

- De la cuna a la tumba (**cradle to grave**): es el ACV más completo e incluye todas las etapas del ciclo de vida del producto, desde la producción de los insumos y materias primas, hasta el tratamiento de los residuos después de la fase de uso.
- De la cuna a la puerta (**cradle to gate**): menos completo, incluye las fases de producción de los insumos hasta la obtención del producto de interés. No considera la fase de usos ni posteriores.
- De la cuna a la cuna (**cradle to cradle**): específico para productos que pueden ser reciclados, como el vidrio. Incluye todas las fases del ciclo de vida del producto, hasta que retorna a su estado original.

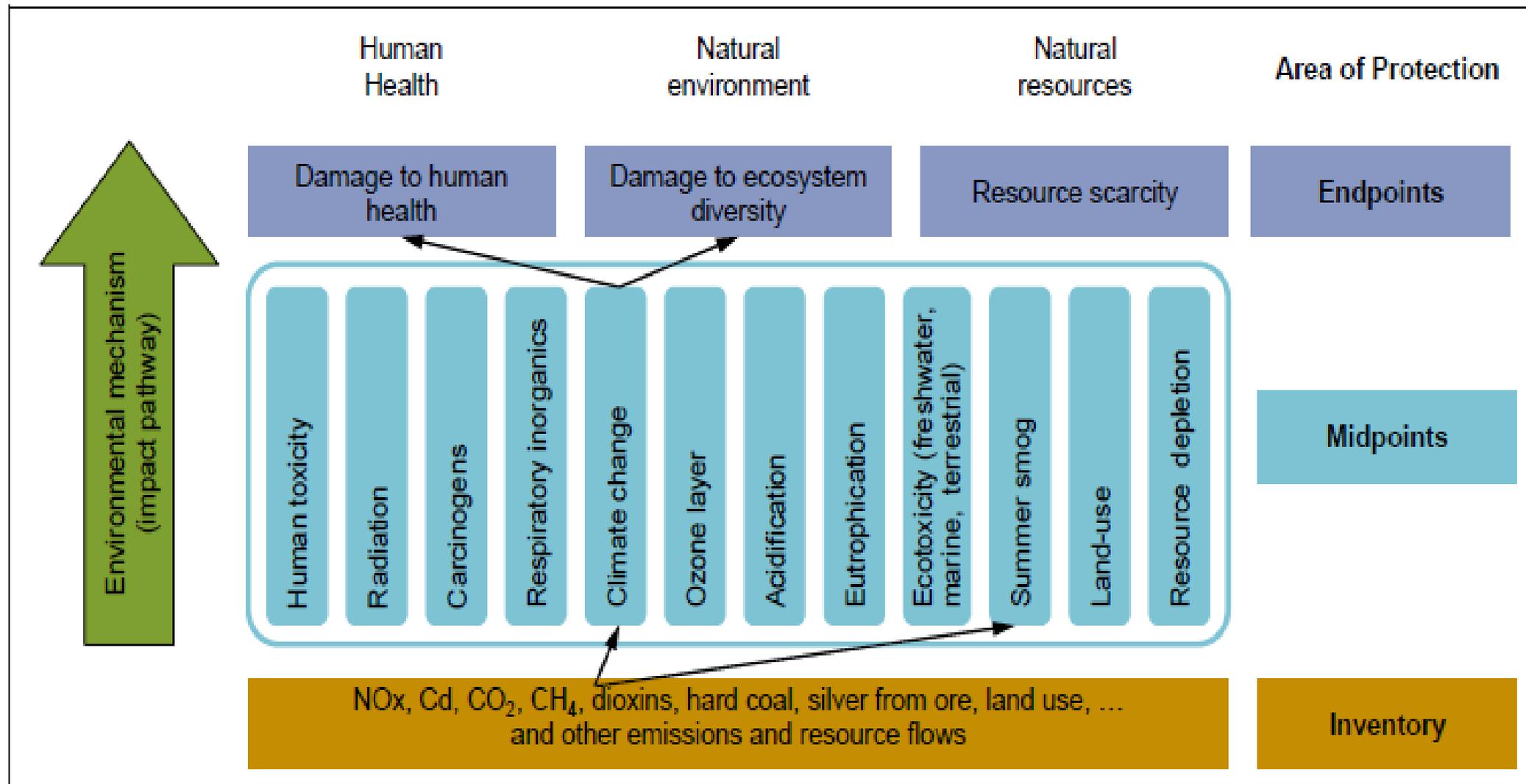
# Límites del sistema



# Inventario del Ciclo de Vida



# Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental



## Software para Análisis de Ciclo de Vida

Programa	Empresa/Institución	País	Fuente
SimaPro	Pré-consultants	Holanda	<a href="http://www.pre.nl">www.pre.nl</a>
GaBi	PE Europe GmbH	Alemania	<a href="http://www.gabi-software.com">www.gabi-software.com</a>
Bousted	Bousted Consulting	Inglaterra	<a href="http://www.boustead-consulting.co.uk">www.boustead-consulting.co.uk</a>
LCAManager	SIMPPLÉ	España	<a href="http://www.simpple.com">www.simpple.com</a>
OpenLCA	GreenDeltaTC	Alemania	<a href="http://www.greendeltatc.com">www.greendeltatc.com</a>
WRATE	UK Enviromental Agency	Inglaterra	<a href="http://www.enviroment-agency.gov.uk/wrate">www.enviroment-agency.gov.uk/wrate</a>
REGIS	Sinum AG	Suiza	<a href="http://www.sinum.com">www.sinum.com</a>
Euklid	Frauenhofer Institut	Alemania	<a href="http://www.ivv.fhg.de">www.ivv.fhg.de</a>
WISARD	Pricewaterhouse Coopers	Francia	<a href="http://www.ecobilan.eu">www.ecobilan.eu</a>
TEAM	Ecobilan-Pricewaterhouse Coopers	Francia	<a href="http://www.pwcglobal.com">www.pwcglobal.com</a>
Umberto	Ifeu-Institut	Alemanai	<a href="http://www.ifeu.de/umberto">www.ifeu.de/umberto</a>

# Bases de datos

Nombre	País de origen	Alcance
ECOINVENT v1	Suiza	Más de 2500 procesos: energía, transporte, materiales de construcción, compuestos químicos, papel y cartón, gestión de residuos
ETH-ESU 96	Suiza	Más de 1200 procesos: generación de electricidad y procesos relacionados, como transporte, procesado y gestión de residuos
BUWAL 250	Suiza	Procesos relacionados con materiales de envase (plástico, cartón, papel, vidrio, metales), energía, transporte y gestión de residuos
IDEMAT 2001	Holanda	Procesos relacionados con materiales ingenieriles (metales, aleaciones, plásticos, madera), energía y transporte
IVAM	Holanda	Procesos relacionados con materiales, transporte, energía y tratamiento de residuos
FEFCO	Bélgica	Datos europeos relativos a la fabricación de cartón corrugado
Franklin US LCI	EEUU	Datos de inventario procedentes de Norte América, relativos a energía, transporte, acero, plásticos y procesado

# Categorías de impacto de SimaPro

- **ADP:** Abiotic depletion : Disminución de recursos abióticos → kg Sb eq
  - **AP:** Acidification: Acidificación → kg SO<sub>2</sub> eq
  - **EP:** Eutrophication: Eutrofización → kg PO<sub>4</sub> eq
  - **GWP: Global warming: Calentamiento global** → kg CO<sub>2</sub> eq
  - **ODP:** Ozone layer depletion: Destrucción capa ozono → kg CFC11 eq
  - **POP:** Photochemical oxidation: Oxidación fotoquímica → kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq
  - **HTP:** Human toxicity: Toxicidad humana
  - **FWAETP:** Fresh water aquatic ecotox: Toxicidad agua fresca
  - **MAETP:** Marine aquatic ecotox: Toxicidad marina
  - **TETP:** Terrestrial ecotox: Toxicidad terrestre
- } kg 1,4 DB eq

# Evaluación Ambiental (ACV) de las alternativas de proceso de la producción de bioetanol 2G en Chile

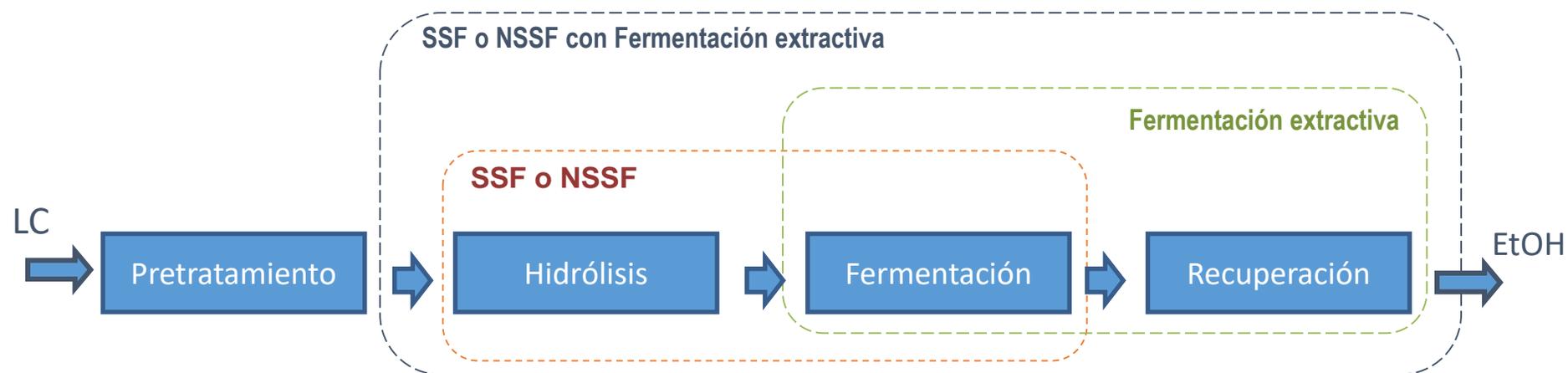
# Disponibilidad de biomasa en Chile



# Mercado del Bioetanol en Chile

- Mercado actual de etanol : 30.000.000 (L/año)
- No hay mandato para el uso de bioetanol en combustibles
  - No hay mercado para el bioetanol combustible
- Chile importa Metilterbutileter (MTBE) como aditivo oxigenante para gasolinas premium.
- El MTBE ha sido prohibido en 25 estados de USA: potencialmente cancerígeno y contaminante de acuíferos
- Etilterbutileter (ETBE) puede reemplazar el MTBE.
- ETBE puede ser producido desde bioetanol e isobutileno.
- Aproximadamente el 50% del etanol consumido en Europa es usado para producir bio-ETBE.

# Etapas del proceso de producción de bioetanol 2G



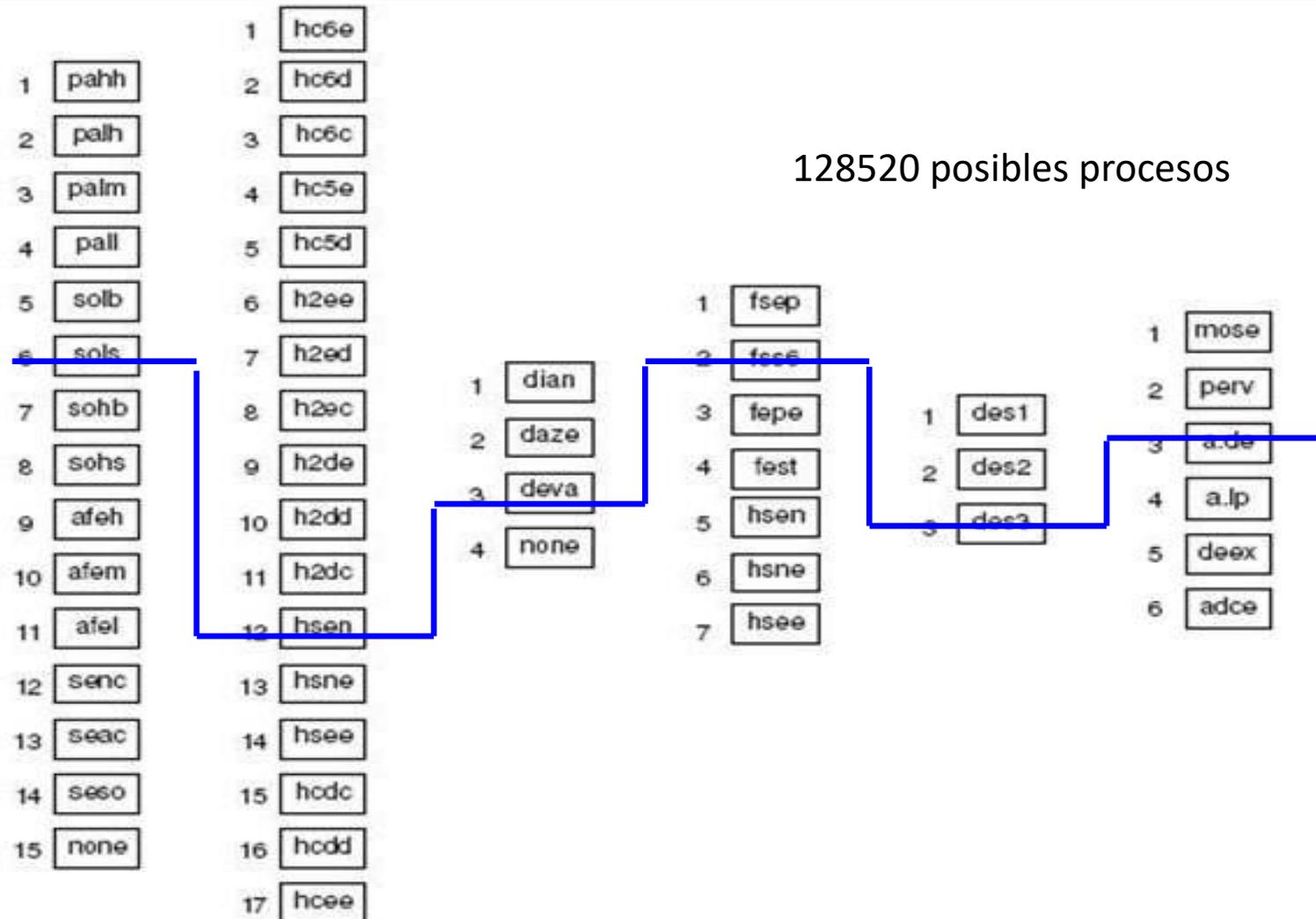
- Explosión por vapor
- Organosolv
- Hidrólisis ácida
- AFEX
- Ozonólisis
- Oxidación Húmeda
- Biológico
- ...

- Hidrólisis química
- Hidrólisis enzimática

- Cultivo por lote
- Lote alimentado
- Cultivo continuo

- Destilación
- + Pervaporación
- + Malla molecular
- + Extracción reactiva

# Cual es la ruta "OPTIMA"?



# Desafíos Tecnológicos / Económicos

- Integración del proceso para minimizar demanda de energía y tratamiento de agua
- Valorización de los residuos de lignina y otros
- Asegurar la sustentabilidad del proceso
  - Balance energía
  - Emisiones de gases de efecto invernadero (ACV)

# Análisis de alternativas de proceso



## Bases de Evaluación técnico-económica

Capacidad  
de planta

**1100**

ODMT/d

**700000-790000**

m<sup>3</sup> secos por año  
madera Eucaliptus

Cosecha aprox. de 9000 Ha

**9 %** de la disponibilidad de  
eucalyptus periodo 2017-2040  
(Anuario 2014, Infor )

**1100**

ODMT/d

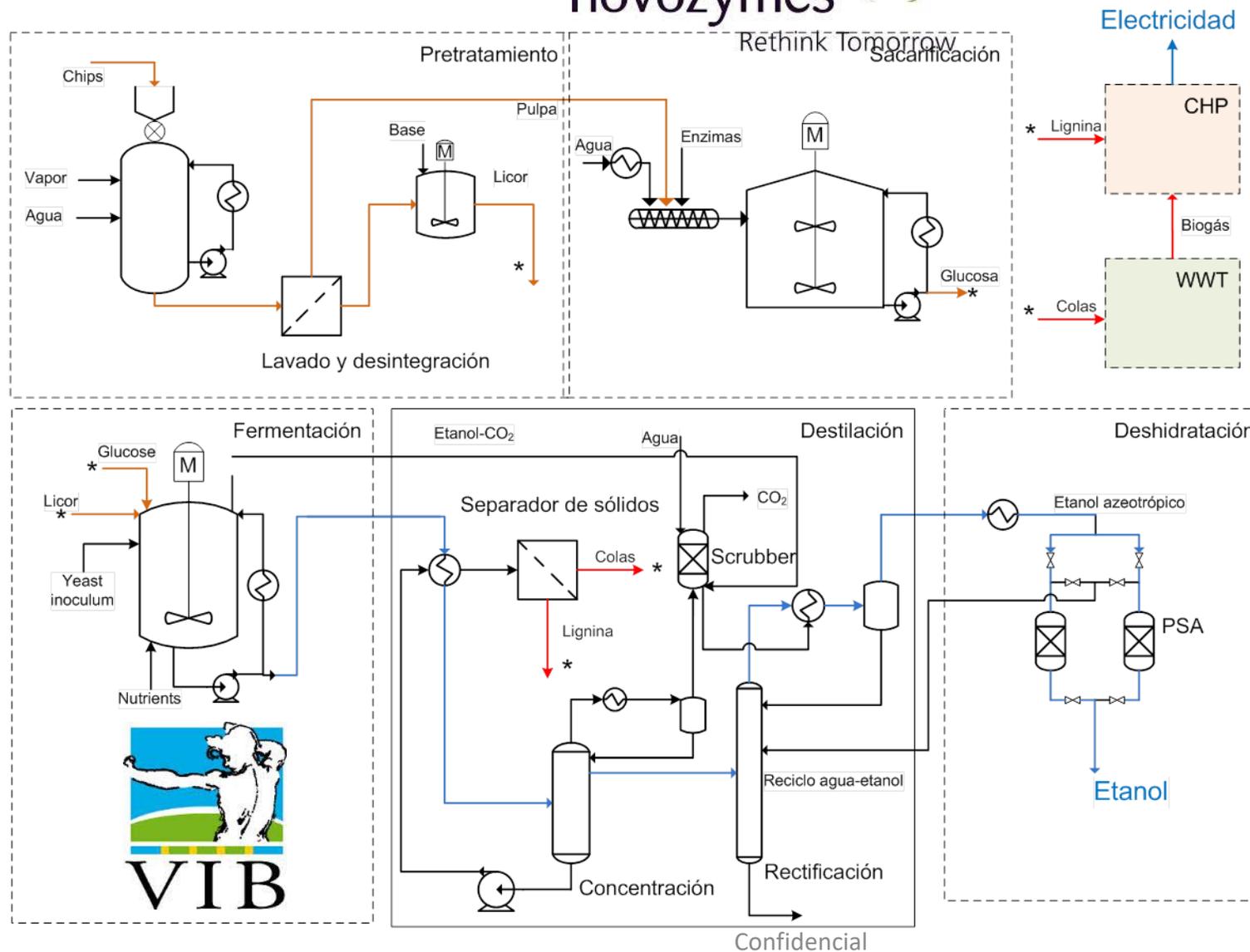
madera Eucaliptus



118-160 MML etanol por año



13-26 MW de energía eléctrica



Rendimiento:

- 230-280 L/t

Costo Prod etanol:

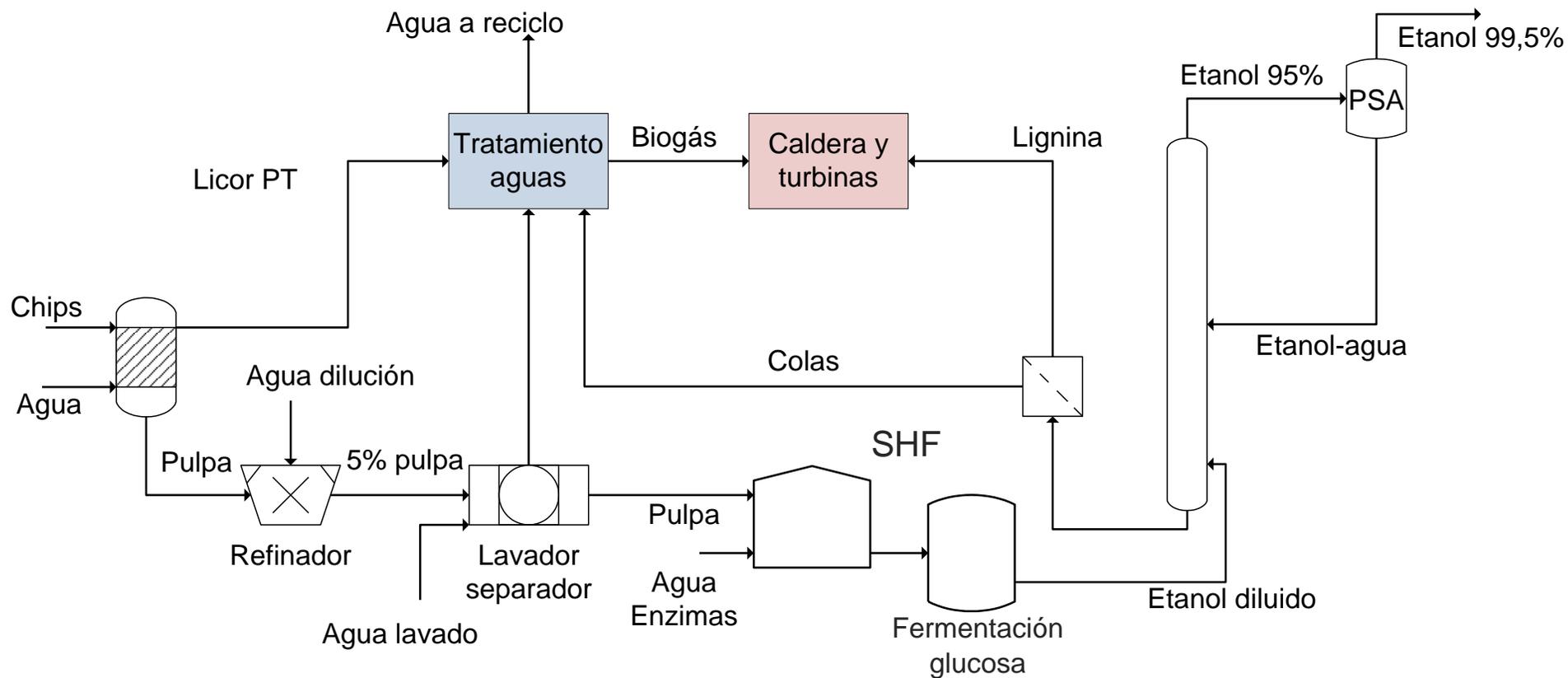
- 0,5-0,7 USD/L
- 10 % TIR

Madera

- 65-85 USD/t

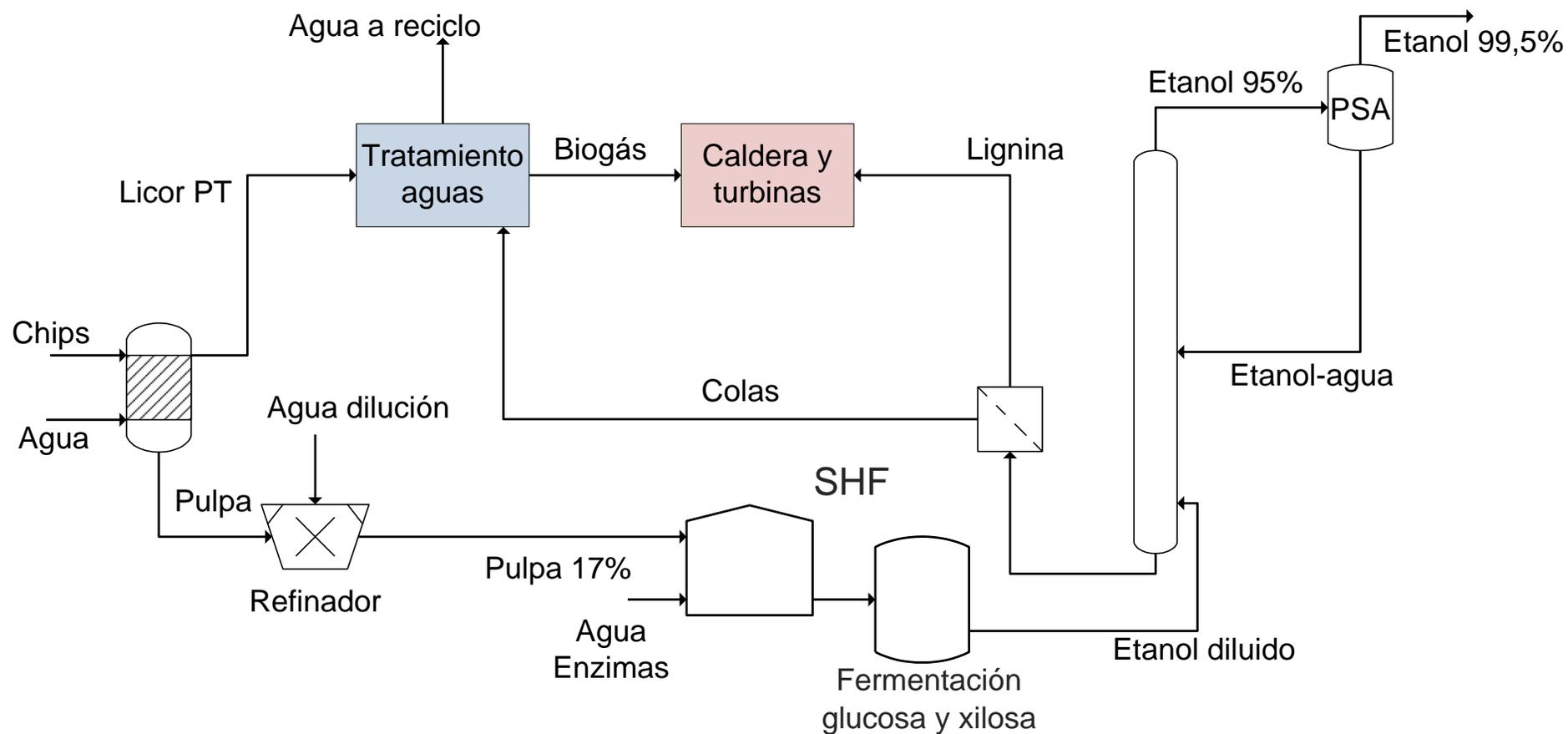
## Caso Base (CB)

- Refinación a baja consistencia y lavado pulpa
- Fermentación de glucosa solamente
- La xilosa en licor PT y pulpa genera biogás



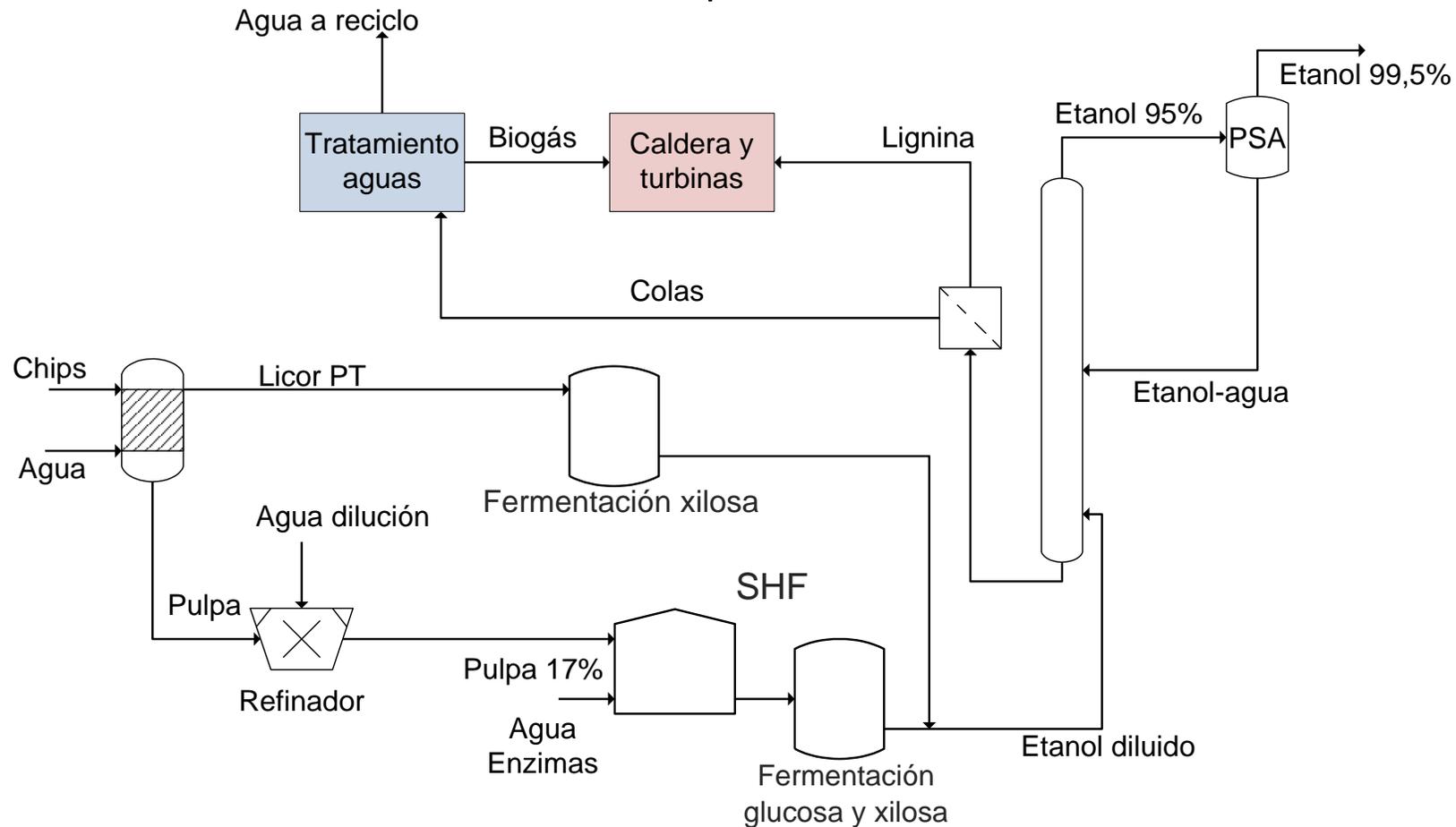
## Caso Refinación a alta consistencia (HiCo-cSSF)

- Refinación a alta consistencia sin lavado de pulpa
- Fermentación de glucosa xilosa liberadas desde la pulpa
- La xilosa en licor PT genera biogás



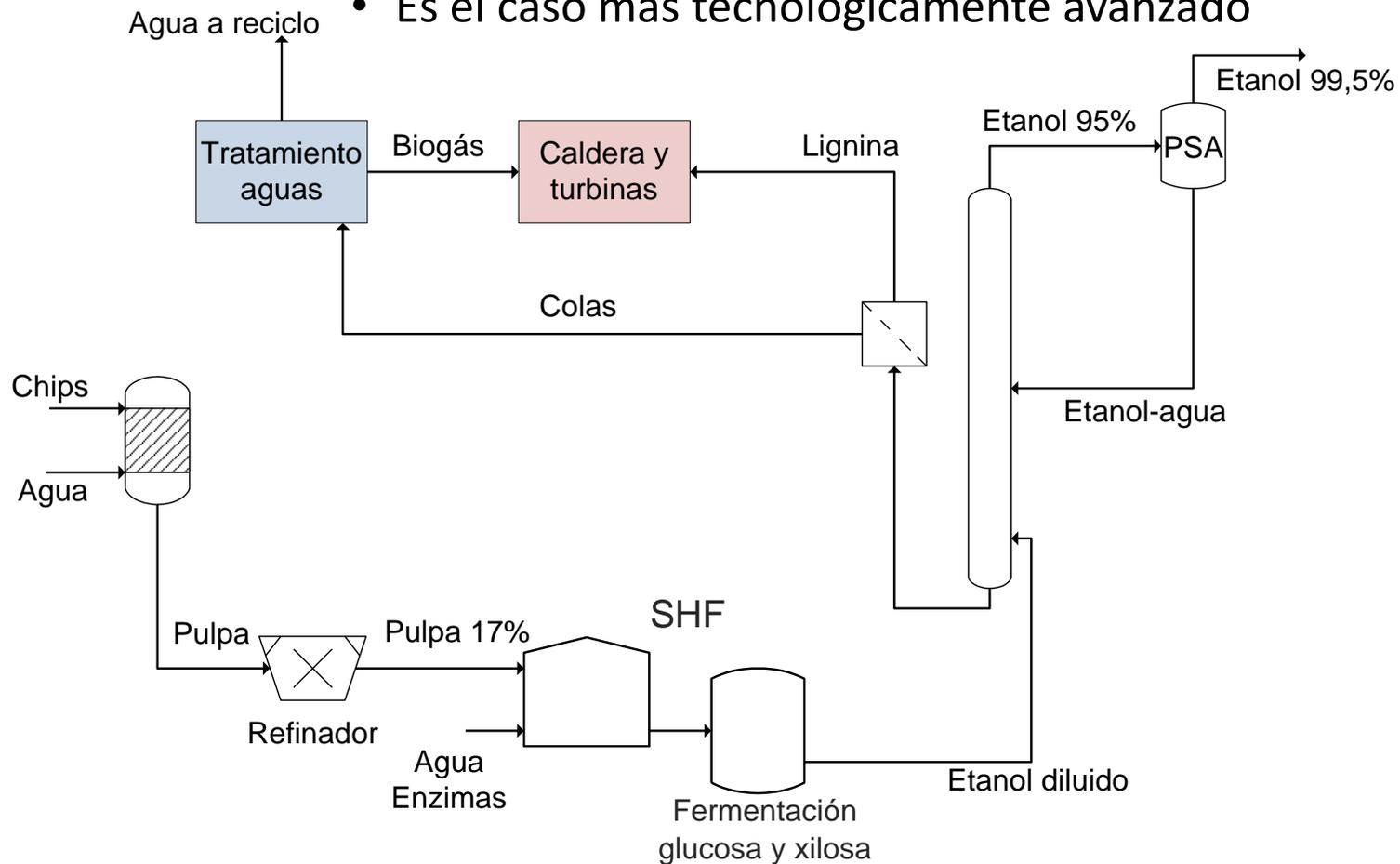
## Caso Refinación a alta consistencia y fermentación separada xilosa (HiCo-cSSF+C5F)

- Refinación a alta consistencia sin lavado de pulpa
- Fermentación de glucosa xilosa liberadas desde la pulpa
- La xilosa en licor PT es fermentada separadamente



## Sin separación pulpa y licor (NoDISP-HiCo)

- El contenido del reactor de PT va directo a refinador de alta consistencia
- Fermentación de glucosa xilosa liberadas desde la pulpa
- Es el caso más tecnológicamente avanzado

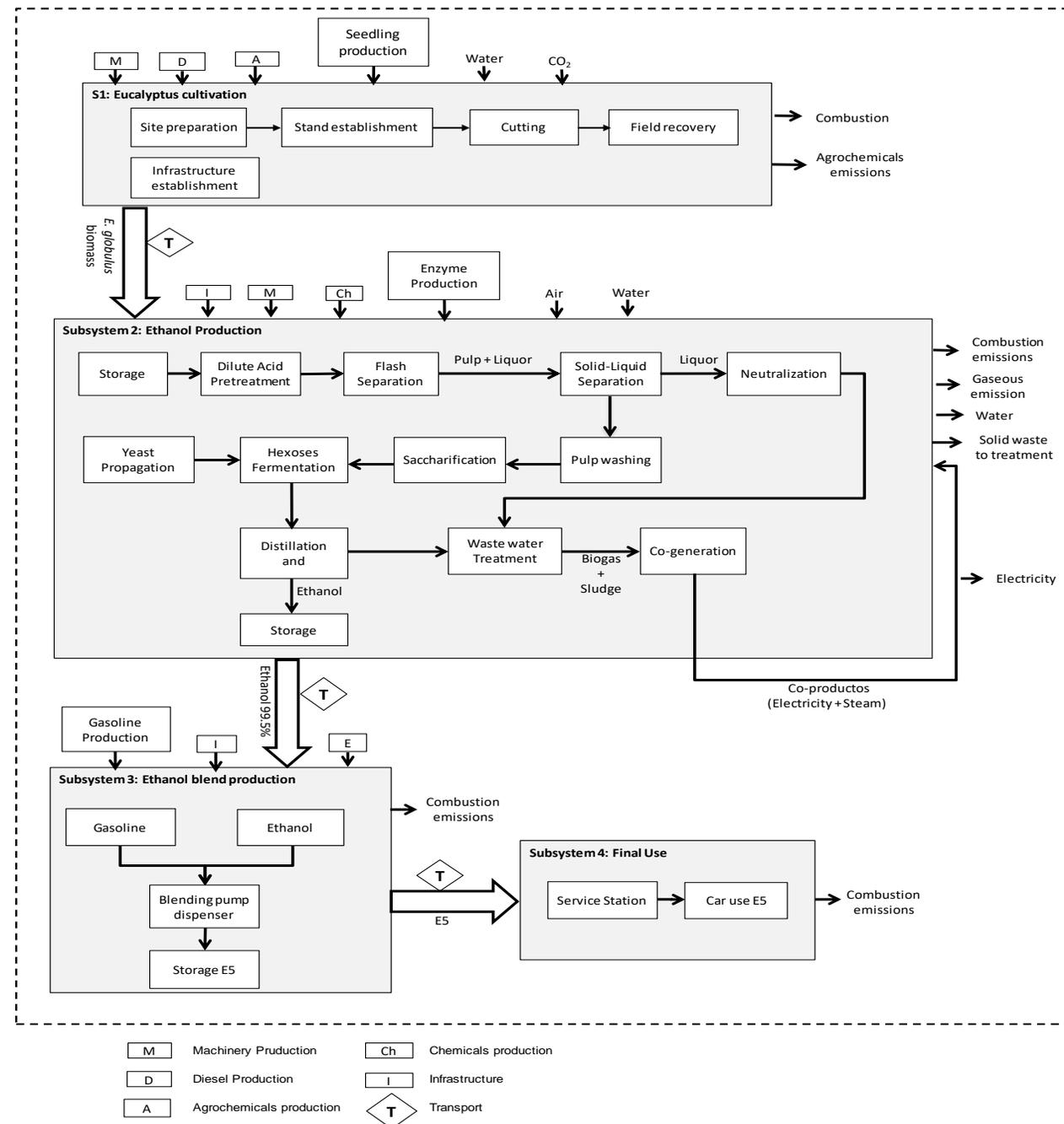


# Análisis de Ciclo de Vida

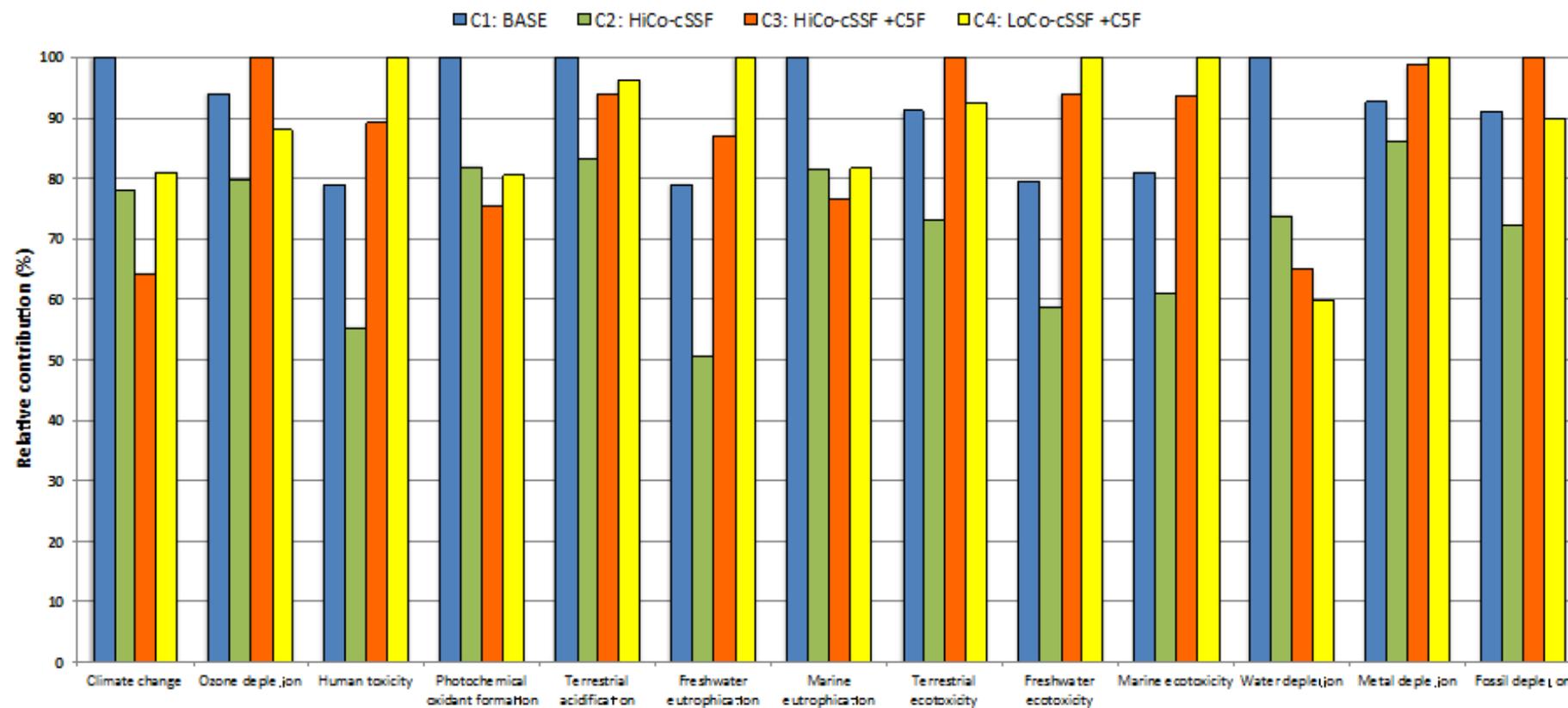
- Límites del sistema
  - Considera un escenario de manejo intensivo de bosque para la producción de chips de eucalipto en la región de Bio-Bio (Chile).
  - Las emisiones derivadas de la combustión del biocombustible se calcularon de acuerdo con rendimiento del motor y la unidad funcional
  - ***Unidad funcional: 1 km recorrido por un coche de pasajeros de tamaño medio.***

# Límites del sistema

Caso base (CB)



## Comparación de resultados en las categorías de impacto de casos evaluados.



# Conclusiones

- El caso base y C4 (Caso Refinación a baja consistencia y fermentación separada xilosa) son los que presentan la mayor contribución en diferentes categorías de impacto. La alternativa base tiene altas contribuciones en las categorías: CC, POF, TA, ME y WD. Mientras que la alternativa C4 tiene los más altos impactos en las categorías: HT, FE, FET, MET, FD.
- Los altos impactos de ambas alternativas de proceso es que incluyen la fase de lavado de pulpa y neutralización con uso tanto de agua como de hidróxido de sodio, lo que afecta la sustentabilidad del proceso.
- El diseño de proceso puede tener un efecto significativo sobre su impacto ambiental del proceso

# Publicaciones

- Morales, M.; J. Quinteros, G Aroca. 2016. Environmental assessment of the production and addition of bioethanol produced from *Eucalyptus globulus* to gasoline in Chile. The International Journal of Life Cycle Assessment, Accepted.
- Morales M, Aroca G, Rubilar R, Acuña E, Mola-Yudego B, González-García S. 2015. Cradle-to-gate life cycle assessment of Eucalyptus globulus short rotation plantations in Chile, Journal of Cleaner Production 99:239-249, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.02.085.
- Morales, M.; J. Quinteros, R. Conejeros, G. Aroca. 2015. Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Bioethanol: Environmental Impacts and Energy Balance. Renewable and Sustainable Energy Reviews 42:1349-1361.
- Morales, M.; S. Gonzalez-García, G. Aroca, M.T. Moreira. 2015. Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile. Science of the Total Environment 505: 833–843.
- Scott, F.; F. Venturinni, G. Aroca, R. Conejeros. 2013. Selection of process alternatives for lignocellulosic bioethanol production using a MILP approach. Bioresource Technology 148:525-534.
- Scott, F.; Quintero, J.; Morales, M.; Conejeros, R.; Cardona, C. and Aroca, G. 2013. Process design and sustainability in the production of bioethanol from lignocellulosic materials. *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 16, no. 3.

# Agradecimientos

Escuela de Ingeniería Bioquímica  
P. Universidad Católica de Valparaíso

- Prof. Fernando Acevedo B.
- Prof. Juan Carlos Gentina M
- Prof. Andrés Illanes F.
- Prof. Raúl Conejeros R.
- Dr. Felipe Scott C.,
- Dr. Julián Quintero,
- Dra. Lorena Alvarez
- Lorena Soler
- Roberto Landaeta
- Marjorie Morales A.
- Paulina Morales A.
- Ricardo San Martin
- Mariela Muñoz.....

Lab de Recursos Renovables  
Centro de Biotecnología  
U. de Concepción

- Prof. Jaime Baeza<sup>+</sup>
- Prof. Jaime Rodríguez
- Prof. Juanita Freer
- Prof. Eduardo Acuña
- Prof. Rafael Rubilar
- Dra. Carolina Parra
- Dr. Regis Teixeira Mendoca
- Dr. Alfred Rosner ....





PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO

IV Reunión Nacional de la Red Temática en Bioenergía  
XIII Reunión de la Red Mexicana de Bioenergía  
3er Taller Internacional Biorrefinerías de Pequeña Escala para  
el Desarrollo Rural de America Latina y Europa  
Cuernavaca, 14 de Noviembre del 2017



**Gracias por su atención !**



**German.aroca@pucv.cl**