



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE  
VALPARAÍSO



Taller Internacional Biorrefinerías de Pequeña Escala  
Manizales, 30 de Mayo del 2017

# Diseño de procesos e impactos ambientales de las biorefinerías



**Germán Aroca**

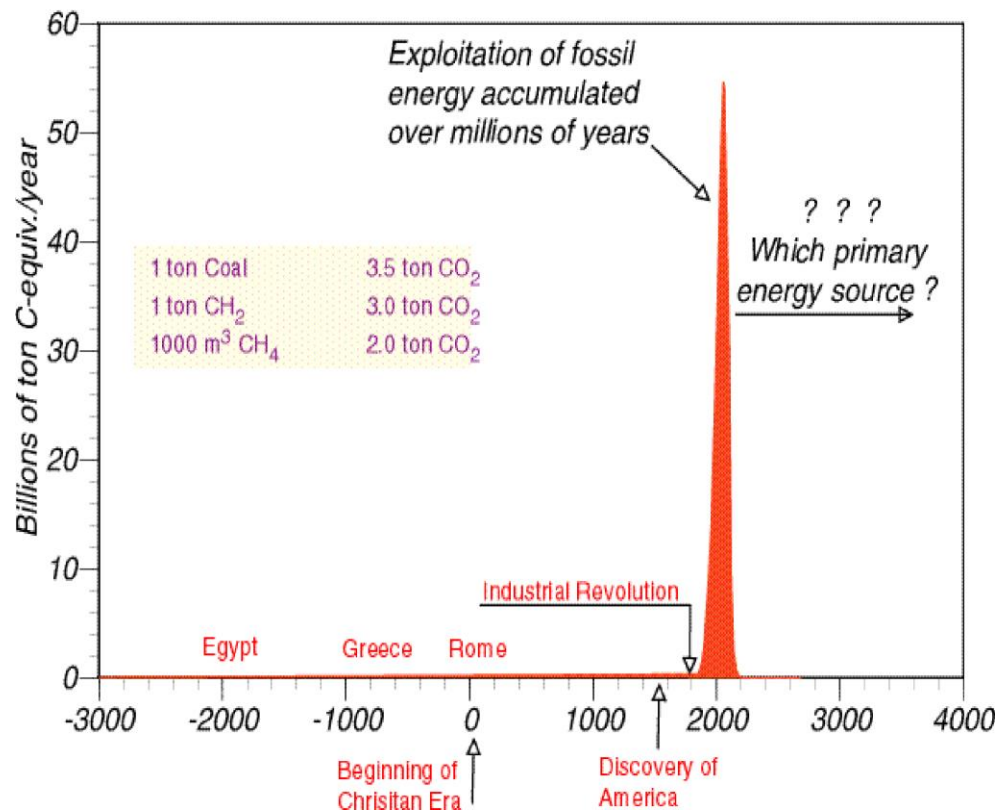
Escuela de Ingeniería Bioquímica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,  
Chile

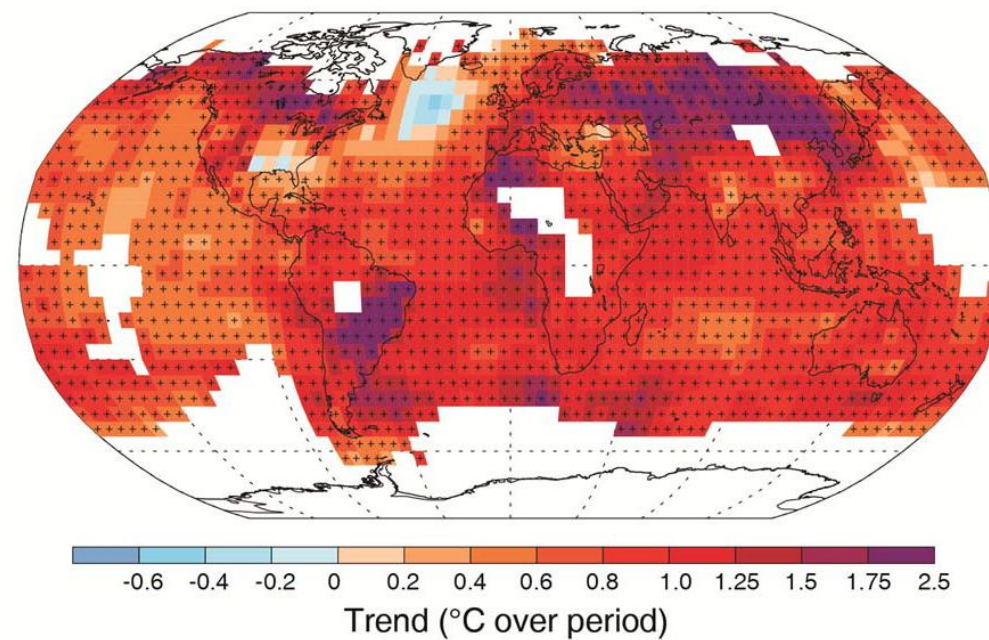
# Contenido

- 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



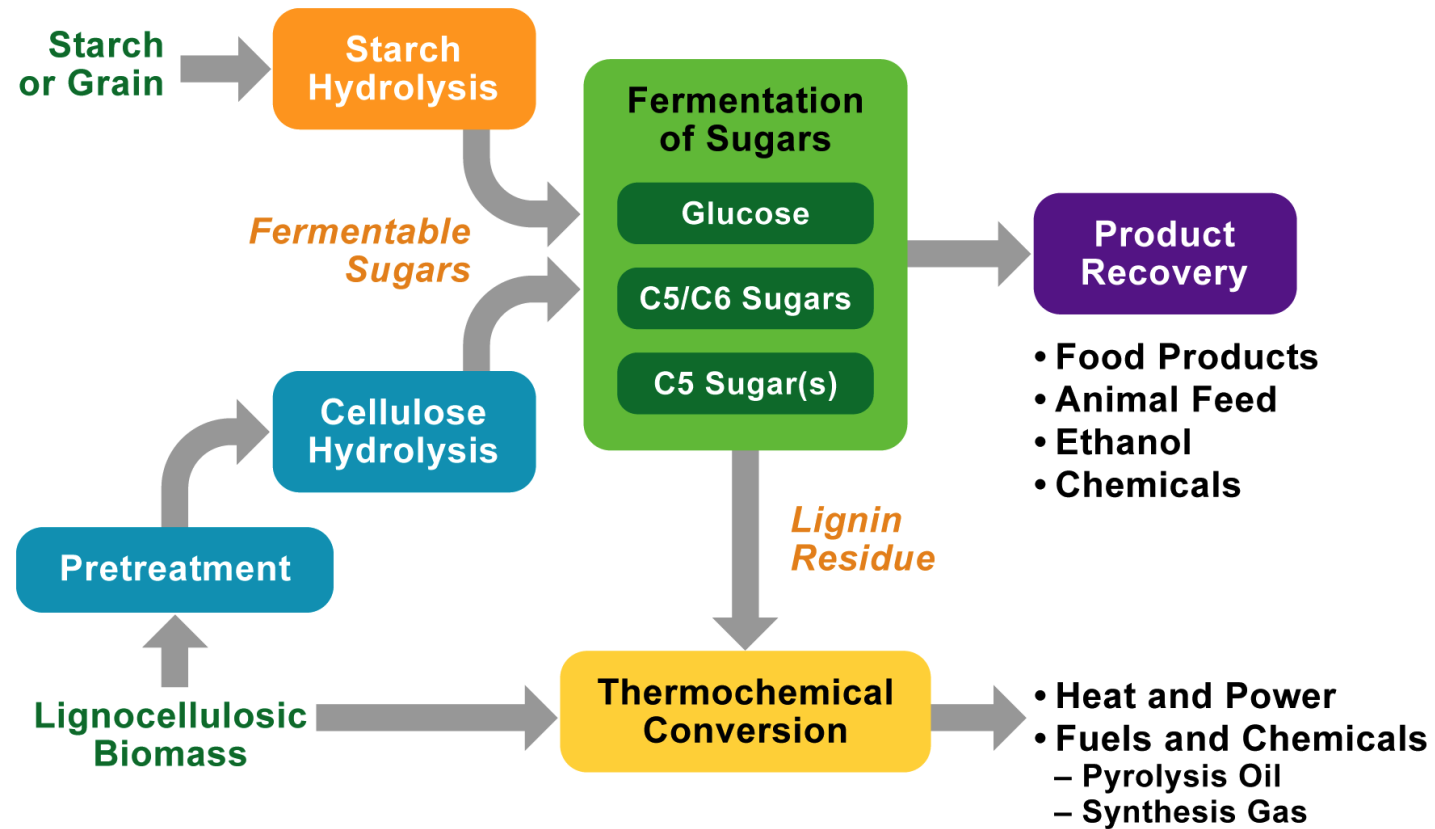
(Olander, 2004)

# Calentamiento Global

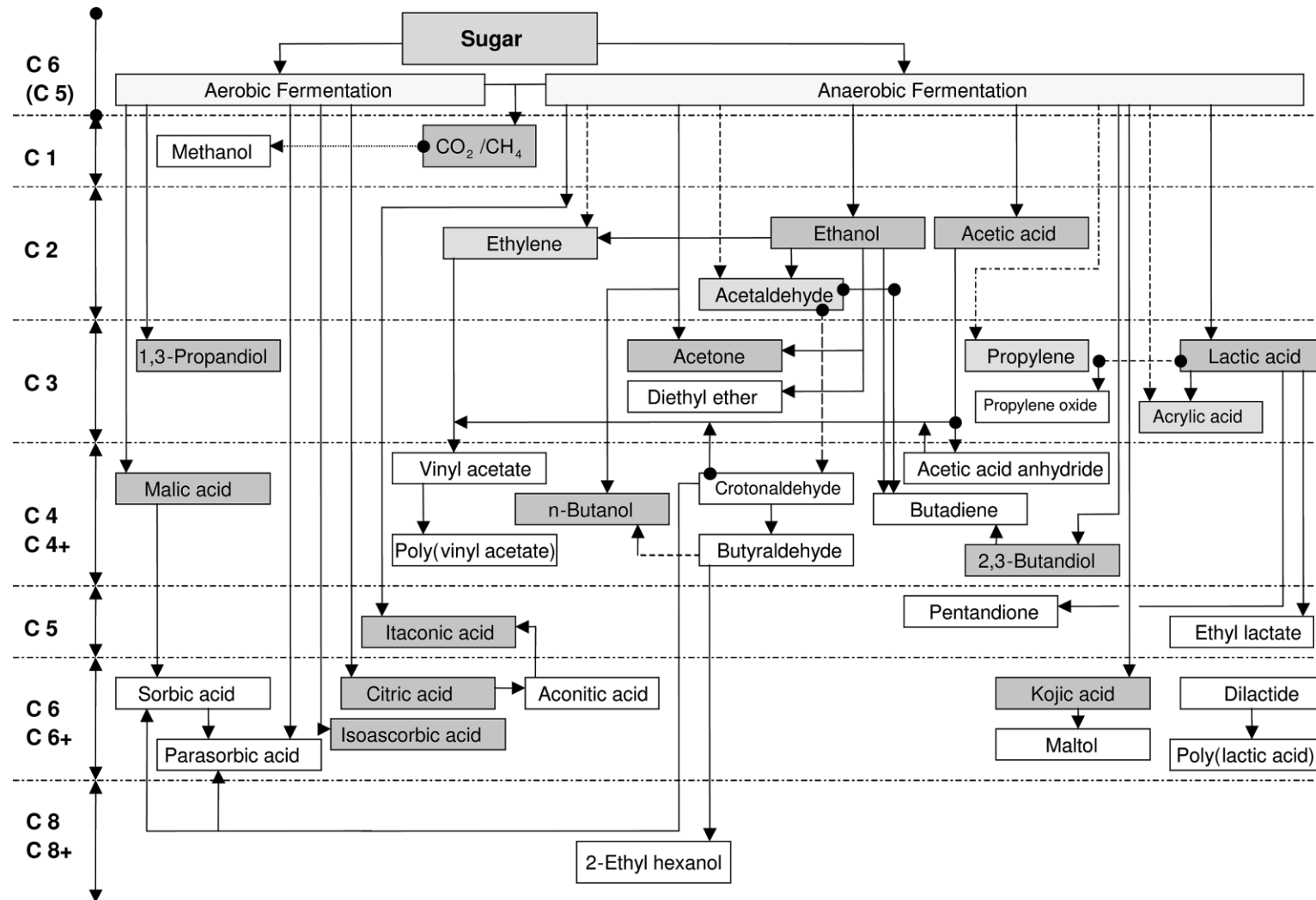
- Emisión global anual de carbono a la atmósfera es de 6,6 GigaToneladas → 24,2 GTon CO<sub>2</sub>
  - Prefijo Giga : 10<sup>9</sup> : 1.000.000.000.-
- Reservorios de Carbono
  - Atmósfera : 750 GigaToneladas (C)
  - Biomasa : 650 GigaToneladas (C)
  - Suelo : 1.500 GigaToneladas (C)
- Aumento de Carbono en la atmósfera desde antes del periodo pre-industrial es de 250 Gigatoneladas



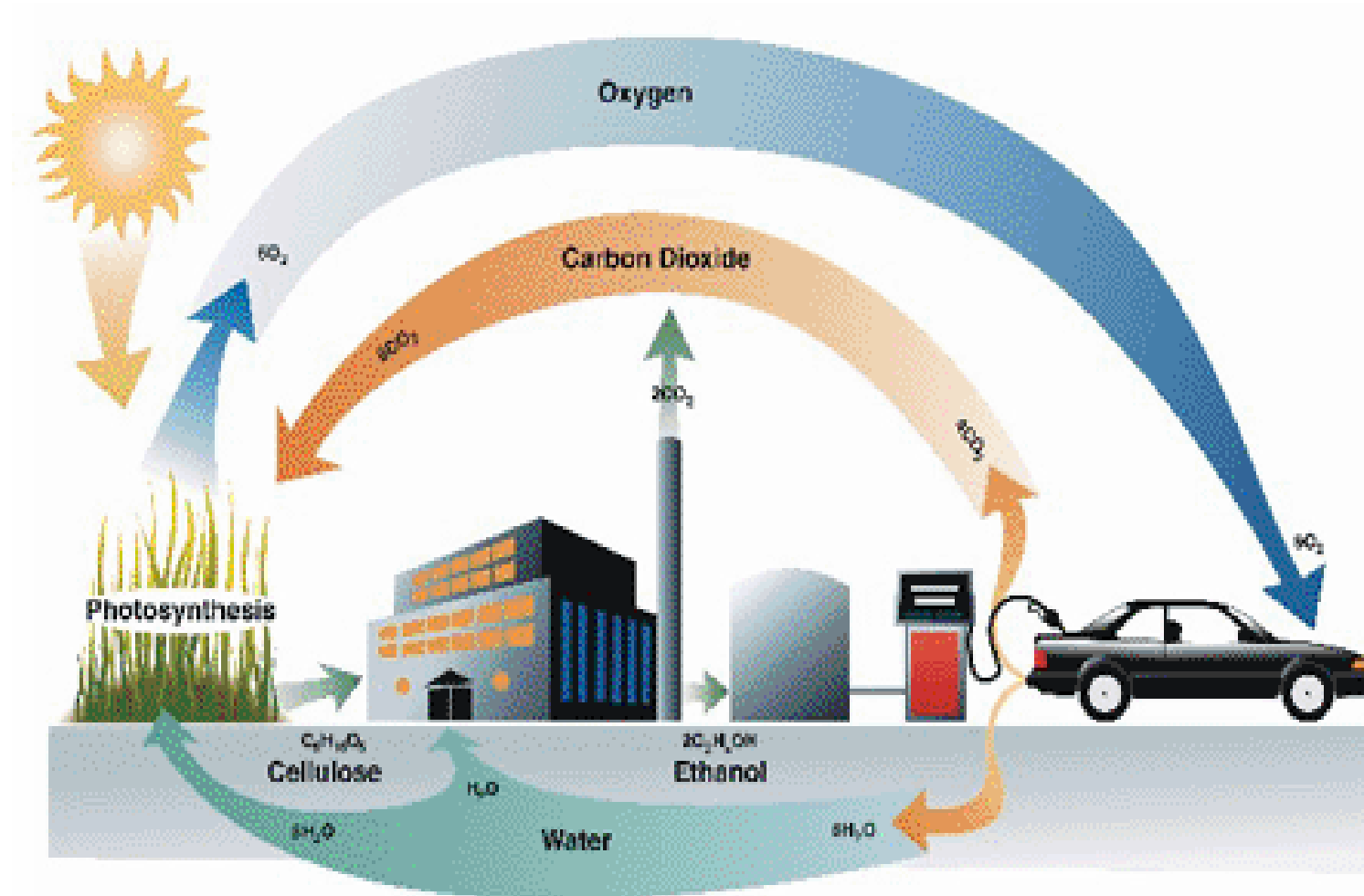
# Biorefinerías



# Biotechnological sugar-based product family tree.



Biocombustibles → Fuentes renovables → Sustentable?

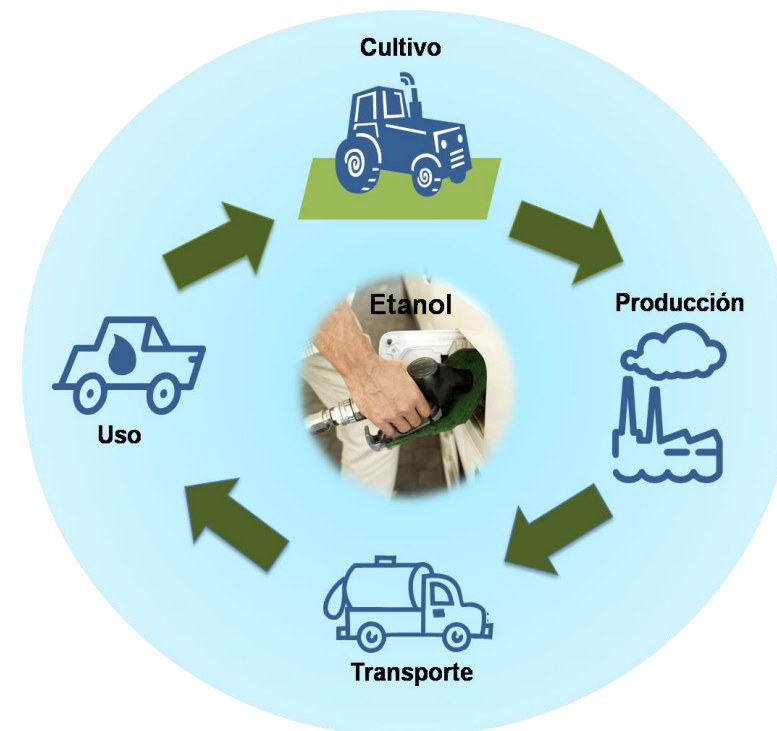


# Análisis de Ciclo de Vida



# 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).



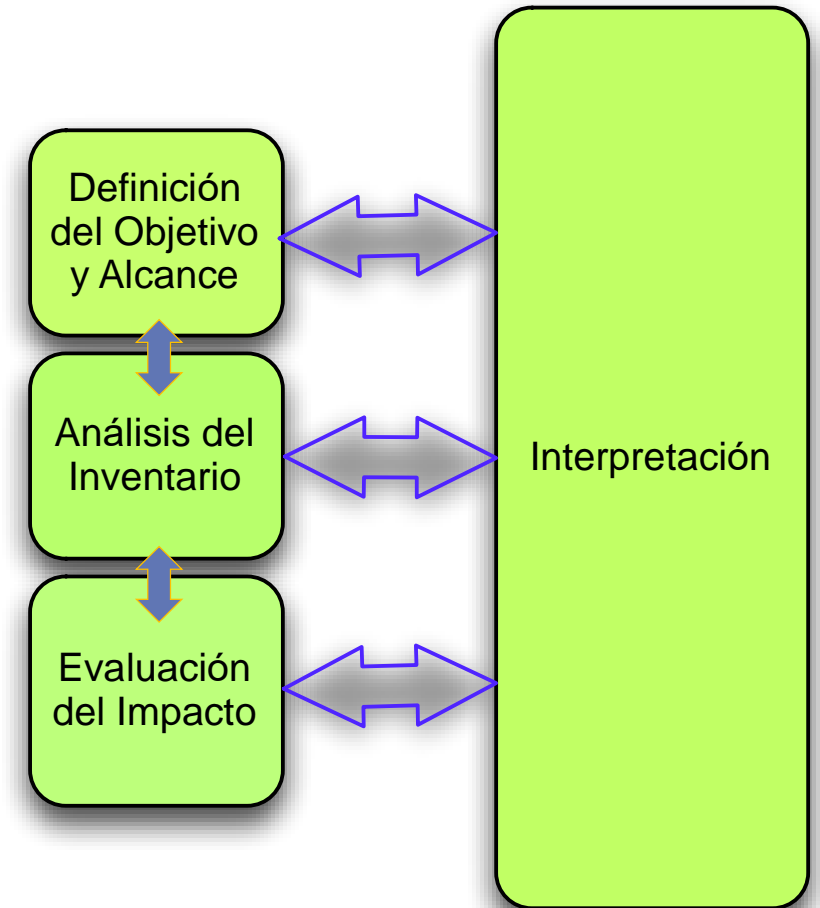
# Ciclo de Vida incluye

- 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

**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 (biocombustible):**

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

#### **Para el caso de un servicio (servicio de transporte):**

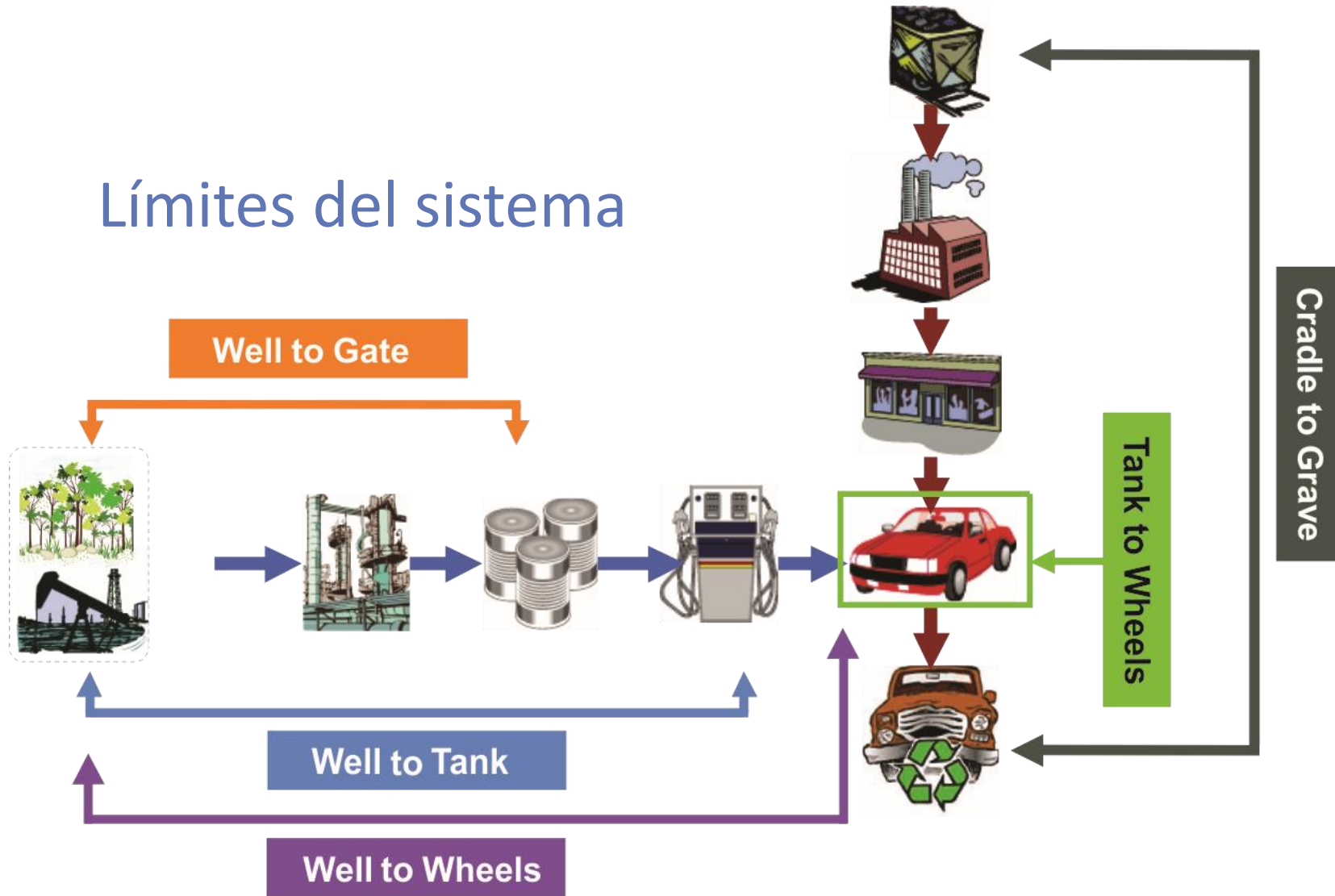
Ton de material transportado, pasajero transportado en una ruta definida.

# Tipos de ACV

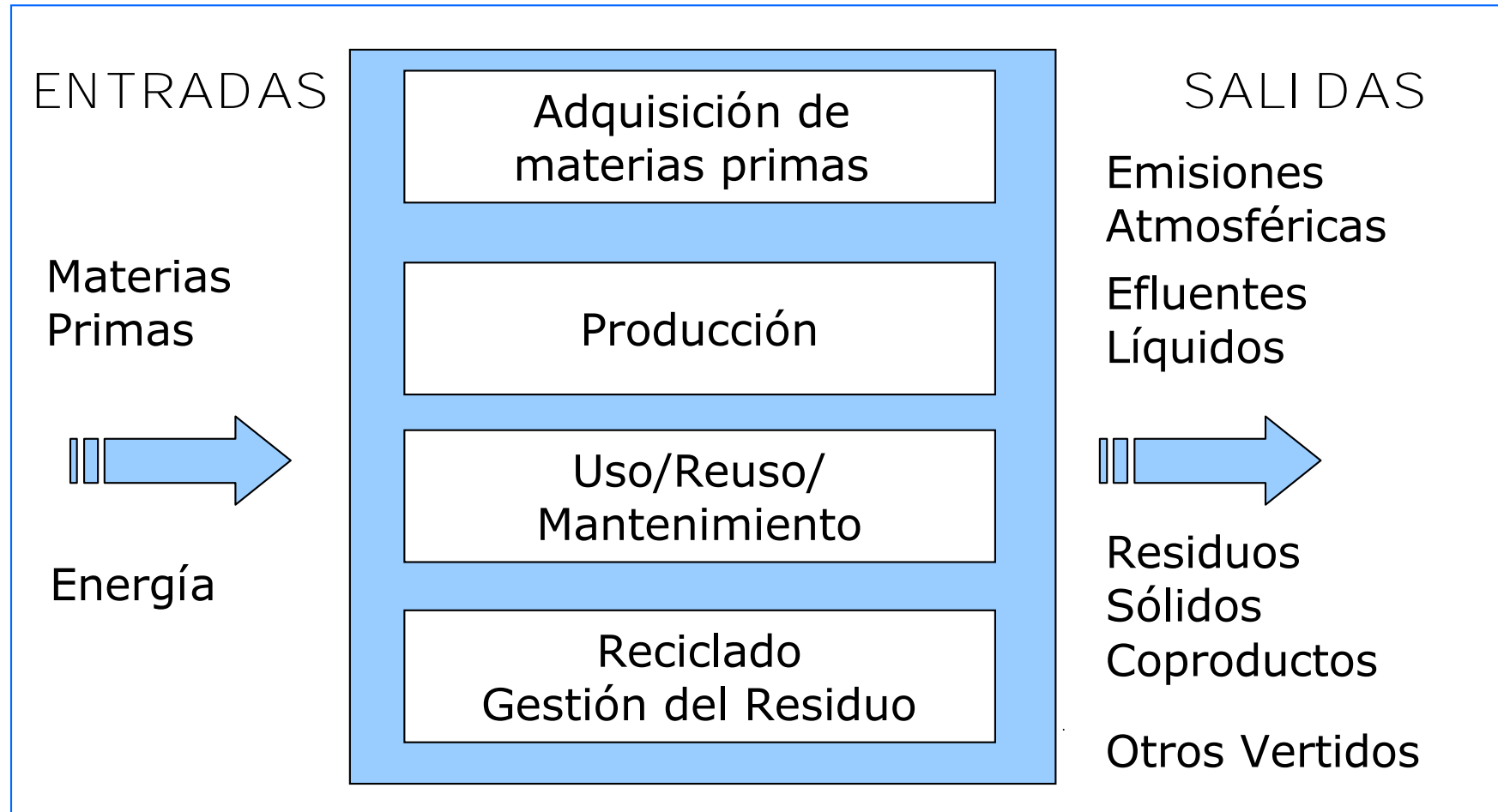
## Límites del Sistema

- 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.

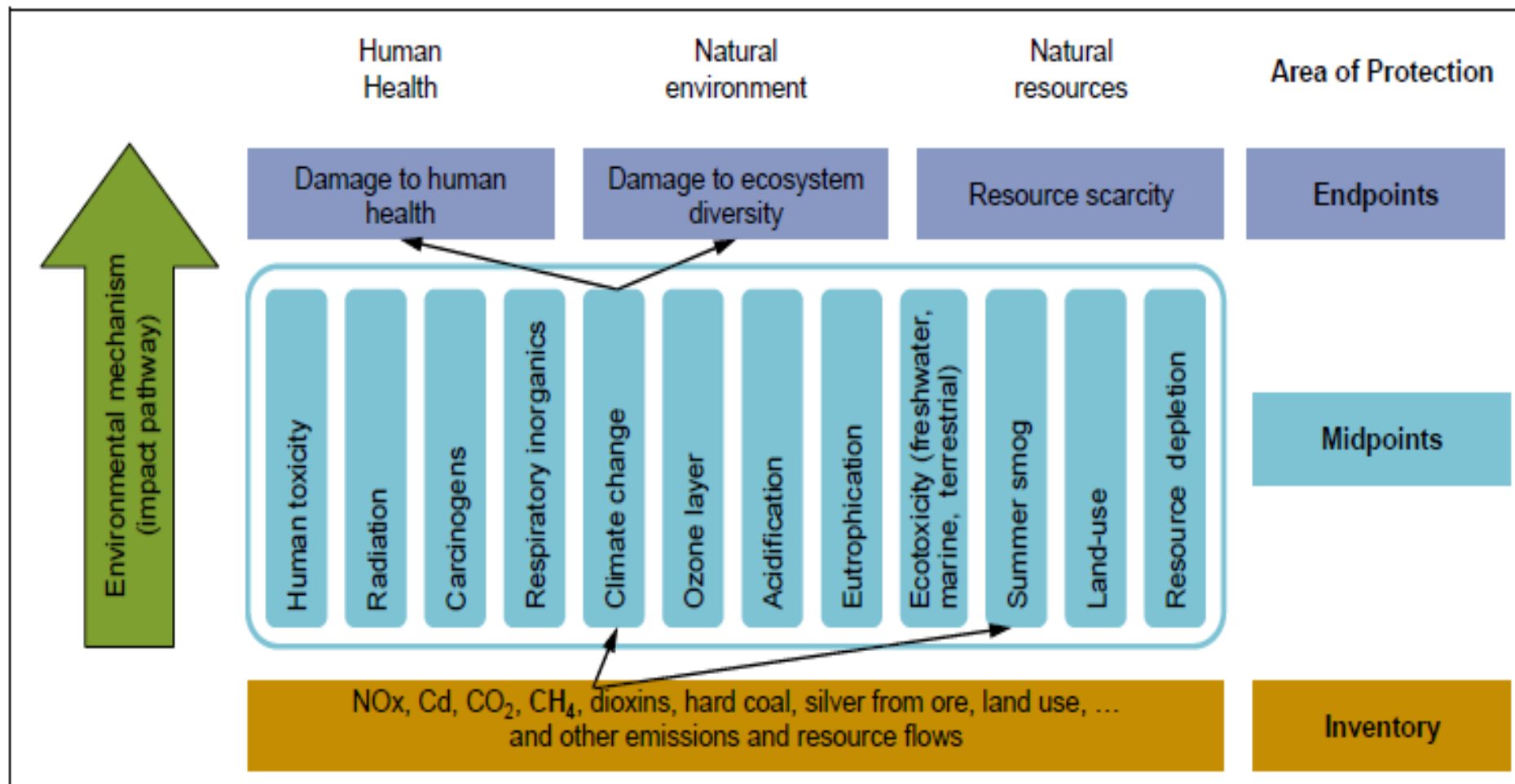
# Límites del sistema



# Inventario del Ciclo de Vida



# Métodos de Evaluación de Impacto Ambiental





## Software para Análisis de Ciclo de Vida

<b>Programa</b>	<b>Empresa/Institución</b>	<b>País</b>	<b>Fuente</b>
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

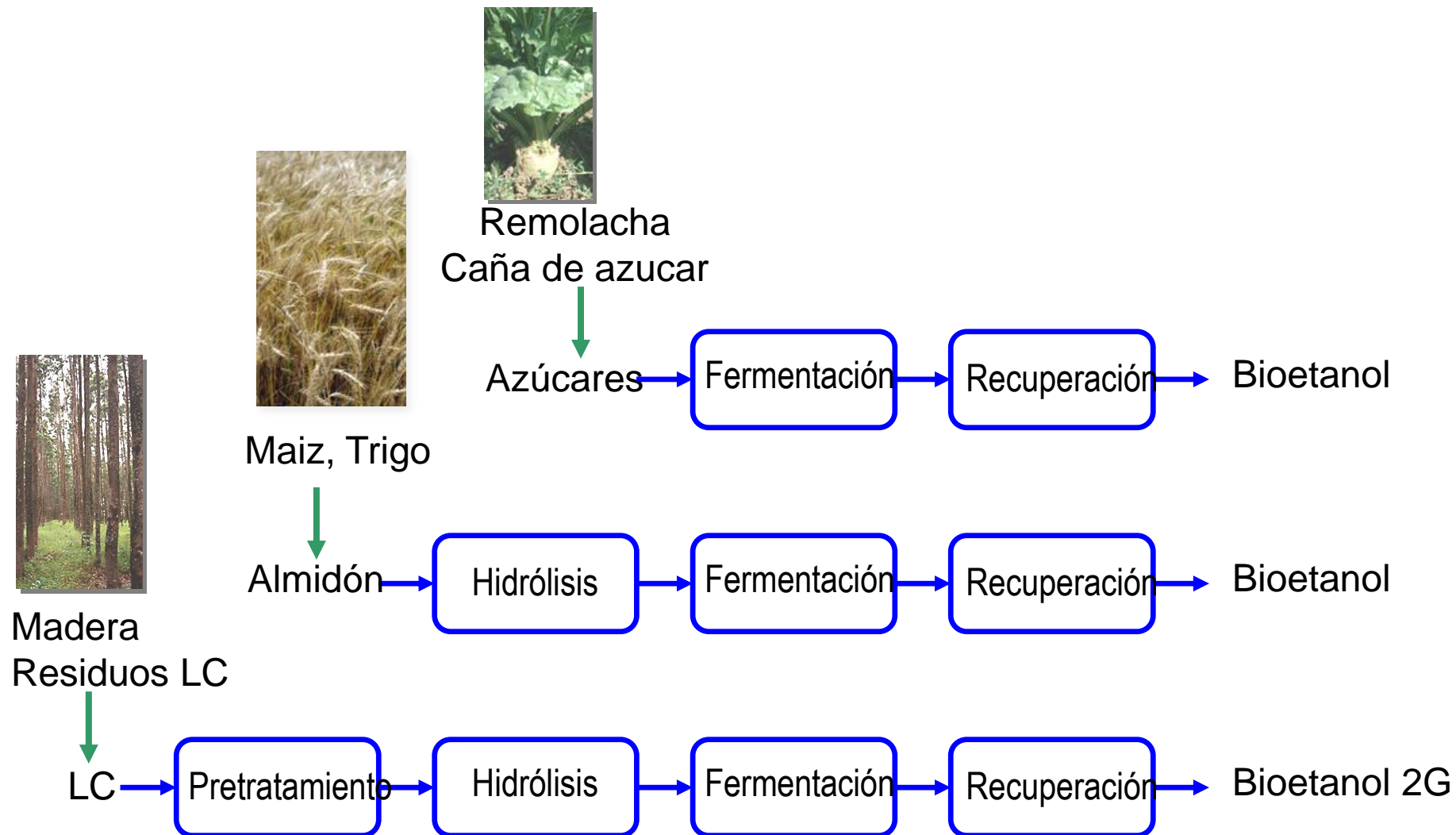
# Disponibilidad de biomasa en Chile



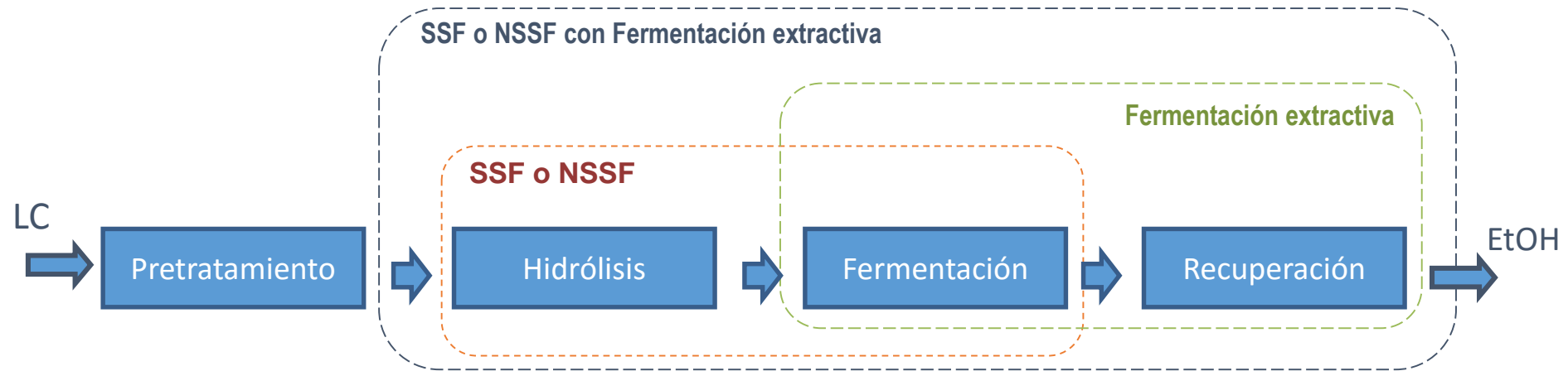
# Mercado del Bioetanol en Chile

- 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.

# Producción de Bioetanol



# Etapas del proceso de producción de bioetanol 2G



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

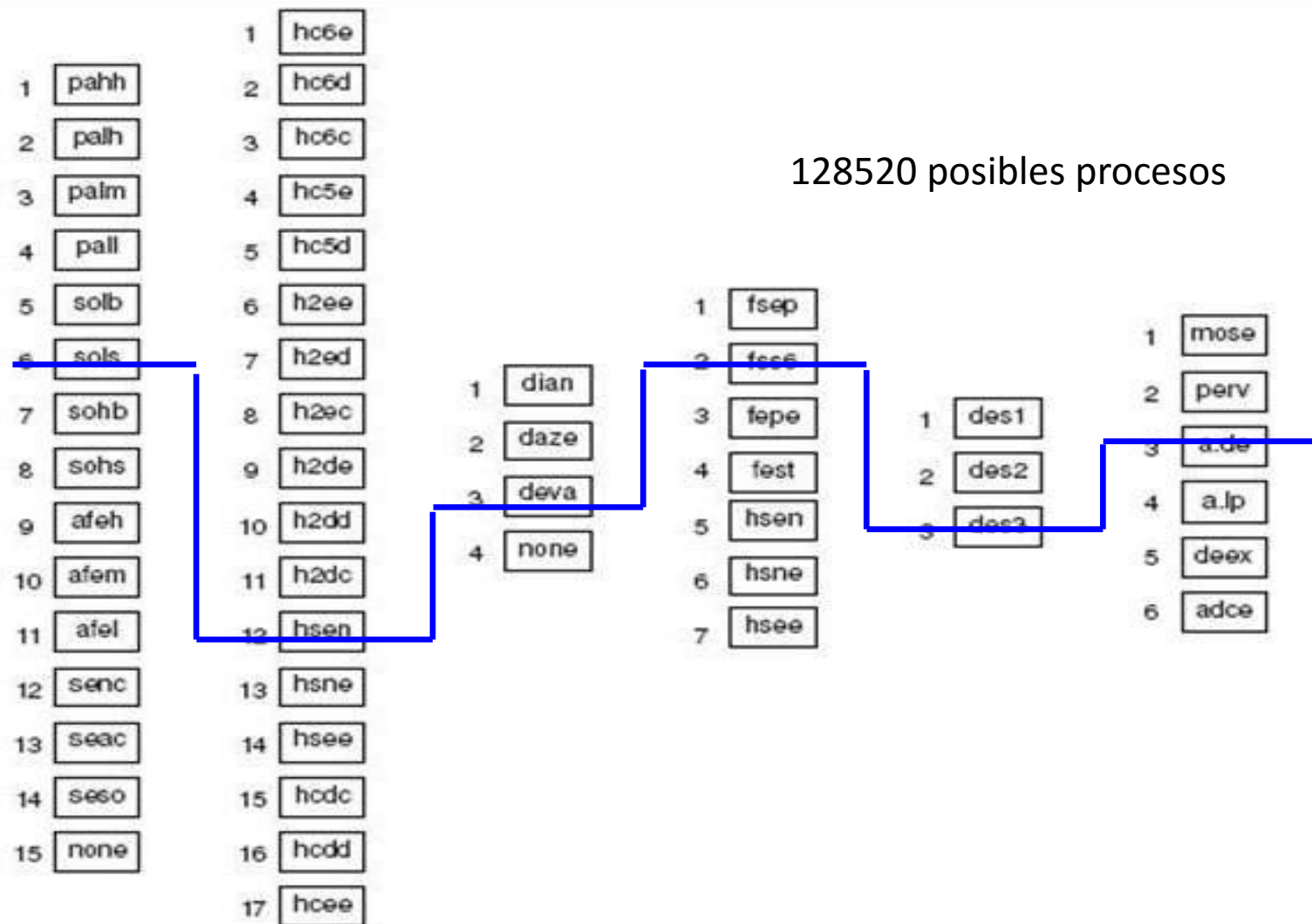
- Hidrólisis química
- Hidrólisis enzimática

- Cultivo por lote
- Lote alimentado
- Cultivo continuo

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



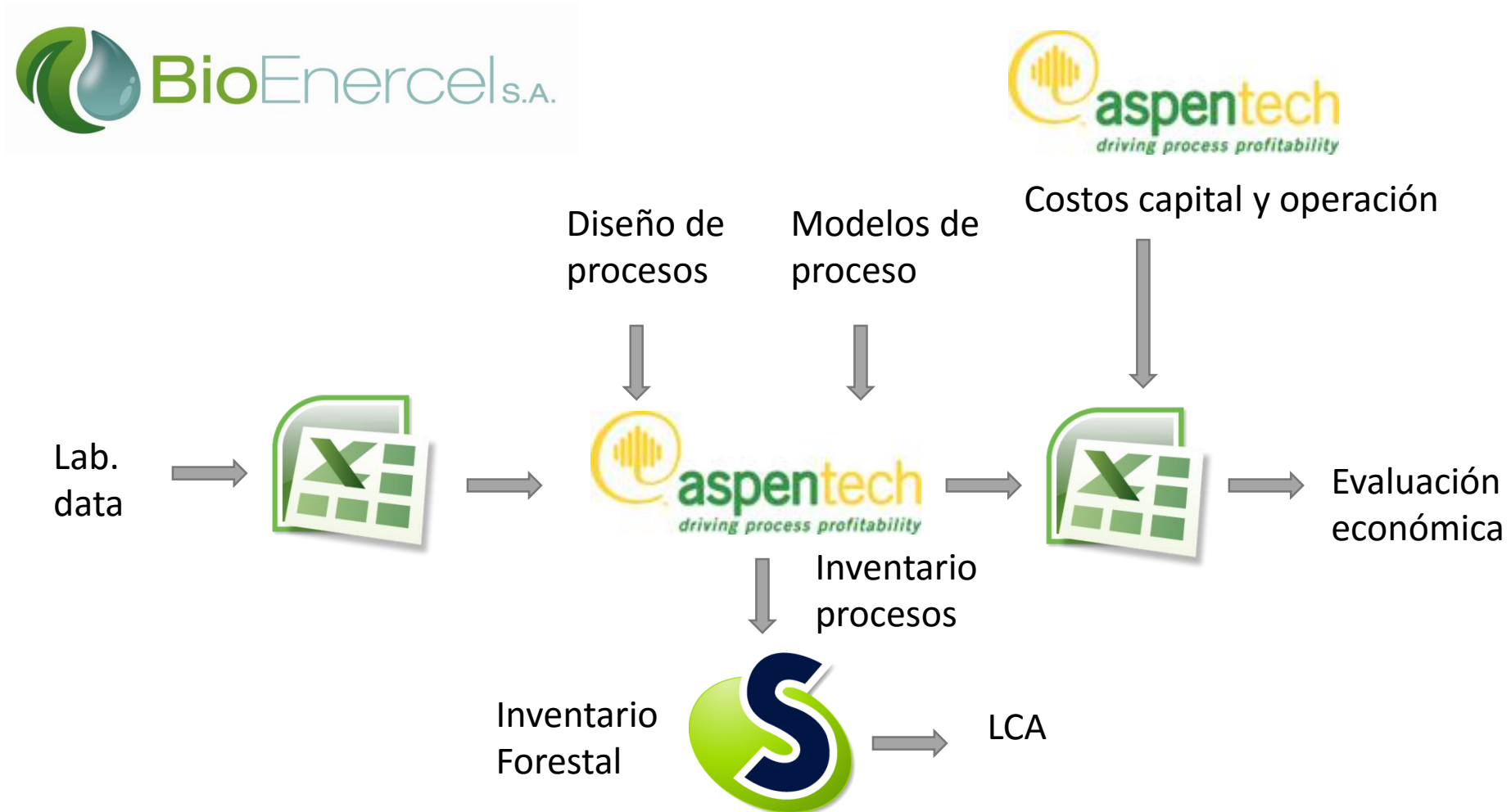
# Cual es la ruta "OPTIMA"?



# 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 (LCA)

# 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

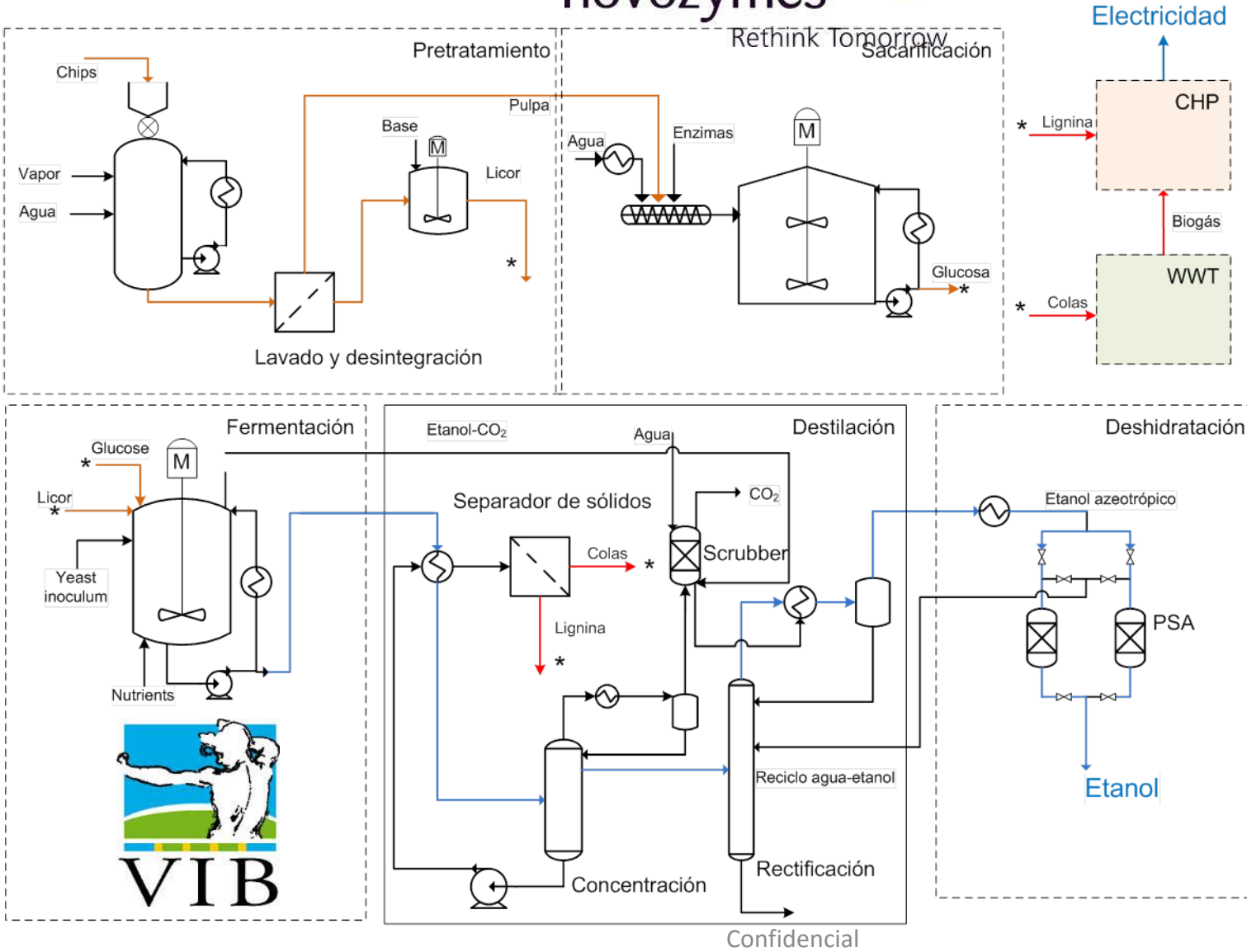
madera Eucaliptus



118-160 MML etanol por año



13-26 MW de energía eléctrica



**Rendimiento:**

- 250-350 L/t

**Costo Prod etanol:**

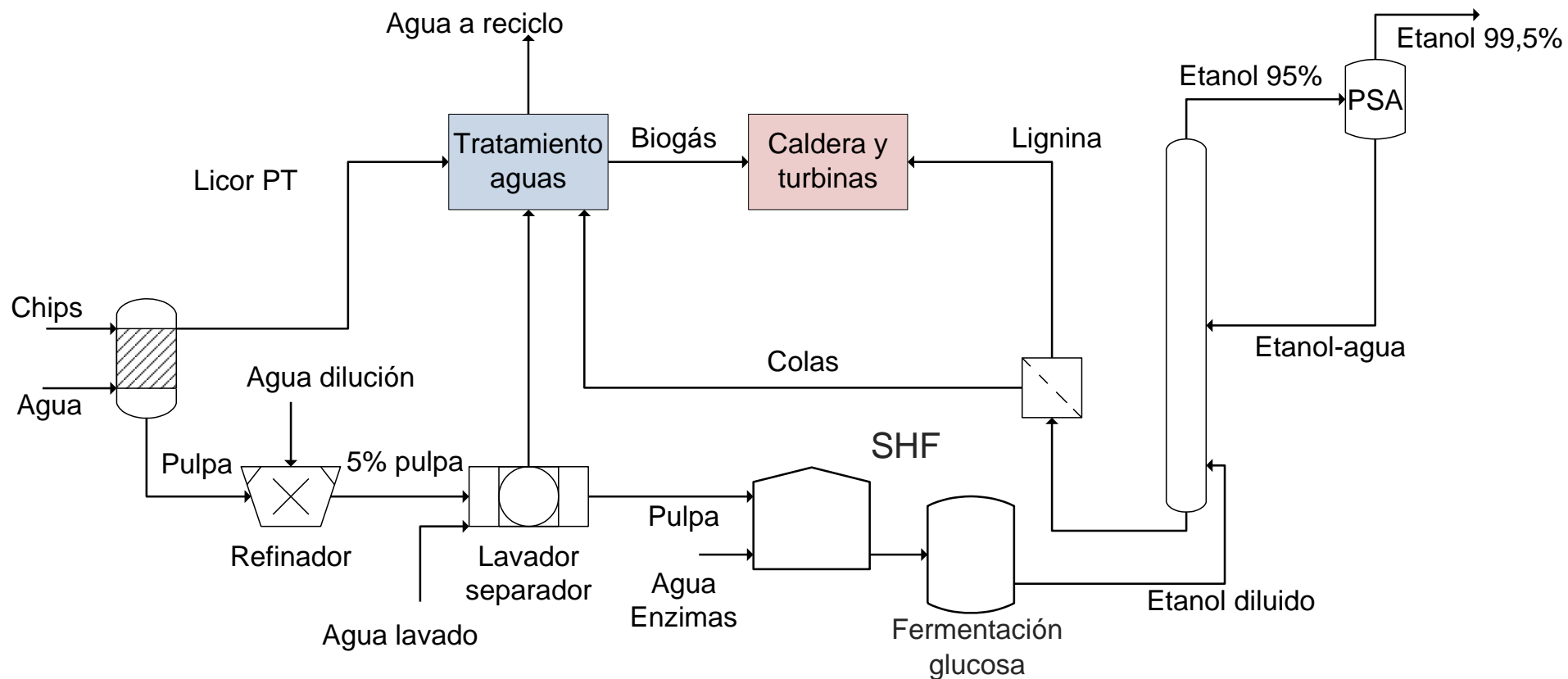
- 0,5-0,7 USD/L
- 10 % TIR

**Madera**

- 65-85 USD/t

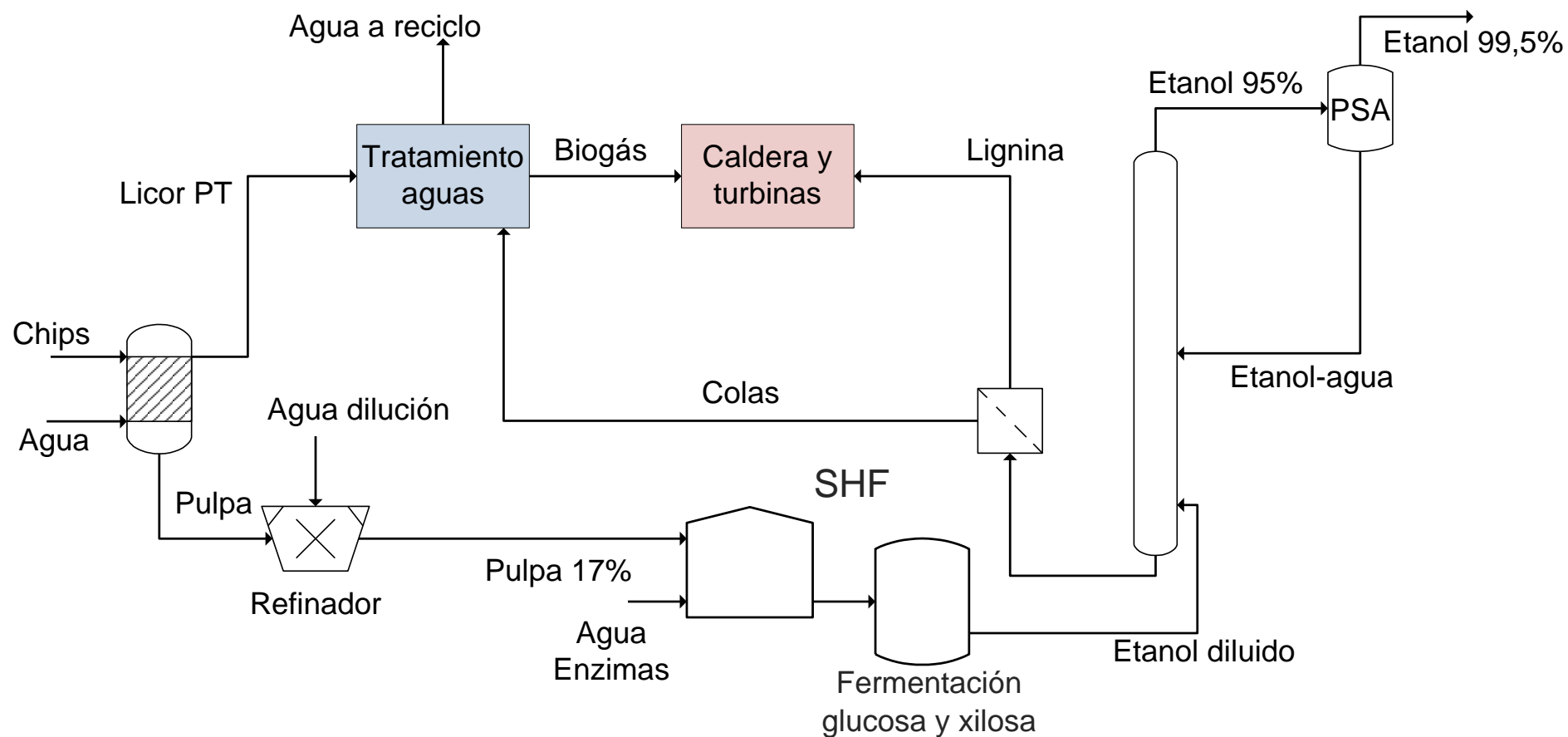
## Caso Base (CB)

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



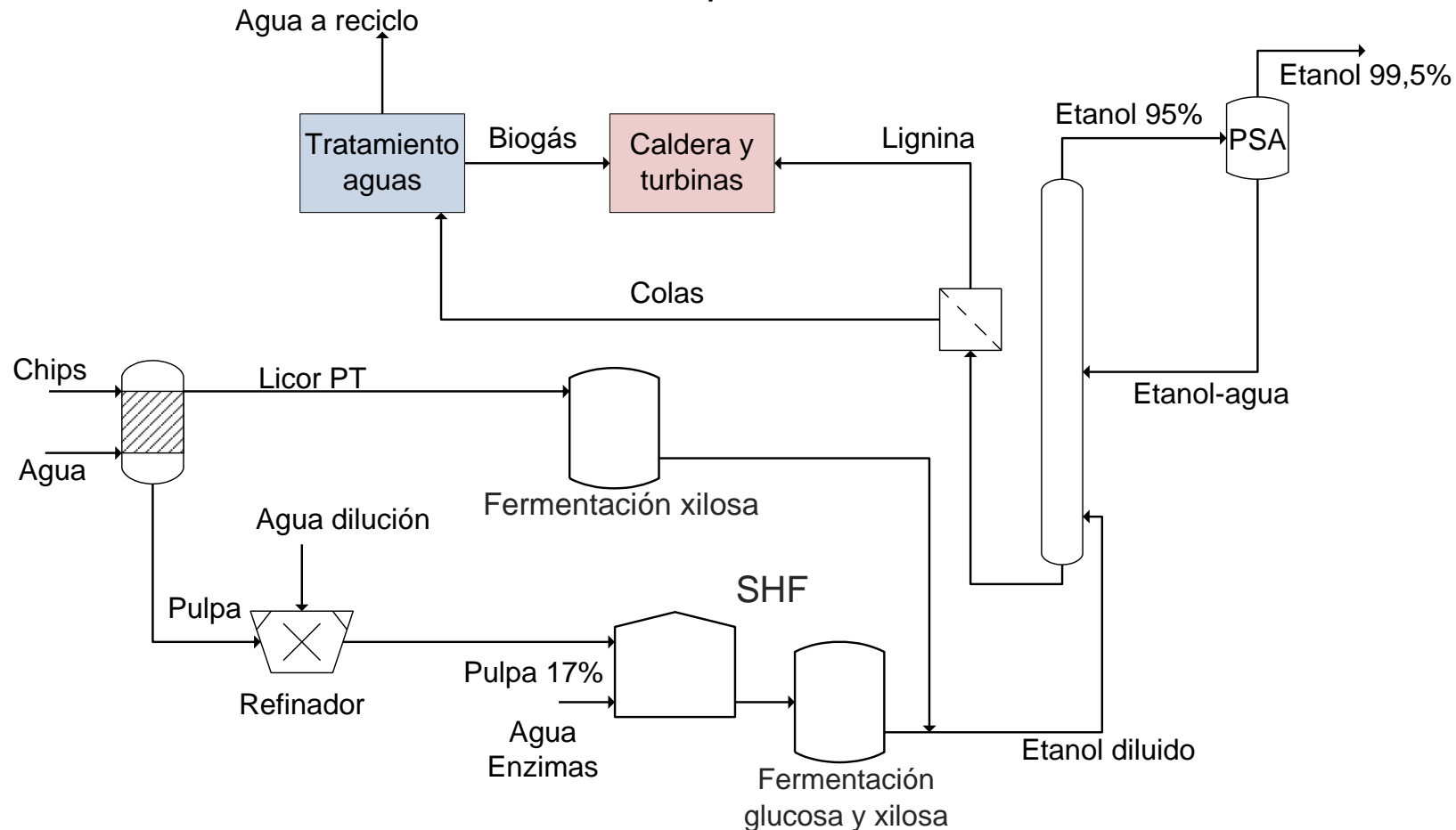
## Caso Refinación a alta consistencia (HiCo-cSSF)

- 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)

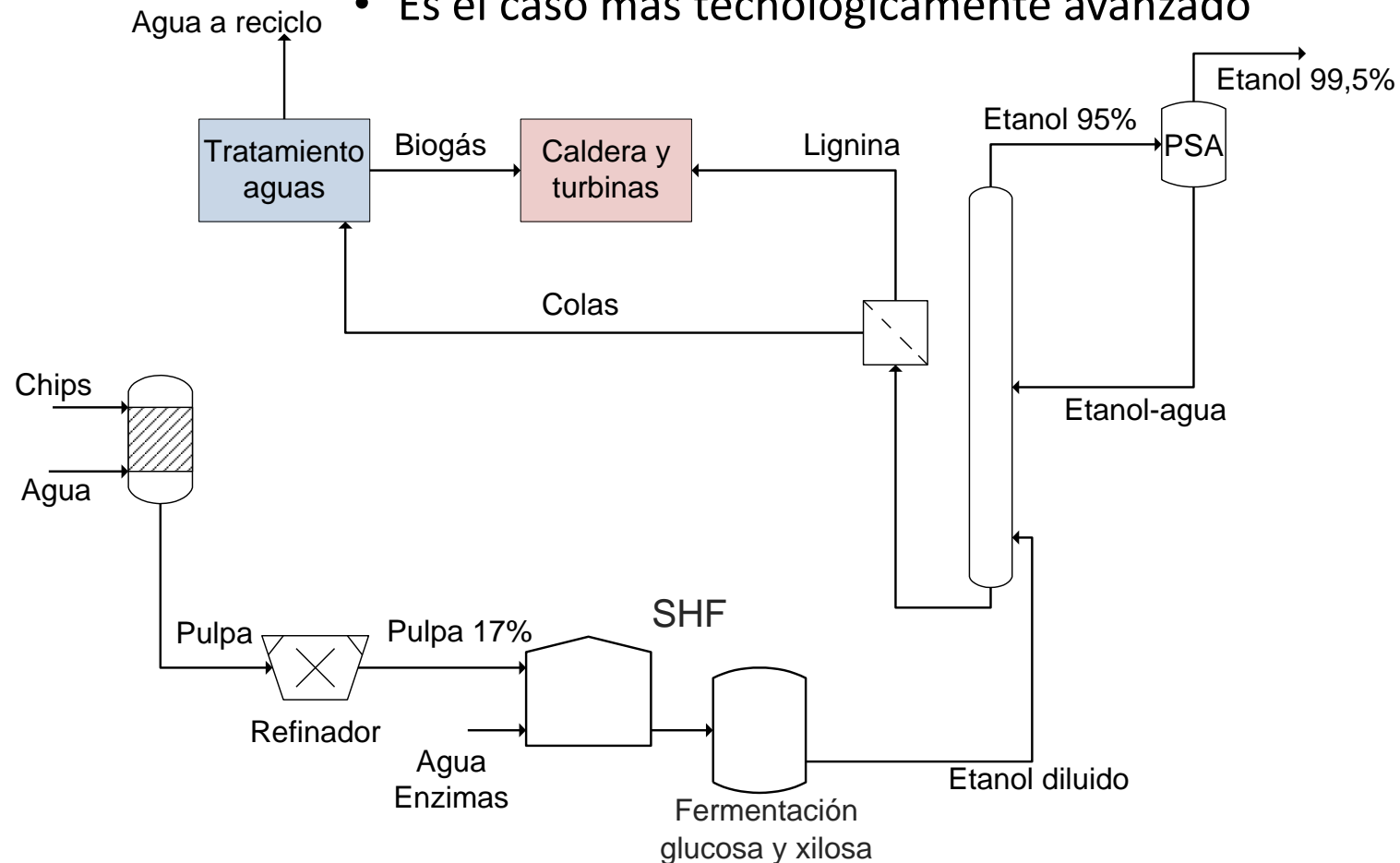
- Refinación a alta consistencia sin lavado de pulpa
- Fermentación de glucosa xilosa liberadas desde la pulpa
- La xilosa en licor PT es fermentada separadamente





## 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

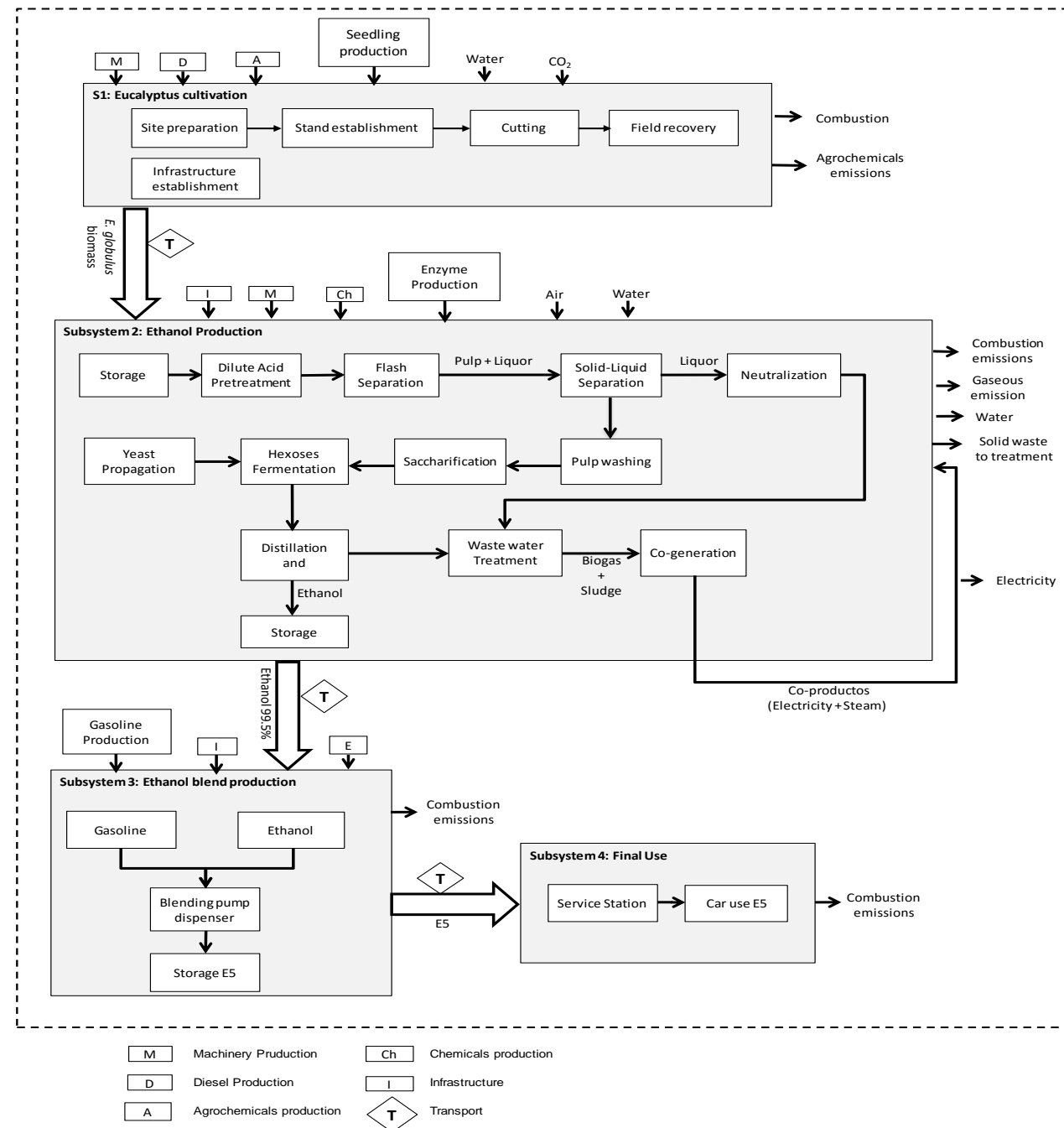


# Análisis de Ciclo de Vida

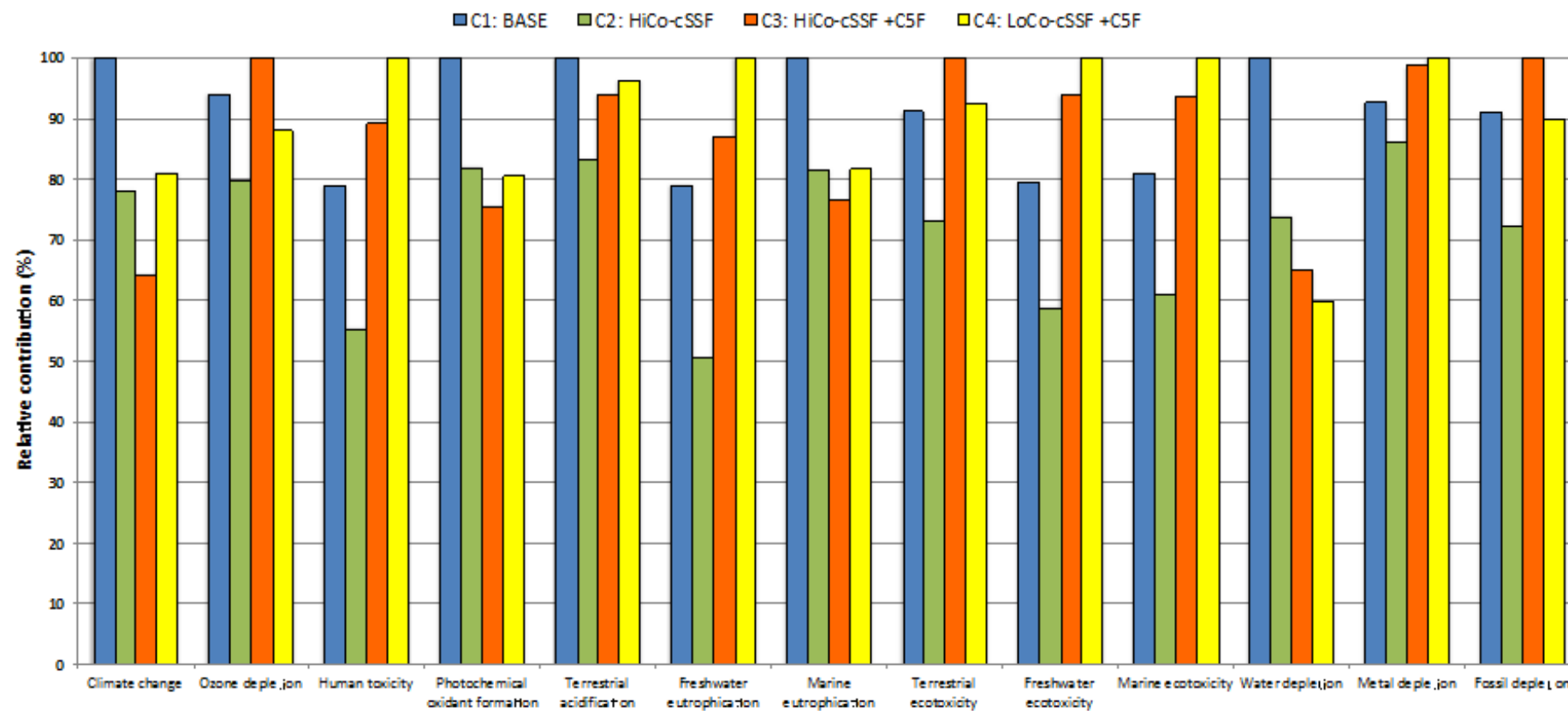
- Límites del sistema
  - Considera un escenario de manejo intensivo de bosque para la producción de chips de eucalipto en la región de Bio-Bio (Chile).
  - Las emisiones derivadas de la combustión del biocombustible se calcularon de acuerdo con rendimiento del motor y la unidad funcional
  - ***Unidad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





Taller Internacional Biorefinerías de Pequeña Escala  
Manizales, 30 de Mayo del 2017

# Diseño de procesos e impactos ambientales de las biorefinerías

**Prof. Germán Aroca**

Escuela de Ingeniería Bioquímica

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile