



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA Y BIOTECNOLOGIA

# **ESTUDIO EXPLORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y CO-PRODUCTOS DE BIOREFINERÍA, A PARTIR DE RASTROJOS DE MAÍZ**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL  
MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA

**DIEGO ALEJANDRO SCHNEUER FINLAY**

**Profesor Guía**

Rodrigo Donoso Hederra

**Miembros de la Comisión**

María Elena Lienqueo Contreras

Gerardo Díaz Rodenas

Oriana Salazar Aguirre

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2010

*A mi Hija, Padres,  
Hermanos y Amigos  
Incondicionales.*

## **“ESTUDIO EXPLORATORIO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL Y CO-PRODUCTOS DE BIOREFINERÍA, A PARTIR DE RASTROJOS DE MAÍZ”**

El presente trabajo de título tiene como objetivo estudiar, a nivel exploratorio, la viabilidad de la producción de bioetanol y co-productos de biorefinería en Chile, utilizando rastrojo de maíz como materia prima, logrando obtener resultados concluyentes.

El aumento del precio del petróleo, sus impactos ambientales y la incertidumbre de su abastecimiento para el futuro, han incrementado la búsqueda de fuentes de energía renovable, más conocidas como Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Dentro de las ERNC están los biocombustibles, los cuales se dividen en biodiesel, bioetanol y biogás, entre otros. El bioetanol es un biocombustible que puede sustituir a la gasolina, ya que se adapta al actual sistema de transporte, razón por la cual su uso se ha implementado en varios países. La regulación legal en Chile permitiría una mezcla de 5% de etanol con gasolina y el etanol no se vería agravado con el impuesto específico de la gasolina.

Actualmente, la producción mundial de etanol proviene principalmente de maíz y caña de azúcar, lo que implicó el aumento del precio de estos alimentos. Para solucionar este problema se está impulsando el desarrollo de tecnologías para producir bioetanol lignocelulósico y se espera que esta tecnología esté completamente disponible el año 2012 en el mundo. Uno de los problemas en la actualidad del bioetanol lignocelulósico es que no es rentable por sí solo y es necesario tener ingresos adicionales para que éste sea rentable.

En este informe se desarrolló un estudio técnico, en el cual se diseñó conceptualmente una planta de biorefinería, realizando el balance de masa asociado y el dimensionamiento de los equipos. Con ésto se obtuvo un costo de equipos de US\$ 67,7 millones, considerando una tasa de cambio de US\$ 1 a 525 CHP.

Al producir bioetanol de residuo de cosecha de maíz se aprovecharían los desechos agrícolas del país y no se competiría con la producción de alimentos. Además, se producirían co-productos de biorefinería (CO<sub>2</sub> alimenticio, levadura industrial, lignina comercial y xilitol), para aumentar la rentabilidad de una planta productora en estudio.

La planta productora antes mencionada estaría ubicada en la VI Región, Libertador Bernardo O'Higgins, debido a la disponibilidad de materia prima, su geomorfología y accesos viales, para funcionar como biorefinería. Su capacidad sería de 75 mil m<sup>3</sup> de bioetanol al año, a partir de 345 mil toneladas de rastrojo de maíz.

Finalmente, se elaboró un estudio económico de la planta, en donde se estimó la inversión inicial del proyecto en US\$ 160 millones. El costo de producción de bioetanol que resultó fue de US\$ 540/m<sup>3</sup>. Si el precio de venta del bioetanol fuese US\$ 600/m<sup>3</sup>, el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto es US\$ 21 millones en 20 años y la TIR es 18% y un periodo de recuperación de 5 años.

## **AGRADECIMIENTOS**

A continuación quiero agradecer a las personas que son muy importantes, tanto para la realización de mi memoria como en mi vida.

Milla, mi hija hermosa preciosa. Eres la razón de porqué vivo y te amo mucho hija mía.

Mama, no sé cómo me aguantas, pero mi vida sin ti sería un desastre. Gracias por apoyarme siempre.

Papa, tu apoyo y consejos son invaluable. Gracias por ser un modelo a seguir y por tu infinita preocupación hacia mí.

Seba y Maca, mis hermanos queridísimos. Gracias por su apoyo, risas y llantos. Son parte fundamental de mi vida y siempre lo serán.

Consu, siempre me apoyaste, me diste ánimo y estuviste ahí cuando más te necesite. Te amo mucho.

Serginho infernal, gracias por tu amistad incondicional durante todos estos años. Grande padrino, eres lo mejor. Chicho, gracias por tu apoyo constante, tus críticas, tus “lee mas, lee mas” durante la tesis que hicimos par a par. Gracias por todo Cotito.

A mis compañeros BT, Jano, Panky, Marce, Cami, Igor, Ronpi, Mari, Carlanga, Paperlillo, y en especial a la Ale (un cuarto de mi título es tuyo). Gracias por todos esos momentos increíbles que pasamos juntos.

A los Tigres, por ser un grupo increíble, tanto en esos miles de carretes “especiales” como en esos consejos o ayudas de pasillo. Vamos, vamos los Tigres, vamos, vamos a ganar!!!!

A esos amigos que no necesariamente estuvieron conmigo en alguna especialidad, sino que se forjaron en el futbol o en la vida universitaria. Gracias Vásquez, Gaete, Schuler, Xavier, Snoopy, Jano, Chiti, en fin muchos pero tendría que seguir con 20 páginas más. A esos amigos que se encontraron en el camino de la vida, Bofe, Toño, Trapo, Toro, Chuchu, Kabir, Maja, Lucho, Abo, Camilain, Ponty, Villegas, Chumber etc.

Gracias profe MEL, que a pesar de que estaba muy enferma, siempre estuvo ahí de alguna forma para aconsejarnos, ayudarnos o reírnos. Gracias profe. Gracias profe Donoso, por su tremenda sabiduría, conocimiento y sentido del humor. Con usted aprendí a escribir jajajajaja, creo. También agradecer a la profe Oriana, al profe Alejandro y al profe Gerardo, por los consejos y ayudas.

Importante también es agradecer al Programa Domeyko-Universidad de Chile (Optimización del Proceso de Tratamiento de Lignocelulosas para obtener Bioetanol) y el Proyecto de Investigación Conjunta en Energías Renovables no Convencionales Chile/Finlandia Conicyt-AKA CFF05 (Procesos óptimos para el tratamiento de materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol) que apoyaron esta investigación.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
INDICE DE ANEXOS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	4
1.2.1. Objetivo General.....	4
1.2.2. Objetivos Específicos.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4. METODOLOGÍA.....	6
1.5. ALCANCES.....	6
<b>2. CARACTERÍSTICAS DEL ETANOL CELULÓSICO.....</b>	<b>8</b>
2.1. PROPIEDADES.....	8
2.2. VENTAJAS.....	9
2.3. DESVENTAJAS.....	9
<b>3. ESTUDIO DE MERCADO.....</b>	<b>10</b>
3.1. USOS DEL BIOETANOL.....	10
3.2. ANÁLISIS DEL ENTORNO INTERNACIONAL.....	10
3.2.1. Requerimientos Energéticos.....	10
3.2.2. El Petróleo en el Mundo.....	11
3.2.3. Etanol en el Mundo.....	13
3.2.4. Plantas de Bioetanol.....	16

<b>3.3. ANALISIS DEL MERCADO NACIONAL.....</b>	<b>17</b>
3.3.1. Oferta.....	19
3.3.2. Demanda Nacional.....	20
<b>3.4. PRECIOS.....</b>	<b>21</b>
3.4.1. Precio Bioetanol.....	21
3.4.2. Precio de los Co-Productos.....	22
<b>3.5. ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.6. CAPACIDAD DE LA PLANTA.....</b>	<b>24</b>
<b>4. ESTUDIO LEGAL .....</b>	<b>26</b>
4.1. NORMATIVAS DE CALIDAD.....	26
4.1.1. Especificaciones de Calidad.....	26
4.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL .....	27
4.3. NORMAS PARA RESIDUOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES .....	28
4.4. LEGISLACIÓN RELACIONADA A LOS IMPUESTOS SOBRE EL BIOETANOL. ....	28
<b>5. ESTUDIO TÉCNICO .....</b>	<b>30</b>
5.1. MATERIA PRIMA.....	30
5.1.1. Ubicación .....	30
5.1.2. Caracterización .....	31
5.2. LOCALIZACIÓN.....	34
5.3. PRODUCTOS.....	38
5.3.1 Productos Derivados de la Celulosa .....	38
5.3.2. Productos Derivados de la Lignina .....	41
5.3.3. Productos Derivados de la Hemicelulosa .....	42
5.3.4. Productos de la Biorefinería.....	44
5.3.5 Productos Seleccionados.....	46
5.4. PROCESO .....	47
5.4.1 Proceso General.....	47

5.4.2. Descripción del Proceso Productivo Elegido .....	48
5.4.3. Balance de Masa .....	56
5.4.4. Dimensionamiento de los equipos.....	57
5.4.5 Layout de la Planta.....	60
<b>6. ESTUDIO ECONÓMICO .....</b>	<b>62</b>
6.1 PROCEDIMIENTO .....	62
6.2. EQUIPOS.....	62
6.3. COSTOS OPERACIONALES .....	65
6.3.1. Costos Variables de Operación .....	65
6.3.2. Costos Fijos de Operación .....	67
6.4 CAPITAL DE TRABAJO .....	69
6.5. PLANIFICACION.....	70
6.6. FLUJO DE CAJA .....	71
6.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	73
6.6.1. Precio del Bioetanol.....	75
6.6.2 Costo de las Enzimas .....	76
6.6.3 Costo de los Equipos.....	77
6.6.4 Costo de la Materia Prima .....	77
6.6.5. Venta de CO <sub>2</sub> .....	77
<b>7. ESCENARIO FUTURO.....</b>	<b>78</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>79</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>81</b>
<b>10. SIGLAS.....</b>	<b>86</b>
<b>11. DEFINICIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>12. ANEXOS.....</b>	<b>90</b>

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1: Diagrama productos derivados de la biorefinería.....</b>	<b>90</b>
<b>Anexo 2: Lista de conferencias, seminarios y charlas.....</b>	<b>90</b>
<b>Anexo 3: Normativa ambiental atingente a residuos líquidos industriales.....</b>	<b>91</b>
<b>Anexo 4: Comunas de la VI región y datos asociados al rastrojo de maíz.....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo 5: Clasificación de azúcares .....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo 6: Características de ligmed-a .....</b>	<b>94</b>
<b>Anexo 7: Precio gasolina y diesel.....</b>	<b>95</b>
<b>Anexo 8: Normativa de calidad del bioetanol sometida a consulta pública por la CNE (Mayo 2007).....</b>	<b>98</b>
<b>Anexo 9: Calculo de platos de columna de destilación .....</b>	<b>100</b>
<b>Anexo 10: Precio FOB equipos 2007 .....</b>	<b>101</b>
<b>Anexo 11: Cotización costos equipos (FOB 2009).....</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 12: Detalle costo de capital.....</b>	<b>103</b>
<b>Anexo 13: Gráfico del precio de electricidad .....</b>	<b>104</b>
<b>Anexo 14: Detalle de préstamo y datos de éste.....</b>	<b>105</b>
<b>Anexo 15: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 540 US\$/m<sup>3</sup>, VPN = 0. ....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo 16: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 680 US\$/m<sup>3</sup>.....</b>	<b>107</b>
<b>Anexo 17: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 1.150 US\$/m<sup>3</sup>.....</b>	<b>108</b>
<b>Anexo 18: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 800 US\$/m<sup>3</sup>.....</b>	<b>109</b>
<b>Anexo 19: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 600 US\$/m<sup>3</sup>.....</b>	<b>110</b>
<b>Anexo 20: Flujo de caja con prestamos en MMUS\$. Sin venta de CO2 y precio bioetanol = 600 US\$/m<sup>3</sup>.....</b>	<b>111</b>
<b>Anexo 21: CD con planilla de cálculos de balance de masa, dimensionamiento y flujo de caja .....</b>	<b>112</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo del dióxido de carbono con etanol.....	2
Figura 2: Estructura del rastrojo de maíz. ....	32
Figura 3: Estructura de la celulosa.....	33
Figura 4: Mapa geomorfológico VI región .....	35
Figura 5: Mapa físico VI región .....	36
Figura 6: Comunas seleccionadas para el proyecto en la VI región.....	37
Figura 7: Productos derivados de la biorefinería.....	38
Figura 8: Usos del biogás. ....	45
Figura 9: Diagrama de bloques del proceso en estudio .....	49
Figura 10: Diagrama de flujo .....	52
Figura 11: Layout de la planta.....	61
Figura 12: Diagrama de productos lignocelulósicos de la biorefinería. ....	90
Figura 13: Normativa de calidad del bioetanol .....	98

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Demanda mundial de energía primaria .....	11
Gráfico 2: Demanda global proyectada de petróleo .....	12
Gráfico 3: Consumo mundial de petróleo por sector (millones de barriles por día) .....	12
Gráfico 4: Producción mundial de etanol.....	13
Gráfico 5: Producción estimada de etanol hasta 2030 y principales productores .....	14
Gráfico 6: Biocombustibles en el mundo en el 2006.....	14
Gráfico 7: Porcentajes establecidos y actual de producción de etanol en la Unión Europea.....	15
Gráfico 8: Dependencia de matriz energética Chilena.....	18
Gráfico 9: Producción, consumo e importaciones de petróleo crudo .....	18
Gráfico 10: Evolución de la producción nacional de gasolina [miles m <sup>3</sup> ] .....	19
Gráfico 11: Consumo de gasolina en el sector transporte (miles de toneladas).....	20
Gráfico 12: Evolución del precio del petróleo .....	22
Gráfico 13: Superficie sembrada con maíz en Chile .....	31
Gráfico 14: Análisis de sensibilidad .....	73
Gráfico 15: Precio de la gasolina.....	96
Gráfico 16: Precio del diesel .....	97
Gráfico 17: Cálculo de platos de columna de destilación .....	100
Gráfico 18: Precio electricidad SIC .....	104

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del etanol en relación con la gasolina .....	8
Tabla 2: Demanda estimada de bioetanol .....	21
Tabla 3: Distribución histórica de potenciales cultivos para bioetanol .....	24
Tabla 4: Demanda de bioetanol en Chile y producción de la planta en estudio .....	24
Tabla 5: Caracterización de residuos agrícolas de maíz. ....	34
Tabla 6: Comunas electas con materia prima. ....	37
Tabla 7: Características del biogás. ....	45
Tabla 8: Propiedades fisicoquímicas de algunos compuestos .....	50
Tabla 9: Flujos involucrados en el diagrama de flujo [Kg/día] .....	53
Tabla 10: Resumen de flujos del proceso.....	56
Tabla 11: Flujos importantes del proceso .....	56
Tabla 12: Relación materia prima con productos .....	57
Tabla 13: Fracciones molares de corrientes de destilación .....	58
Tabla 14: Dimensionamiento tanques y silos .....	59
Tabla 15: Dimensionamiento equipos.....	60
Tabla 16: Índice de Marshall and Swift .....	63
Tabla 17: Costo de capital.....	63
Tabla 18: Inversión .....	64
Tabla 19: Comparación de plantas de etanol celulósico .....	65
Tabla 20: Insumos.....	66
Tabla 21: Recursos humanos.....	68
Tabla 22: Costos fijos de operación de una planta de producción de bioetanol.....	69
Tabla 23: Cálculo de capital de trabajo.....	69
Tabla 24: Ingresos por venta de productos.....	70

Tabla 25: Planificación .....	71
Tabla 26: Producción con distintas capacidades .....	71
Tabla 27: Parámetros del flujo de caja.....	72
Tabla 28: Flujo de caja sin préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 540 US\$/m <sup>3</sup> . VPN = 0.....	74
Tabla 29: Parámetros de carga contaminante.....	91
Tabla 30: Parámetros de carga contaminante.....	92
Tabla 31: Comunas VI región y datos asociados al rastrojo de maíz. ....	93
Tabla 32: Efectividad terapéutica de 7 fármacos en el tratamiento de diarrea del cerdo cría. ....	94
Tabla 33: Recuperación de los cerdos crías en el curso del tratamiento con LIGMED-A. ....	95
Tabla 34: Precio de gasolina.....	96
Tabla 35: Precio diesel .....	97
Tabla 36: Precio FOB equipos 2007.....	101
Tabla 37: Cotización costos equipos (FOB 2009).....	102
Tabla 38: Detalle costo de capital.....	103
Tabla 39: Prestamos.....	105
Tabla 40: Datos préstamo.....	105
Tabla 41: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. VPN =0 .....	106
Tabla 42: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 680 US\$/m <sup>3</sup> .....	107
Tabla 43: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 1.150 US\$/m <sup>3</sup> .....	108
Tabla 44: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 800 US\$/m <sup>3</sup> .....	109
Tabla 45: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 600 US\$/m <sup>3</sup> .....	110
Tabla 46: Flujo de caja con prestamos en MMUS\$. Sin venta de CO <sub>2</sub> y precio bioetanol = 600 US\$/m <sup>3</sup> .....	111

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. ANTECEDENTES GENERALES

En la actualidad existe una gran dependencia de los combustibles fósiles, con los cuales se provee de energía a la mayoría de las maquinarias y por lo tanto se puede realizar actividades cotidianas como la movilización o el funcionamiento de las industrias. Sin embargo, esta fuente energética ha mostrado tener una serie de problemas, tales como la gran dependencia que se tiene de los países proveedores, el agotamiento de estas fuentes<sup>1</sup>, el impacto económico de la fluctuación del precio del petróleo y la presión mundial por disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> debido al calentamiento global asociado a éstas. Es por ésto que es necesario realizar investigaciones asociadas al tema, para así encontrar energías renovables no convencionales (ERNC), las cuales puedan sustituir esta fuente de energía, evitando así los problemas asociados.

Dentro de las ERNC<sup>2</sup>, se puede destacar la energía solar, la energía proveniente del hidrógeno, la energía eólica, la energía maremotriz (proveniente de las olas y las mareas) y los biocombustibles. Las ERNC se vislumbran como energías renovables que no contaminarán el ecosistema y que diversificarían la matriz energética, para así reemplazar en algún momento a los combustibles fósiles.

Estas ERNC están en distintos niveles de desarrollo. Por ejemplo, la energía solar y eólica están siendo desarrolladas hace bastante tiempo pero son dependientes de la presencia del sol y de los vientos; y la energía proveniente del hidrógeno y la maremotriz, las cuales están en pleno desarrollo pero sin resultados concluyentes todavía.

La biomasa representa una abundante fuente de carbón renovable para la producción de bioenergía y biomateriales, en donde sus variados usos podrían suplir varias necesidades de la sociedad. Los avances en genética, biotecnología, procesos químicos e ingeniería están apuntando a un nuevo concepto de manufactura, en donde se convierte biomasa renovable en combustibles y productos de valor, el cual es conocido como biorefinería. La integración de los cultivos agroenergéticos con el proceso anteriormente mencionado, ofrece un enorme potencial para el desarrollo de bioenergía y biomateriales en forma sustentable, el cual apuntara a un nuevo paradigma en esta área<sup>3</sup>.

Los biocombustibles están en pleno desarrollo y tomando cada día más fuerza; podrían sustituir parcialmente a los combustibles fósiles, dando solución a los problemas anteriormente mencionados, dado su menor impacto ambiental y la posibilidad de crear un ciclo energético, el cual disminuya las emisiones de CO<sub>2</sub>, equiparando, en cierta medida, las emisiones emitidas en el proceso y las fijadas por las plantas. Este tipo de fuente energética todavía está en estudio y se está analizando su rentabilidad.

Los pronósticos sobre la duración del petróleo, extraído en grandes cantidades, indican que estaría agotándose en unos 40 años más, por lo cual es de suma importancia buscar fuentes

---

1 Cavieres, P. 2007.

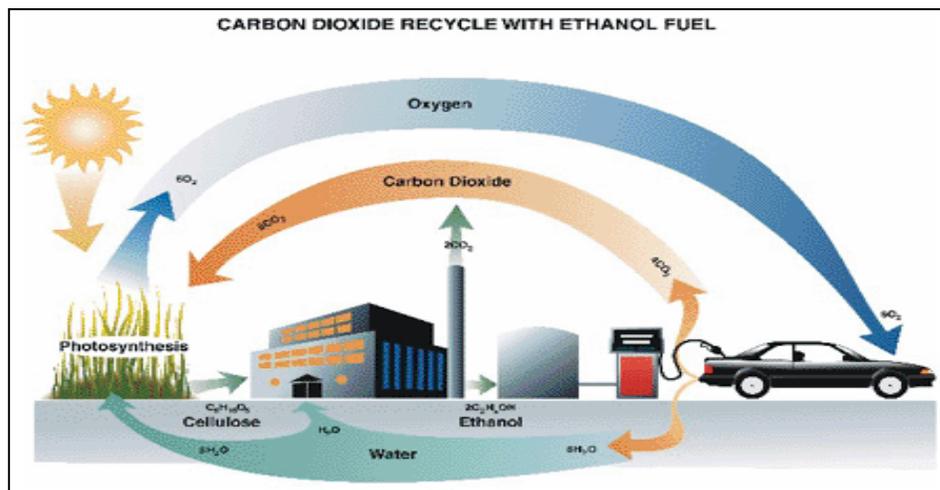
2 Ragauskas, A. *et al.* 2006.

3 Ragauskas, A. *et al.* 2006.

energéticas alternativas. Es por ésto que se están haciendo grandes esfuerzos en el área de la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías para la producción de biocombustibles, los cuales servirían de transición al uso del petróleo y además tendrían características más amigables con el medio ambiente, tales como disminuir en gran medida la emisión de dióxido de carbono en el sistema, tratamiento de los residuos en forma responsable, etc. De hecho, se estima que la demanda de energía crecerá a nivel mundial más de un 50% para el 2025, la cual será producida mayoritariamente por naciones con un acelerado crecimiento de sus economías. Claramente este crecimiento en la demanda de energía no podrá ser satisfecho por el recurso finito y escaso del petróleo, por lo cual surge gran interés por los biocombustibles, los cuales podrán ayudar a suplir esta demanda<sup>4</sup>.

Los biocombustibles, a diferencia de los combustibles fósiles, emiten menor cantidad de dióxido de carbono en el ciclo de vida completo, ya que éstos producen la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que fijan las plantas en el proceso de la fotosíntesis. Con ésto, los biocombustibles cierran un ciclo energético, contaminando considerablemente menos que el petróleo. Este ciclo energético (o ciclo de vida) se puede apreciar en la Figura 1.

Figura 1: Ciclo del dióxido de carbono con etanol



Fuente: [www.deugarte.com](http://www.deugarte.com)

Al analizar las ventajas que poseen los biocombustibles frente a los combustibles tradicionales, se puede mencionar que éstos no dañan el medioambiente por emisiones de dióxido de carbono, son renovables, disminuyen la dependencia de los países extractores de petróleo, producen nuevos puestos de trabajo, aumentan el desarrollo de la economía en zonas rurales, desarrollo del área científica, etc. En resumen los biocombustibles poseen grandes ventajas medioambientales, económicas y sociales<sup>5</sup>.

4 Ragauskas, A. *et al.* 2006

5 Ventajas, disponible en [www.biocombustibles.cl](http://www.biocombustibles.cl)

Muchas naciones han incluido en sus leyes la obligatoriedad de utilizar biocombustibles dentro de sus fuentes energéticas, alineándose así con el protocolo de Kyoto<sup>6</sup>, el cual se refiere a los cambios climáticos producidos por la contaminación. Con ésto se pretende reducir paulatinamente la utilización de los combustibles fósiles, para lo cual las naciones del mundo han lanzado políticas de incentivos para el desarrollo y consumo de las ERNC. En Chile todavía no hay una ley aprobada al respecto, pero se está trabajando para que dentro de los próximos años (2010-2012) ésta sea una realidad<sup>7</sup>.

Es importante apreciar que el etanol es un biocombustible muy demandado por el área del transporte; es usado como complemento de la gasolina y utilizado en países como Estados Unidos, Alemania y Brasil en forma masiva<sup>8</sup>. El bioetanol es un alcohol etílico, producido a partir de la fermentación de los azúcares que provienen de la sacarosa, almidón y la celulosa de productos vegetales<sup>9</sup>.

Hoy en día los países con mayores regulaciones y producción de bioetanol en el mundo son Brasil, a partir de la caña de azúcar y Estados Unidos, a partir del maíz. Se utilizan mezclas de hasta 10% de etanol, sin afectar el buen funcionamiento de motores con combustión interna y un 85% con motores modificados (E85), alcanzando inclusive el uso de etanol puro.

Actualmente el bioetanol producido es de primera generación (a partir de productos para la alimentación humana y/o animal- tales como maíz, trigo y caña de azúcar-), lo cual trae consigo una serie de conflictos de precios a nivel mundial<sup>10</sup>. El bioetanol de primera generación tuvo gran auge, debido a las características que este poseía, pero las cuales fueron contrastando con las alzas de precio que éste producía y los debates que esto provocaba a nivel mundial. Es por ésto que se está estudiando y desarrollando la producción de bioetanol de segunda generación<sup>11</sup>, el cual proviene de residuos lignocelulósicos (desechos agrícolas, forestales, municipales, cultivos energéticos, etc.) que no acarrear los conflictos asociados a los precios de los productos alimenticios. Claro ejemplo de estos esfuerzos, son las plantas pilotos que se encuentran en Suecia, Estados Unidos (NREL<sup>12</sup>) y Brasil, las cuales están investigando la producción de etanol de segunda generación. Estos centros de investigación y plantas, buscan la necesidad de producir biocombustibles a través del concepto de biorefinería. Con esto se está intentando producir biocombustibles y biomateriales a partir de material lignocelulosico, con lo cual se produciría un gran cambio económico e industrial en el rubro de las fuentes energéticas. Esto debido a que se estaría produciendo un combustible con bajo niveles contaminantes, a un precio razonable e integrando otros subproductos, los cuales aumentarían la rentabilidad de la industria<sup>13</sup>.

Al analizar datos referentes al precio de comercialización del bioetanol de segunda generación con respecto al precio del petróleo, se puede concluir que el precio del bioetanol no alcanza a ser competitivo si es que se intenta implementar una planta exclusivamente para la producción de

---

6 NU. Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1998

7 CNE, Disponible en [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

8 Chaves, M., 2004.

9 Worldwatch Institute. 2007.

10 Pérez, C., Chaves, M., Galperin, C., 2007.

11 Chaves, M., 2004.

12 NREL, 2000.

13 Ragauskas, A *et al.* 2006.

bioetanol<sup>14</sup>. Es por esto que es de suma importancia buscar productos derivados de la biorefinería, los cuales permiten aumentar los ingresos y así lograr obtener precios competitivos en el mercado<sup>15</sup>. El paradigma existente en la actualidad, es el de producir exclusivamente biocombustibles y los desechos asociados a la producción, utilizarlos como fuente de energía y no como posibles co-productos. Hoy en día este paradigma está siendo derrocado, en que el concepto de biorefinería toma gran interés y en el cual los desechos asociados son procesados, para así obtener co-productos que tengan un valor comercial, logrando así mayor rentabilidad. Grandes esfuerzos se esbozan en países como Brasil, Estados Unidos y Alemania, en donde existen plantas pilotos que producen bioetanol y además co-productos proveniente de biorefinería<sup>16</sup>.

Cabe mencionar que en este estudio, la biorefinería hará mención a una planta de producción de bioetanol y co-productos provenientes de materiales lignocelulosico, bajo ciertos criterios y/o aspectos que incidan en el proceso, tales como la materia prima y los co-productos seleccionados. Con ésto se intentará ver la rentabilidad de un proyecto de esta envergadura, contrastando ésta con las ya existentes.

## **1.2. OBJETIVOS**

A continuación se enumerarán tanto el objetivo general que pretende lograr esta memoria, como los objetivos específicos, los cuales contribuyen a lograr el objetivo general.

### **1.2.1. Objetivo General**

Realizar un estudio exploratorio<sup>17</sup>, tanto técnico como económico, para la producción de bioetanol y co-productos de biorefinería, a partir de rastrojos de maíz.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar las regiones favorables para la instalación de una planta de producción de bioetanol, en donde se toma en cuenta la materia prima disponible y su caracterización.
- Estudiar la logística de transporte asociada a la recolección de los residuos agrícolas, para determinar la localización de la planta.
- Identificar los productos derivados de biorefinería<sup>18</sup>, analizando sus características y atractivo comercial, con el fin de acotar estos productos para una posterior selección final.
- Seleccionar de los co-productos derivados de biorefinería.

---

14 McAloon, A., *et al*, 2000.

15 Cuzen J., 2008.

16 Kamm, B, Kamm, M, 2004.

17 Ver definiciones

18 Ver Anexo 1

- Identificar un proceso de generación de los productos secundarios seleccionados, analizando posibles variables.
- Realizar el diseño conceptual de una planta de biorefinería, con el fin de precisar los procesos involucrados en la generación de bioetanol y los productos derivados de la biorefinería.
- Realizar un estudio de prefactibilidad económica, el cual considere la instalación y funcionamiento de la planta conceptual de biorefinería, analizando la rentabilidad, basándose en índices como VPN, TIR y estudios de sensibilidad.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN

Llevar a cabo un estudio exploratorio de energías renovables y sustentables, es hoy en día un tema de suma importancia. Ésto es debido a que la mayor fuente de energía existente, el petróleo, posee dos problemas fundamentales: se estaría agotando en el mediano plazo y su uso es muy nocivo para el planeta. Ésto está generando graves problemas al medio ambiente, lo cual necesita una pronta solución. Por ésto es necesario realizar estudios para ver la factibilidad técnica y económica de tener nuevos tipos de energías, las cuales sean rentables y a su vez no sean nocivos con el medio ambiente. Estas nuevas fuentes energéticas serían las energías renovables no convencionales, tales como la energía solar, la energía proveniente del hidrógeno y los biocombustibles, las cuales permitirían suplir los combustibles fósiles y sus falencias.

Dentro de los biocombustibles podemos encontrar el biodiesel, biogás y bioetanol (de primera, segunda e inclusive tercera generación<sup>19</sup>), los cuales están liderando la carrera para reemplazar parcialmente a los combustibles fósiles. El bioetanol, tanto en Chile como en el mundo entero, posee ciertas ventajas con respecto a los demás biocombustibles, debido a la abundante cantidad de materia prima, el desarrollo de la tecnología asociada a la producción y a la compatibilidad con los motores existentes. Es por ésto que es necesaria la producción de bioetanol como un combustible intermediario entre los combustibles fósiles y la energía proveniente del hidrógeno<sup>20</sup>, para así tener en el corto plazo<sup>21</sup> energía renovable, ecológica y rentable<sup>22</sup>.

Para tal fin, hoy en el mundo existe una serie de instituciones y entidades dedicadas al desarrollo de este biocombustible, las cuales están realizando esfuerzos importantes para la producción industrial de bioetanol. En el ámbito mundial, existen entidades como la NREL (National Renewable Energy Laboratory), la GIT (Global Information Technology), ambas de Estados Unidos, dedicadas al tema. En Chile existen proyectos en desarrollo, tales como GTZ<sup>23</sup> y Consorcio Enercel, el cual está buscando recursos para iniciar investigaciones más complejas, las cuales intenten ahondar en temas de biorefinería a partir de rastrojo de maíz, algo que no está probado en plantas industriales a nivel mundial.

---

19 Biocombustible que utilizan materia prima la cual no incida en precios de alimentos y no utilice terrenos de siembra

20 Desarrollo previsto en unos 40 a 50 años más.

21 Corto plazo de 10 años.

22 Ragauskas, A. *et al.* 2006.

23 Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), traducido como "Sociedad para la Cooperación Técnica"

## **1.4. METODOLOGÍA**

El trabajo consiste en un estudio exploratorio, debido a que a nivel mundial no hay modelos probados de plantas industriales que produzcan bioetanol a partir de rastrojo de maíz. Toda la información utilizada en este proyecto proviene de fuentes actuales y estudios realizados a nivel mundial referente al tema, los cuales se han obtenido a través de bibliografía de internet, bibliotecas, reuniones, contactos externos e información recibida vía correo electrónico.

Se asistió a seminarios, conferencias y charlas<sup>24</sup> con el fin de obtener gran cantidad de información respecto al proyecto y a su vez conseguir una amplia red de contactos, con la cual se consiguió la información necesaria para la realización del estudio.

Es por ésto que la metodología a utilizar en la realización de este proyecto, es la de recopilar información respecto a proyectos similares o afines como primer paso. Luego, dicha información se analizó y catalogó, para así desarrollar un estudio exploratorio técnico y económico para la producción de bioetanol y co-productos de biorefinería, a partir de rastrojo de maíz.

Con ésto se realizaron estudios técnicos específicos referentes al diseño conceptual de la planta de biorefinería y posteriormente un estudio económico, con el cual se evaluó la viabilidad del proyecto, a través del Valor Presente Neto (VPN) y la TIR del proyecto, realizando finalmente un análisis de sensibilidad de éste.

## **1.5. ALCANCES**

El estudio exploratorio permitirá lograr ahondar en temas poco conocidos referentes a los biocombustibles. Además aporta un nuevo estudio en la materia, siendo útil para posteriores investigaciones y desarrollo de nuevas tecnologías.

Se investigó la disponibilidad de residuos agrícolas a nivel nacional, analizando su localización, características propias del material y su costo, lo cual permitió determinar la ubicación de la planta, logrando así encontrar la localización idónea de ésta.

Debido a que es un estudio exploratorio, se realizó una estimación del costo de inversión y operación de la planta en Chile a través de factores de escalamiento o índices de aproximación, en donde se incluyó la inversión inicial, los costos fijos y los costos variables. Con toda esta información se construyó un flujo de caja de la planta y se determinó la prefactibilidad económica del proyecto. Es por esto, que los resultados obtenidos en este estudio exploratorio, tendrá un margen de error entre el 30 a 50 %.

Sólo se consideró como materia prima los rastrojos de maíz y no la posibilidad de tener plantaciones dedicadas en forma exclusiva para la producción del combustible. Ésto debido a que el proyecto no estipula estudiar una posible integración vertical en el proceso productivo, específicamente en la obtención de la materia prima.

---

<sup>24</sup> Ver Anexo 2

El estudio no incluyó la cadena de operación posterior a la producción de bioetanol y los productos derivados de la biorefinería, ya que no está contemplada su realización en éste estudio. Esto debido a que la logística de transporte de los productos necesitaría un estudio de mayor profundidad, el cual no podrá ser abarcado.

No se analizó los impactos sociales y ambientales que envuelven al proyecto, debido a que es un proyecto pionero, el cual posee muchas etapas por estudiar aún, las cuales no podrán ser abarcadas por éste estudio por un tema de tiempo disponible.

No se incluyó un estudio de impacto ambiental (EIA), debido a que la tecnología del proyecto no está definida en forma completa, por lo tanto no se podrá conocer el impacto real que éste pueda producir en el ambiente.

La biotecnología tuvo un rol fundamental en el estudio y desarrollo del proyecto, ya que otorgó técnicas y productos modificados genéticamente, para la implementación del proyecto. Ésto debido a que entregó herramientas y productos (tales como enzimas específicas, que son fundamentales para el proceso), las cuales tuvieron suma importancia para conocer la eficiencia del proceso y globalmente en el proyecto en sí. La información proporcionada por el Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, tanto por la docencia o contactos ligados a cada tema en específico, fue de gran importancia para el desarrollo de este estudio. Esto determina las fronteras biotecnológicas del estudio, ya que la información que se maneja, mayoritariamente provinieron de estas fuentes.

## 2. CARACTERISTICAS DEL ETANOL CELULÓSICO

### 2.1. PROPIEDADES<sup>25</sup>

El bioetanol es un combustible que posee un buen rendimiento, aproximadamente un 70% del que posee la gasolina en vehículos de combustión interna<sup>26</sup>. Al estar en estado líquido, su compatibilidad con la infraestructura de almacenamiento de gasolina existente es idónea. Ésto permite su acumulación y transporte, sin tener la necesidad de realizar una reestructuración a las instalaciones actuales.

En la Tabla 1 se pueden apreciar algunas propiedades del etanol con respecto a la gasolina.

Tabla 1: Propiedades del etanol en relación con la gasolina

Propiedades del combustible	Valor de etanol relativo a la gasolina	Impacto cualitativo
Densidad energética	0,65 - 0,69	Menos Km/lt.
Calor de Vaporización	2,3	Tanques más largos y vehículos más pesados para algunos rangos
		Entra una mayor masa de aire caliente al cilindro
		Aumento de poder en el motor
		Disminuye el congelamiento del sistema
Temperatura de llama baja	0,976	Menor eficiencia en un motor optimizado
Volumen relativo de combustión de productos	1,07	Aumenta el trabajo disponible de la expansión del gas
Numero de octanos <sup>27</sup>	1,15	Permite el aumento de la razón de compresión y por lo tanto mayor potencia y eficiencia

Fuente: Lynd. 1996.

La densidad energética del etanol fluctúa entre un 65% a 69% con respecto a la gasolina, en cuanto a distancia recorrida por volumen de combustible (Km/litro) se refiere. Esto se aprecia en el contenido energético que posee cada combustible, siendo el del etanol de 22.200 BTU/<sup>28</sup>litro y el de la gasolina de 33.600 BTU/litro, pero al realizar mezclas con gasolinas para vehículos corrientes (motor combustión interna), la disminución de energía no es significativa en este caso particular, siendo de un 1,5%. Esto a su vez no implica menor rendimiento, ya que el octanaje del etanol es de 113 lo cual aumenta la compresión del motor, mejorando el rendimiento. Además el

25 DOE. 2009.

26 Patrouilleau, R *et al.* 2007.

27 Según norma RON

28 BTU: Unidad de energía Inglesa.

etanol al tener una mayor temperatura de vaporización y menor volatilidad, implica mejoras en el enfriamiento del motor de un vehículo en marcha<sup>29</sup>.

## 2.2. VENTAJAS<sup>30</sup>

- Un automóvil que utiliza etanol proveniente de material celulósico, genera 30% menos de anhídrido carbónico que uno que utiliza gasolina. Ésto es debido a que la molécula de oxígeno se une en menor medida a la de monóxido de carbono en la combustión.<sup>31</sup> El etanol lignocelulósico reduce de forma importante las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)<sup>32</sup> en comparación con la gasolina. El E10, mezcla que posee un 10% de etanol, reduce en un 20 a 30% las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)<sup>33</sup> con respecto a la gasolina pura.
- El etanol posee un buen desempeño en un vehículo corriente, entregando mayor torque, buena potencia, velocidad y aceleración<sup>34</sup>.
- Menor costo de los rastrojos de maíz (biomasa lignocelulósica) en comparación a los alimentos (maíz, caña de azúcar, etc.) como materia prima. Ésto es de suma importancia, ya que en el caso del etanol de primera generación, la materia prima corresponde al 50% del costo de producción<sup>35</sup>.
- Al mezclar la gasolina con etanol, el octanaje de la mezcla aumenta, debido al mayor octanaje del etanol. Ésto se puede apreciar en la Tabla 1, en donde el número de octanos en el etanol es 15% mayor que el de la gasolina.

## 2.3. DESVENTAJAS

- La tecnología para producir bioetanol lignocelulósico a partir de rastrojo de maíz aún no se encuentra comercialmente disponible, ya que los organismos o instituciones que desarrollan esta tecnología guardan celosamente tal información.
- En comparación con otras fuentes energéticas renovables no contaminantes, tales como la del hidrógeno y la solar, la producida por etanol libera más emisiones de CO<sub>2</sub> en su totalidad (a pesar de que éstas son bajas, las del hidrógeno o la solar son aun más bajas). Sin embargo, el desarrollo de estas fuentes energéticas estarán disponibles en el largo plazo a diferencia de los biocombustibles, que están siendo desarrollados y disponibles para su uso. Cabe mencionar que en comparación con el petróleo, el bioetanol emite menos CO<sub>2</sub> en el ciclo completo de éste combustible, siendo ésta una ventaja con respecto al petróleo.

---

29 Consulta al Sr. Patricio Cavieres Korn, Julio 2009. Presidente de la comisión de agroenergía del colegio de ingenieros agrónomos.

30 Dietrich, J. *et al*, 2006.

31 Khosla, V: 2005.

32 Los gases de efecto invernadero son dióxido de carbono, metano, vapor de agua, óxido de nitrógeno y ozono.

33 OCDE, 2006.

34 Khosla, V: 2005.

35 OCDE, 2006.

### **3. ESTUDIO DE MERCADO**

#### **3.1. USOS DEL BIOETANOL**

Los principales usos del bioetanol son los siguientes<sup>36</sup>:

- Bebidas alcohólicas.
- Solvente químico e industrial.
- Industrias cosméticas y afines.
- Intermediario para la producción de etileno, acetaldehído, ácido acético, ésteres etílicos, e H<sub>2</sub>, entre otros.
- En farmacias, hospitales y clínicas como agente desinfectante.
- Aditivo en combustible de motores de combustión interna.
- Como combustible puro en motores.

Los dos últimos puntos tienen gran interés para efectos de este trabajo, poniendo especial énfasis en la utilización del bioetanol como mezcla.

#### **3.2. ANÁLISIS DEL ENTORNO INTERNACIONAL**

##### **3.2.1. Requerimientos Energéticos**

Las necesidades energéticas del mundo presentan un aumento sostenido en las últimas décadas<sup>37</sup>. La mayoría de los analistas coinciden en que el desarrollo de los países está ligado a un aumento en su demanda de energía. En el Gráfico 1 se muestra la demanda mundial de los distintos tipos de energía primaria y su proyección para 20 años más.

Se observa que el petróleo es la fuente energética más utilizada en los últimos 30 años. Así mismo, las fuentes de energía renovables ocupan un papel cada vez más importante, siendo los biocombustibles los que más destacan en este ámbito. Se distinguen en el Gráfico 1 como fuentes renovables la hídrica y otras renovables, además de las formas de energía eólica, maremotriz y solar, las que también incluyen a los biocombustibles.

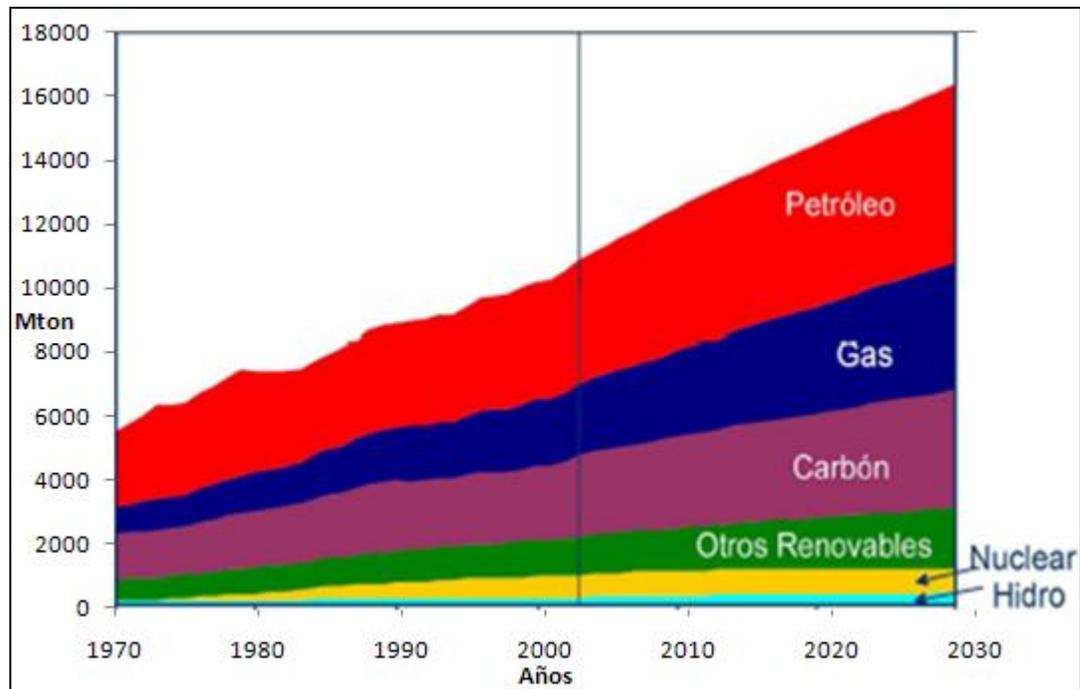
Es claro notar en el Gráfico 1 que el petróleo no podrá seguir satisfaciendo la demanda energética como lo han venido haciendo por más de 30 años, debido a que éste estaría agotándose y por lo tanto es necesario encontrar fuentes que complementen o sustituyan al petróleo en un mediano plazo.

---

<sup>36</sup> Vilajuana J., 2005.

<sup>37</sup> Ragauskas, A. *et al.* 2006.

Gráfico 1: Demanda mundial de energía primaria



Fuente: International Energy Agency<sup>38</sup>

### 3.2.2. El Petróleo en el Mundo

El mundo consume alrededor de 30 mil millones de barriles de petróleo al año<sup>39</sup>. Se estima que las reservas globales son de alrededor de 1 billón<sup>40</sup> de barriles (incluyendo potenciales nuevos descubrimientos). El consumo de petróleo aumentará de 85,2 millones de barriles/día en 2005 a 118 millones al año 2030<sup>41</sup>.

Las fuentes de fácil acceso al crudo ligero se encuentran casi agotadas y en el futuro el mundo dependerá del crudo más pesado y del uso de gasolinas alternativas. En el Gráfico 2, se aprecia visiblemente el aumento en la demanda del petróleo como fuente energética mundial, pero a su vez la oferta irá disminuyendo debido a las escasas fuentes de extracción.

Es por esto que es de suma importancia encontrar fuentes energéticas que suplan paulatinamente al petróleo y que a su vez no contaminen al medio ambiente y sean renovables. Aquí es donde surgen las ERNC (Energías Renovables No Convencionales), las cuales podrán reemplazar gradualmente el uso del petróleo y así abastecer las necesidades crecientes de energía a nivel mundial.

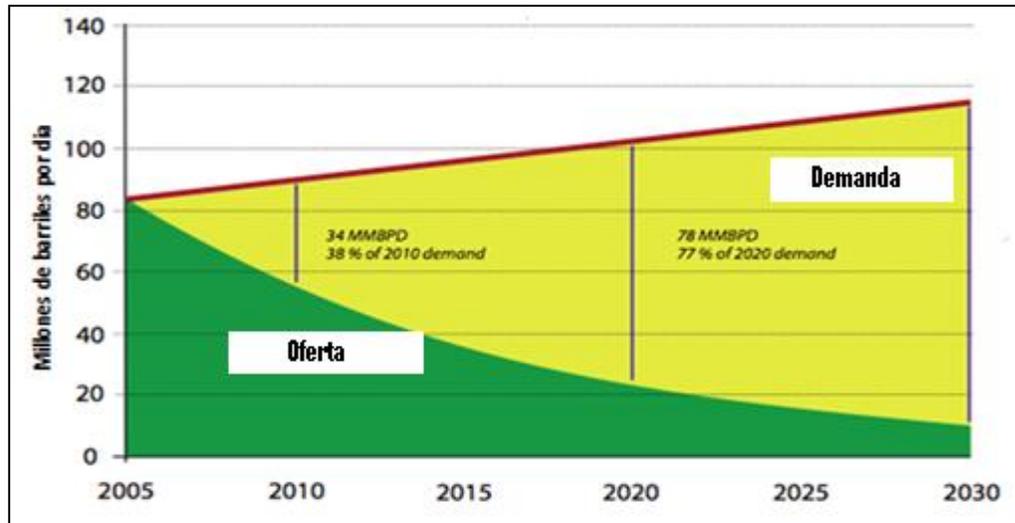
38 [www.iea.org](http://www.iea.org)

39 [www.iea.org](http://www.iea.org)

40 Billon = 10<sup>9</sup>

41 Según la IEA (International Energy Agency)

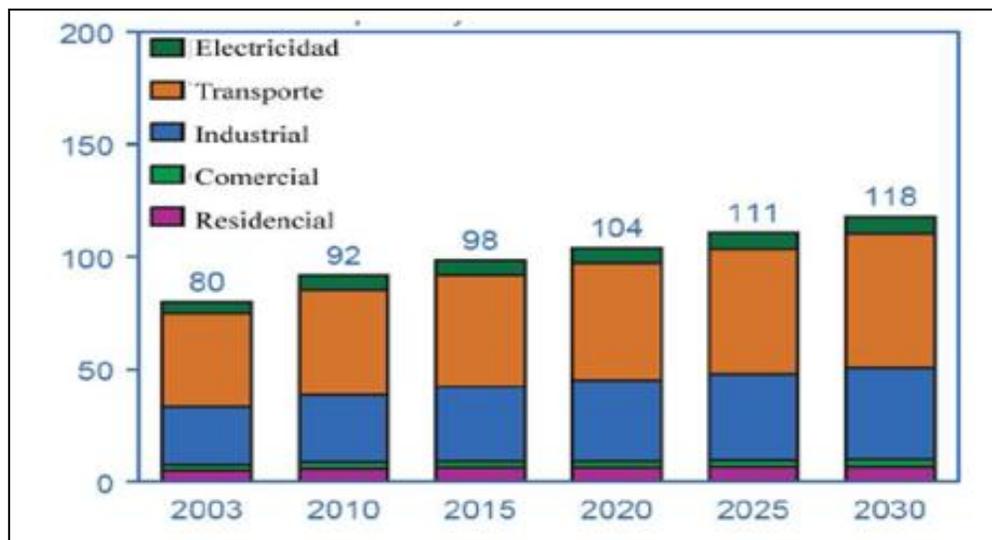
Gráfico 2: Demanda global proyectada de petróleo



Fuente: IEA, Revisión de energía mundial, 2006.

Si se desglosa por sectores a los consumidores de petróleo en el mundo, se concluye que el transporte es el rubro que más solicita este insumo y a su vez el que tendrá mayor aumento en la demanda esperada. En el Gráfico 3 se observa la demanda mundial de crudo y su consumo por sector.

Gráfico 3: Consumo mundial de petróleo por sector (millones de barriles por día)<sup>42</sup>



Fuente: Energy Information Administration/International Energy Outlook

<sup>42</sup> Los números sobre las barras representan el consumo global

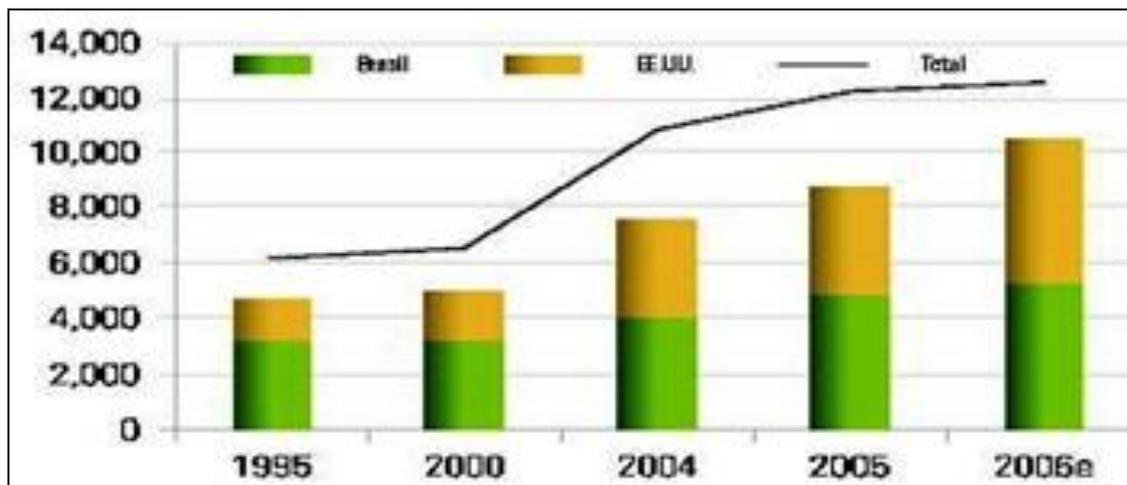
### 3.2.3. Etanol en el Mundo

La obtención de etanol por fermentación de azúcares es el método clásico para producir bebidas alcohólicas. Sin embargo, se hace cada vez más frecuente la generación del alcohol por este método para su uso como biocombustible. La producción en el mundo de este *commodity* ha evolucionado positivamente en los últimos años. Su producción creció un 8% en 2005, alcanzando 13.000 millones de galones.

Los principales productores de este biocombustible en el mundo son Brasil y Estados Unidos, ambos con un 33% del mercado mundial en el 2006. Brasil es conocido por utilizar como materia prima la caña de azúcar, mientras que Estados Unidos enfoca sus procesos a la utilización del maíz.

En el Gráfico 4 se aprecia el crecimiento de la producción del etanol y la participación en la producción de Estados Unidos y Brasil.

Gráfico 4: Producción mundial de etanol<sup>43</sup>



Fuente: [www.oleaginosas.org](http://www.oleaginosas.org)

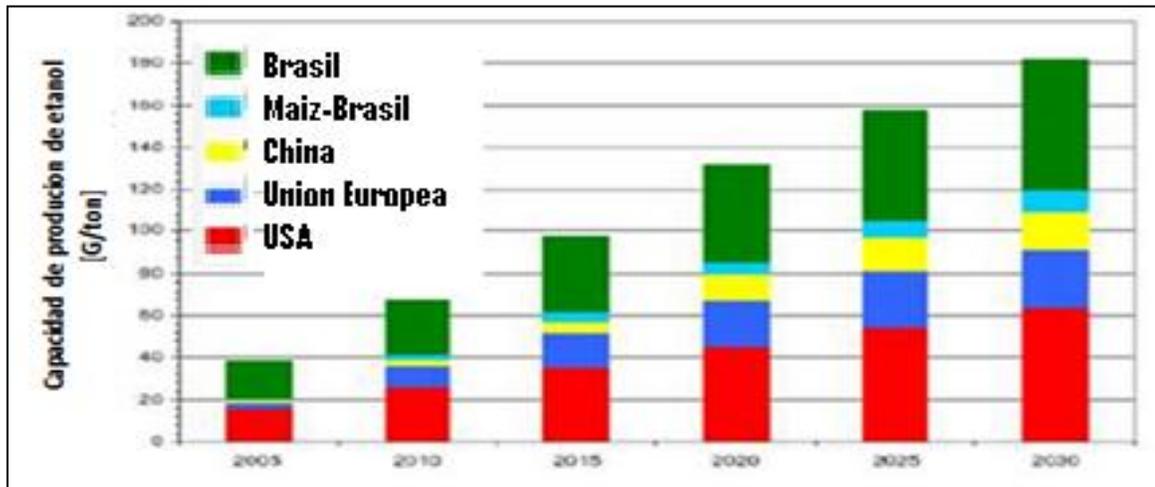
En el Gráfico 5 se aprecia una proyección de los máximos productores de etanol hasta el 2030, en donde se aprecia la producción estimada de etanol hasta el 2030 de cada país, incluyendo Brasil, utilizando como materia prima el maíz.

Además, al realizar un análisis del consumo y productividad mundial del etanol, se observa el gran auge que este combustible posee. En el Gráfico 6 se aprecia el consumo de bioetanol y otros biocombustibles en la Unión Europea.

El uso de bioetanol se está desarrollando favorablemente a nivel mundial. Brasil, Estados Unidos, muchos países europeos, y un creciente número de países en el sudeste asiático están invirtiendo

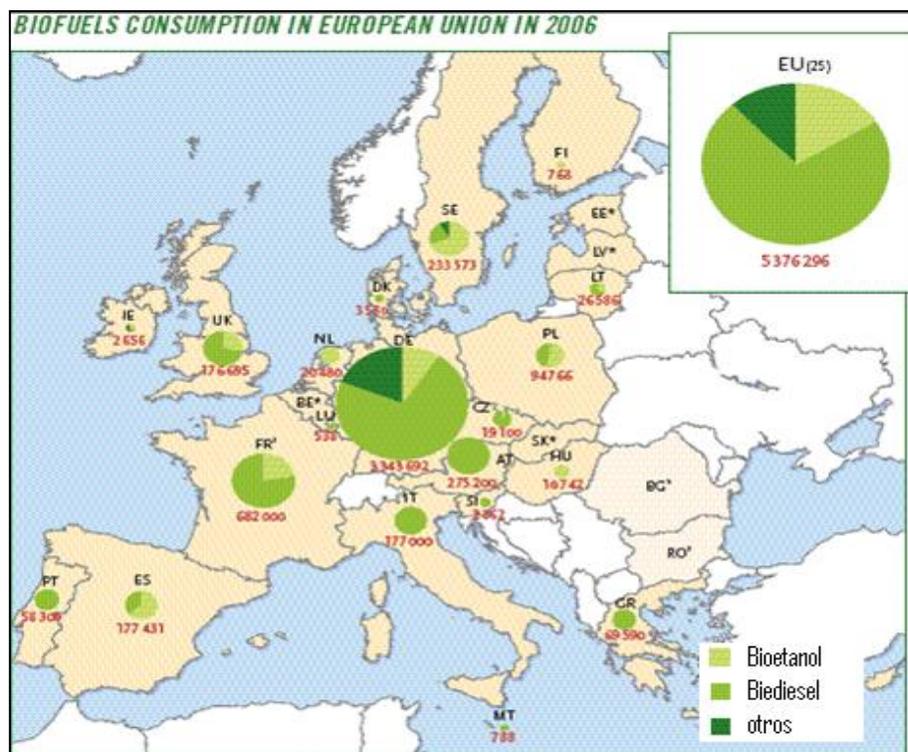
en los biocombustibles, incluyendo bioetanol. Brasil y Estados Unidos son los más grandes productores de bioetanol en el mundo, a estos gigantes se suma China, que también ha lanzado un programa con el propósito de usar bioetanol como combustible en el futuro.

Gráfico 5: Producción estimada de etanol hasta 2030 y principales productores



Fuente: IEA. Revisión de combustibles renovables.

Gráfico 6: Biocombustibles en el mundo en el 2006



Fuente: Biocombustibles líquidos y su implementación en Chile, 2007.

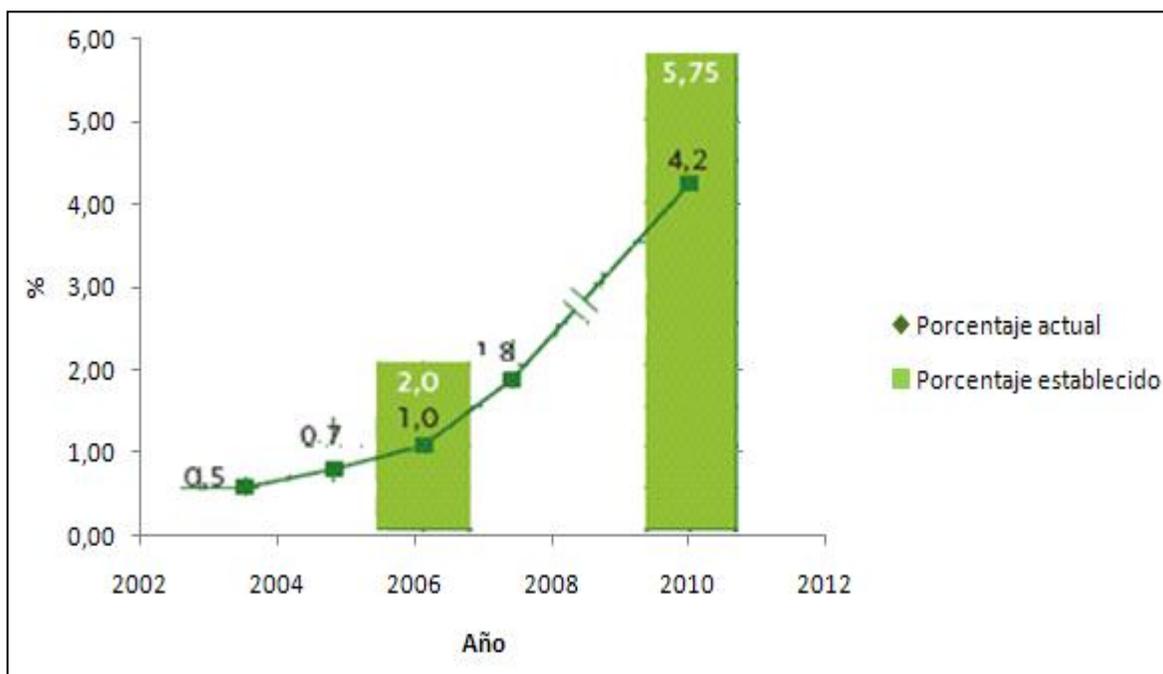
El consumo de bioetanol en Brasil se ha comportado de manera estable en los últimos años, supliendo el 41% de todos los vehículos a motor (no diesel). Mientras la Unión Europea (UE) incrementó en el año 2005 la producción de bioetanol en 70%, aún es bajo en términos relativos con Brasil y Estados Unidos.

En el año 2006, el consumo de bioetanol, y otros combustibles renovables representaron el 1,8% de la energía para transporte en la UE, cifra que aumentó desde el 1% de 2005. Este 1% representaba para los 25 países miembros de la UE, el consumo de 3 millones de toneladas equivalentes de petróleo (EMTP), subiendo a 5,38 EMTP para 2006<sup>44</sup>.

Alemania fue el líder de la Unión Europea, con un consumo de 3,3 millones de toneladas de bioetanol, mientras Francia con 0,68 millones de toneladas fue el segundo mayor consumidor. El consumo de bioetanol en Alemania representó el 9% del uso de combustibles.

El Gráfico 7 muestra el crecimiento de producción de etanol en la Unión Europea y los porcentajes establecidos para cada año, por los países pertenecientes a la Unión Europea.

Gráfico 7: Porcentajes establecidos y actual de producción de etanol en la Unión Europea



Fuente: EurObsery ER, 2007.

A excepción de Brasil y Colombia, Latinoamérica no ha realizado grandes avances en el uso de bioetanol, a pesar de su gran potencial productivo. Sin embargo, se vaticina un gran auge en el desarrollo de este biocombustible, tanto a nivel industrial como legislativo.

44 Hamelinck, C. *et al.* 2003.

### 3.2.4. Plantas de Bioetanol

En la actualidad existen plantas productoras de bioetanol de segunda generación operando en el mundo. La primera planta que produjo bioetanol de celulosa de segunda generación a escala comercial fue a partir de paja de trigo. La empresa que llevó a cabo la inversión fue IOGEN Corporation, de Canadá<sup>45</sup>, la cual posee una relación de entre 250-300 litros de etanol a partir de 1 tonelada de paja de trigo, lo que equivale a una eficiencia de 0,27 m<sup>3</sup> por tonelada de paja de trigo.

Para producir bioetanol a partir de material lignocelulósico existen plantas piloto que utilizan diferentes tecnologías. Algunas de estas plantas son<sup>46 47</sup>:

- Bioengineering Resources Inc. (BRI), Arkansas, EEUU.
- EthanolTechnik (ETEK) en Ornskoldsvik, Suecia.
- Iogen, Canadá<sup>48</sup>.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL) del Department of Energy (DOE) en Colorado, EEUU.
- BC International, Louisiana, EEUU.
- Abengoa, Salamanca, España.

A continuación se enumerarán características de algunas de estas plantas:

#### Planta BRI:

Esta planta, que está ubicada en EE.UU. utiliza una tecnología que está completamente desarrollada. El proceso BRI gasifica cualquier material con más de 40% de carbono, el que es convertido a *syngas* y luego a bioetanol. Existe muy poca documentación de este proceso debido a que es una tecnología privada. Los costos tampoco están disponibles. Se espera que en el corto plazo se construya una planta comercial.

#### Planta Iogen:

La ventaja de esta planta canadiense es que ellos producen la enzima celulasa que permite la hidrólisis de celulosa. Fueron pioneros en la utilización de la tecnología de pretratamiento por explosión de vapor. La materia prima que utilizan son residuos agrícolas (ejemplo: trigo y maíz).

---

45 Iogen fue beneficiada con financiamiento por el Departamento de Energía (DOE) de EE.UU. Es en asociación con SHELL y GOLDMAN SACHS.

46 Goyal, G. *et al.* 2006.

47 Lynd, L. 1996.

48 Mabee, W. *et al.* 2006.

También han realizado pruebas con maderas duras, pero no con maderas blandas, debido a que consideran que cuentan con suficientes residuos agrícolas para producir etanol<sup>49</sup>.

#### Planta DOE:

La planta estadounidense produce etanol a partir de materiales celulósicos. Se utiliza para probar diferentes tecnologías de bioprocesos. La ruta principal es pretratamiento, hidrólisis y fermentación<sup>50</sup>. El proceso combina la hidrólisis y fermentación al mismo tiempo, tecnología que aún no está completamente desarrollada y se espera esté disponible en el mediano plazo<sup>51</sup>. La ventaja de utilizar esta tecnología es que no existe inhibición por producto en el proceso enzimático, ya que la glucosa no permite la hidrólisis y es fermentada a etanol inmediatamente.

#### Planta BCI:

La planta estadounidense BCI posee una exclusiva licencia mundial de la nueva tecnología que fermenta a etanol las azúcares de hexosas y pentosas. Esto es posible gracias a las modificaciones genéticas de la bacteria *E. coli*. Esta tecnología puede convertir cualquier biomasa celulósica en etanol<sup>52</sup>. No se tiene mayor información porque es tecnología privada.

Todas estas plantas servirán como ejemplos o modelos generales para el diseño conceptual de la planta en estudio, sirviendo como base para el diseño de ésta.

### **3.3. ANALISIS DEL MERCADO NACIONAL<sup>53</sup>**

Chile importó el 80% de la energía primaria, que consumió en el año 2006, con un 98% del petróleo crudo<sup>54</sup>, 92% del carbón y 74% del gas natural<sup>55</sup>. Ésto se puede apreciar en el Gráfico 8, en donde se segmenta la dependencia externa de la matriz energética por fuente energética.

Las categorías de energía primaria más recurrentes en nuestro país son petróleo crudo, gas natural, carbón, hidroelectricidad, leña y otros. En particular la hidroelectricidad equivale a un 8% del total de energía primaria consumida<sup>56</sup>.

Con respecto al petróleo, se ha visto un sostenido aumento en el porcentaje de petróleo importado. A fines del año 1997, el petróleo importado correspondía a un 94% del total del consumo, mientras que a fines del 2007 éste equivalía al 98% de las importaciones. Esto se puede apreciar en el Gráfico 9, donde se muestra la producción de petróleo en Chile, la cantidad importada y el consumo total de éste y su evolución en el tiempo.

Para el caso del bioetanol, este mercado todavía no existe. Sí existe la producción de tipo personal o “casera”, pero esta cantidad no alcanza para ser considerada dentro de un mercado

---

49 Sitio web: [www.iogen.ca](http://www.iogen.ca)

50 Fuente: NTNU. 2005.

51 Esta tecnología es conocida como SSCF. Fuente: HAMELINCK. 2003

52 Sitio web oficial de BCI: [www.bcintlcorp.com](http://www.bcintlcorp.com)

53 Ortega, R *et al.* 2007.

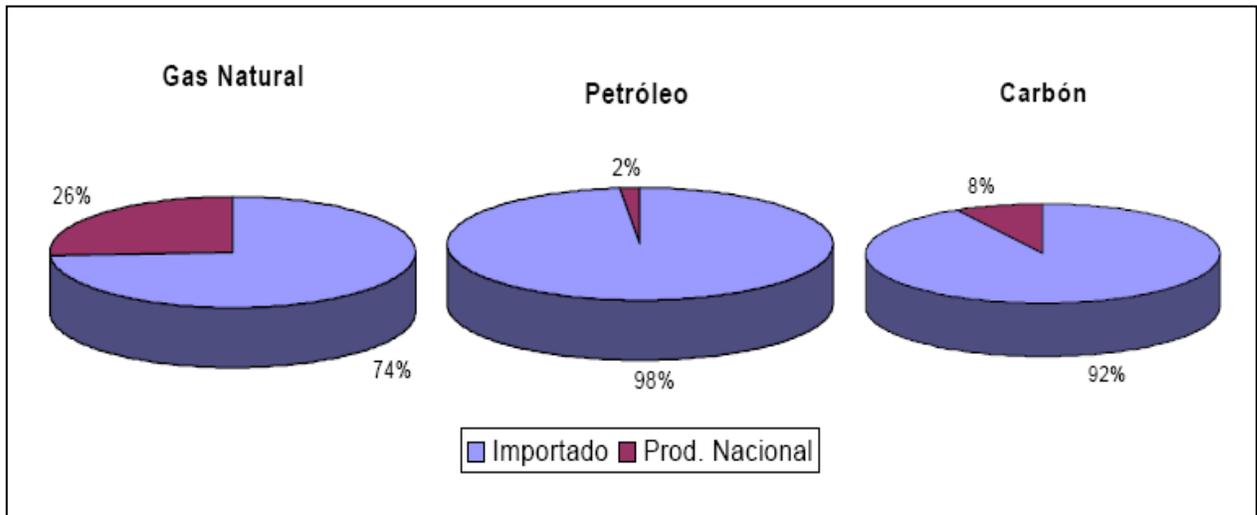
54 Precio crudo 2009: 65 euros el barril. Fuente OECD

55 Presentación matriz energética y proyecciones futuras, Marcelo Tokman, CNE, 2008.

56 Bioplanet. 2007.

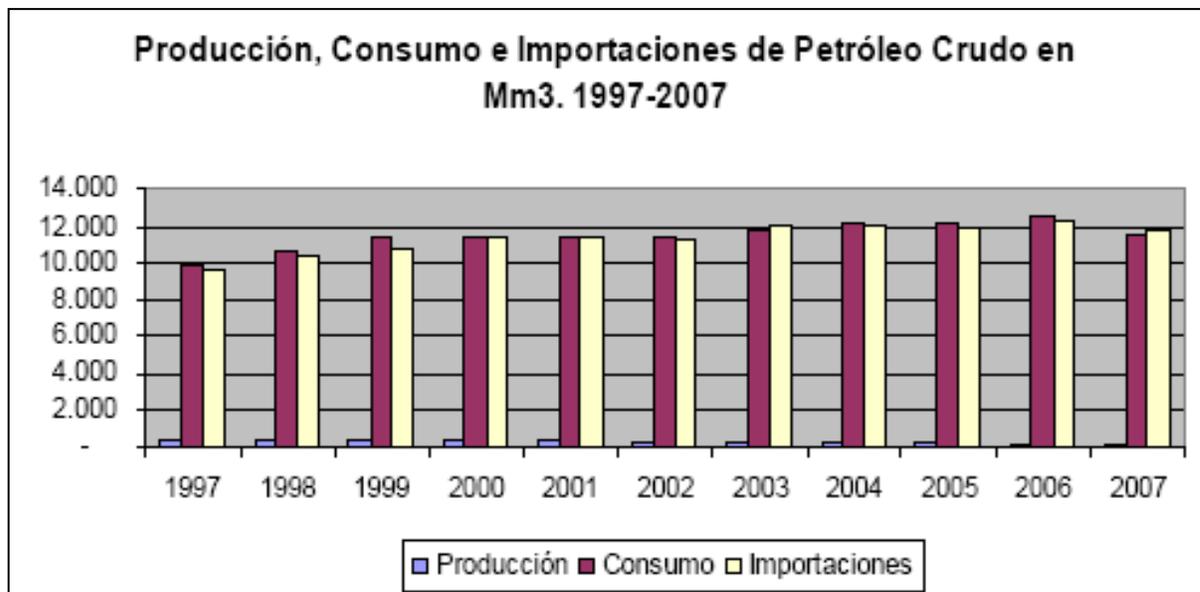
nacional. A pesar de lo anteriormente descrito, se augura un futuro prometedor para el mercado de este biocombustible, debido a la próxima promulgación de una ley respecto a biocombustibles que se está generando en Chile y la cual debiese entrar en vigencia en el corto plazo<sup>57</sup>.

Gráfico 8: Dependencia de matriz energética Chilena



Fuente: CNE

Gráfico 9: Producción, consumo e importaciones de petróleo crudo



Fuente: “La industria de petróleo en Chile”, 2009

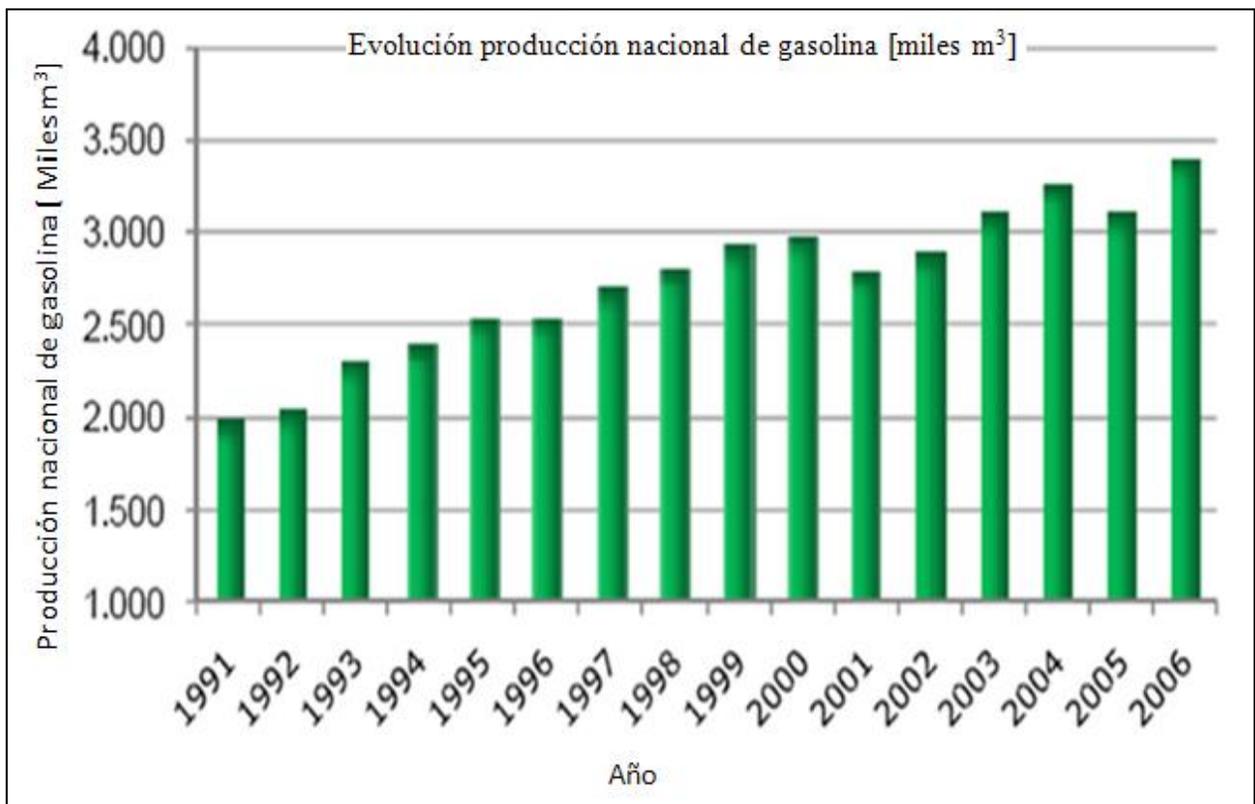
57 Ver Estudio legal, Capítulo 4.

### 3.3.1. Oferta

La oferta de combustibles derivados del petróleo en Chile tiene su origen en la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), empresa encargada de producir parcialmente y refinar el crudo y hacer llegar a los distribuidores los productos obtenidos<sup>58</sup>. En el Gráfico 10 se observa la producción nacional de gasolina en los últimos años.

La gasolina refinada por ENAP es de 93 y 97 octanos. La gasolina de 95 octanos que se vende en los puntos de servicio es producto de la mezcla de las dos primeras en proporciones iguales en el momento de inyectar el combustible al camión.

Gráfico 10: Evolución de la producción nacional de gasolina [miles m<sup>3</sup>]



Fuente: Balance CNE, ENAP.

Mientras ENAP es la empresa encargada de refinar el crudo importado, la distribución de los productos líquidos procesados queda, fundamentalmente, en manos de cuatro grandes competidores: COPEC, PETROBRAS, TERPEL y SHELL.

Para el caso del bioetanol, su oferta nacional es casi nula. Ésto se debe a que no existe una legislación atinente<sup>59</sup>, que motive la importación de este combustible o la producción por parte

<sup>58</sup> Gasolinas y coproductos de la refinería.

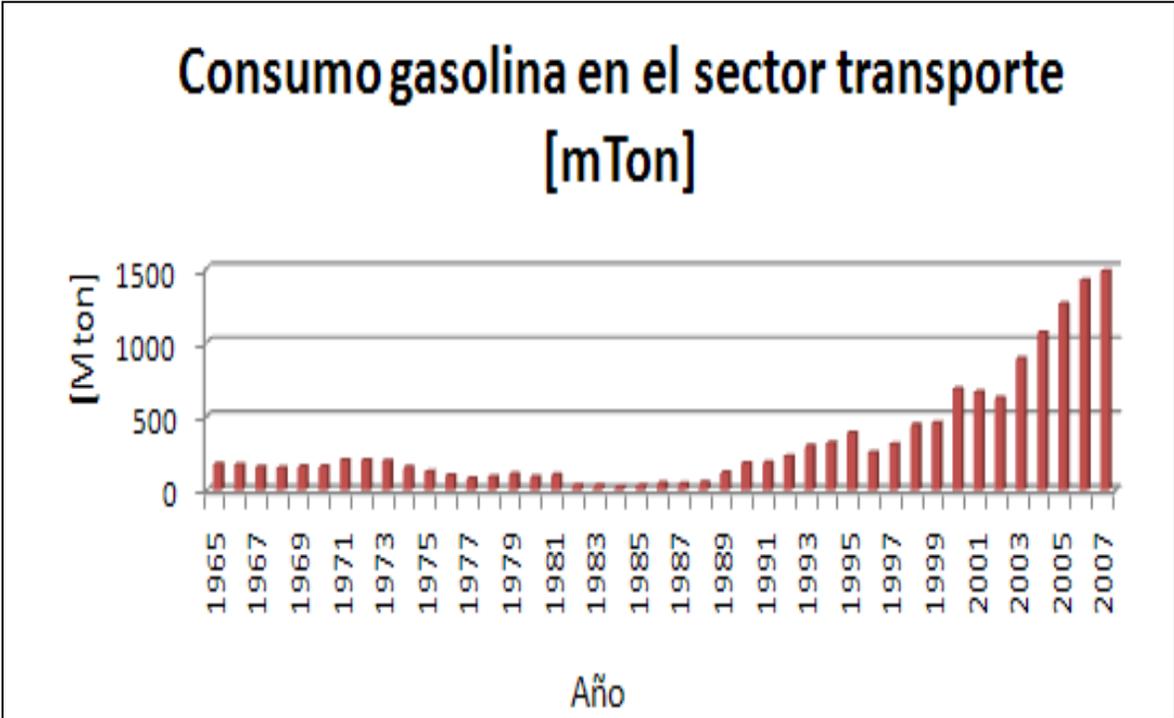
<sup>59</sup> Ver estudio legal, capítulo 4.

de la industria nacional. Pero como se analizará en el Capítulo 4, esta ley debiese de entrar en vigencia en un corto plazo logrando crear una oferta, ya sea por importación o producción nacional.

**3.3.2. Demanda Nacional**

Al igual que la tendencia mundial, en Chile el sector con mayores incrementos en su consumo energético, es el transporte. En este rubro las gasolinas y el diesel son los productos característicos. En el Gráfico 11 se observa el incremento de la demanda para este sector entre los años 1965 y 2007, con excepción de los años 1982 a 1988 debido a los problemas políticos existentes en Chile, los cuales disminuyeron el consumo en éste periodo<sup>60</sup>.

Gráfico 11: Consumo de gasolina en el sector transporte (miles de toneladas)



Fuente: CNE

Se puede apreciar que entre los años 2003 y 2007 hubo un 61% de incremento del uso de gasolinas en el sector transporte, mostrando así el crecimiento sostenido de este sector y el uso del combustible asociado a éste. Para el 2014, se estima que la demanda de gasolina en Chile superará ampliamente estas cifras, logrando aumentar hasta un 100% con respecto al 2003<sup>61</sup>.

60 CNE. [www.cne.cl](http://www.cne.cl)  
 61 CNE. [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

En Chile se introduciría el etanol al mercado comenzando con una mezcla de 5% de etanol y 95% de gasolina<sup>62</sup> (E5). Actualmente el máximo de oxígeno permitido en las gasolinas es 2% (m/m)<sup>63</sup>, lo que se alcanzaría con una mezcla de 5,7% de etanol con gasolina, norma estipulada por la ENAP.

Se puede estimar la demanda de etanol en Chile conociendo las proyecciones de la necesidad de gasolina para el 2010 en 3,3 millones de metros cúbicos<sup>64</sup>. Si se vendiera la mezcla E5, la demanda de etanol sería 5% de los 3,3 millones de m<sup>3</sup>, es decir, 165.000 m<sup>3</sup>. En la Tabla 2 se muestra como se calcula la demanda estimada de bioetanol en Chile.

Tabla 2: Demanda estimada de bioetanol

Demanda	
Demanda Gasolina 2010 [m <sup>3</sup> ]	3.300.000
5% bioetanol [m <sup>3</sup> ]	165.000

Fuente: Elaboración propia, basado en información de la CNE

Esta demanda está bajo el supuesto de que la utilización de E5 sea obligatoria. En Chile la gasolina se encuentra gravada con un impuesto específico y se calcula el precio de venta de una forma particular (Ver Anexo 7). El etanol no estaría gravado por este impuesto específico, que en enero del 2008 fue más del 30% del precio final de venta de la gasolina.

### 3.4. PRECIOS

#### 3.4.1. Precio Bioetanol

El precio de venta (FOB) del bioetanol es variable, generalmente está asociado al precio de venta del petróleo, el cual en el 2009 ha presentado un comportamiento promedio al alza (el cual ha tenido algunas caídas del precio de la gasolina). Esto se puede apreciar en el Gráfico 12, donde se muestra la variación del precio de la gasolina en el tiempo. Otro factor relevante es el costo de producción asociado, lo que dependerá mayoritariamente de la materia prima elegida y de las economías de escala de las plantas que generan el combustible.

Las estimaciones del costo de producción de bioetanol en Brasil son de cerca de 0,5 US\$/lt utilizando caña de azúcar como materia prima. Sin embargo, en EEUU, este biocombustible se produce del maíz, presentando costos de producción superiores a 0,60 US\$/lt o 600 US\$/m<sup>3</sup><sup>65</sup>.

Debido a que básicamente el bioetanol es un producto de origen agrícola, las instituciones y la economía del área dominan su producción. Su precio se relaciona con el valor transable de los rastrojos asociados a la materia prima, su disponibilidad, transporte y costos asociados a la producción. Por consiguiente, el precio debiese estar asociado a estos costos, fluctuando según el

62 CNE 2007. La mezcla E5 contiene 5% de etanol y 95% de gasolina.

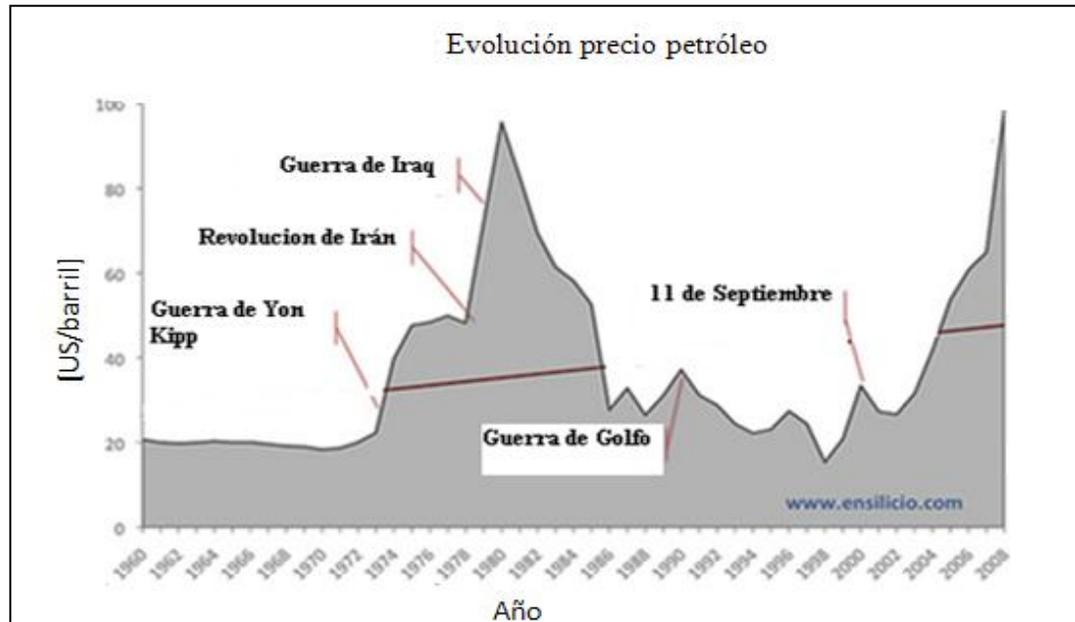
63 Consulta en el sitio web de ENAP (Empresa Nacional de Petróleo) en sección productos especificaciones, gasolina. [www.enap.cl](http://www.enap.cl)

64 TRAUB, A. 2007.

65 Consulta online en el sitio web de estadísticas del etanol de EE.UU. Agosto 2009. [www.ethanolstatistics.com](http://www.ethanolstatistics.com)

mercado. En Brasil el precio del bioetanol es de 550 US\$/m<sup>3</sup>, mientras que en EE.UU. es de 622 US\$/m<sup>3</sup><sup>66</sup>.

Gráfico 12: Evolución del precio del petróleo



Fuente: www.ensilicio.com

### 3.4.2. Precio de los Co-Productos

La elección de los productos derivados de la biorefinería se analiza en el Capítulo 5.3, en donde se dan las razones por las cuales se estimó producir estos co-productos en desmedro de otros. En esta sección se muestra el precio de mercado de los co-productos electos.

- **CO<sub>2</sub>**: El CO<sub>2</sub> es de grado alimenticio cuando sirve para refrescos, cerveza o para congelar alimentos y el cual debe de estar comprimido a 300 psi. El CO<sub>2</sub> para la carbonatación de bebidas debe tener un grado de pureza que le permita su uso en la industria alimenticia. Cotizando en la empresa Indura S.A.<sup>67</sup>, se pudo determinar que el precio del CO<sub>2</sub> alimenticio varía entre 0,7 a 4 USD por kilogramo, dependiendo de su pureza. En el caso de este proyecto el precio utilizado fue de 0,7 USD por kilogramo, lo cual se debe a su bajo nivel de pureza.
- **Levadura**: La levadura, tras ser utilizada en el proceso de fermentación y sacarificación, puede ser comercializada como alimento animal o como insumo para la industria de cosmeticos. Es en este último rubro donde la levadura está valorada en 1,5 USD por kilogramo<sup>68</sup>.

66 Consulta online en el sitio web de estadísticas del etanol de EE.UU. Agosto 2009. www.ethanolstatistics.com

67 www.indura.net

68 www.cosmetologas.com

- **Xilitol:** el Xilitol es un endulzante natural de venta comercial, el cual es un sustituto del azúcar pero que no contiene la misma cantidad de calorías que ésta. Su precio fluctúa entre los 0,1 USD a 29 USD por kilogramo<sup>69</sup>. Esta variación se debe al proceso y materia prima de donde se obtiene el Xilitol. En el caso particular de este proyecto, el precio utilizado corresponde a 0,2 USD por kilogramo debido a la materia prima en la que se encuentra (rastroyo de maíz), del proceso utilizado en su obtención y de la pureza del compuesto, la cual posee impurezas tales como inhibidores provenientes del proceso de fermentación, hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), etc.
- **Lignina:** este co-producto puede ser vendido para ser utilizado como combustible o como materia prima para otros productos. El precio de la lignina varía según las características de su composición. Entre más pura esté la lignina, mayor precio tendrá en el mercado. El rango de precio en que fluctúa la lignina es de 0,09 USD a 4,4 USD<sup>70</sup> por Kg, siendo el precio 4,4 USD de la lignina pura. En el caso particular de este proyecto, se usó un valor para la lignina de 0,1 USD por kilogramo debido exclusivamente al nivel de pureza que ésta posee, las cuales incluyen inhibidores, hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), etc.

### 3.5. ANÁLISIS DE LAS MATERIAS PRIMAS

Es importante analizar qué materia prima se podría utilizar en Chile para generar un proyecto de la envergadura económica de una planta de bioetanol de segunda generación y si existen plantaciones suficientes como para abastecer la producción anual de dicho combustible.

Chile es un país que posee recursos de suelos escasos en comparación a otros países, pero con altos niveles de productividad. De los 75,6 millones de hectáreas de Chile continental, solo 25,2 millones de hectáreas tienen potencial silvoagropecuario:

- Arables: 5,1 millones de hectáreas.
- Aptitud ganadera: 8,5 millones de hectáreas.
- Aptitud forestal: 11,6 millones de hectáreas.

De estas 5,1 millones de hectáreas arables, existen 1,8 con riego, 1,3 potencialmente regables y 2,0 de secano<sup>71</sup>.

En cuanto a los cultivos anuales y su distribución en el país, en la Tabla 3 se incluye la distribución histórica de los posibles cultivos que aportarían el rastroyo de maíz como materia prima para la producción de etanol. Como se aprecia en estas cifras, los cultivos seleccionados se ubican mayoritariamente en la zona centro-sur a sur del país, representando en promedio más del 50% de la superficie sembrada por especie.

---

<sup>69</sup> Producción de xilitol a partir de olivo, 2007.

<sup>70</sup> Según la Latvian State Institute of Wood Chemistry, 2006.

<sup>71</sup> ODEPA “Comité público-privado de bioenergía”, 2006.

Específicamente este proyecto utilizará residuos de cosecha de maíz, debido a que el interés de esta memoria apunta a explorar resultados en torno a esta materia prima, la cual es abundante y por otro lado la abundancia y concentración que ésta posee en Chile. La cantidad de residuos de cosecha de maíz que utilizará el proyecto sería de 345 mil m<sup>3</sup> al año, lo cual corresponde a un 75% del material disponible en la VI región. Cabe mencionar que 1 hectárea de rastrojo de maíz corresponde a aproximadamente 18 toneladas del material, esto debido al rendimiento de grano que posee la zona de cultivo<sup>72</sup> y que 1 tonelada de rastrojo de maíz corresponde a aproximadamente 1,2 m<sup>3</sup> del mismo material<sup>73</sup>.

Tabla 3: Distribución histórica de potenciales cultivos para bioetanol

Cultivos	Superficie [ha]		Participación Promedio en superficie total de cultivos anuales [%]	Regiones que desarrollan el cultivo	Centro de gravedad de producción [Región- %]
	Promedio 2001-2005	Promedio 2005-2006			
Trigo	419.120	314.720	51	IV a X	IX - 38
Avena	97.374	90.190	12	V a X	IX - 48
Maíz	106.518	123.560	13	V a VIII	VI - 57
Papa	59.078	63.200	7	IV a X	IX - X - 60
Remolacha	36.514	27.670	4	VI a X	VII - 52

Fuente: ODEPA con información del Instituto Nacional de Estadística (INE)

### 3.6. CAPACIDAD DE LA PLANTA

Según las proyecciones estimadas por la Comisión Nacional de Energía, el consumo de gasolinas en Chile para el 2010 sería de 3,3 millones de m<sup>3</sup>. Si la planta utilizara toda la materia prima estipulada en la logística de transporte (ver capítulo 5.2.), deberá producir 74.820 m<sup>3</sup>, lo cual corresponde al 45,3 % de la demanda nacional de bioetanol. Este porcentaje fluctuaría en la medida que varié la cantidad de materia prima disponible y la demanda existente de bioetanol en el país. Esta información se puede apreciar en la Tabla 4.

Tabla 4: Demanda de bioetanol en Chile y producción de la planta en estudio

Demanda	
Demanda Gasolina 2010 [m <sup>3</sup> /año]	3.300.000
5% bioetanol [m <sup>3</sup> /año]	165.000
Producción planta etanol [m <sup>3</sup> /año]	74.760
Porcentaje mercado [%]	45,3

Fuente: Elaboración propia.

72 Ej. 0,46 de rendimiento de gramo, quiere decir que 46% corresponde a grano y 54% a rastrojo de maíz.  
73 Faiguenbaum, H. 2009.

En el Anexo 8 se muestra un documento expuesto en la página web de la Comisión Nacional de Energía (CNE), donde se presenta una norma de calidad tentativa para el bioetanol chileno. En ese documento se acota el porcentaje de mezcla de bioetanol con gasolina en 5%.

Es por esto que se fija la capacidad de la planta en 74.760 m<sup>3</sup> de bioetanol producido, para ser mezclado con gasolina en un 5%.

## **4. ESTUDIO LEGAL**

### **4.1. NORMATIVAS DE CALIDAD**

Hoy en día en Chile los biocombustibles y específicamente el bioetanol, no se están produciendo en forma masiva para ser utilizados como combustibles. Además no existe una ley atingente que regule el uso y calidad de este biocombustible. Pero con la llegada de la compañía de petróleo Brasileira PETROBRAS<sup>74</sup> y por ende una presión por el uso de los biocombustibles, las normativas deberán ser revisadas a la brevedad. Es por esto que la CNE<sup>75</sup> ha trabajado en conjunto con ministerios y servicios públicos relacionados con el ámbito de los combustibles, para poder conocer las potencialidades que el país dispone para enfrentar la introducción de los biocombustibles en Chile.

Los ministerios y servicios que han participado son:

- Ministerio de Transporte.
- Ministerio de Agricultura.
- Comisión Nacional del Medio Ambiente.
- Superintendencia de Electricidad y Combustible.

Los temas que han sido objeto de análisis y estudios han tenido relación con la revisión del marco normativo y los procedimientos que se deben cumplir en la cadena de producción - consumo de los biocombustibles. Ésto con el fin de normar el inicio y desarrollo de sus actividades dentro de la República de Chile. En el ámbito técnico se han revisado los requerimientos de infraestructura para el suministro de biocombustibles en la actual red de distribución de combustibles líquidos en Chile, así como la evaluación del potencial productivo de biocombustibles en el país y de los potenciales efectos ambientales a lo largo de la cadena.

Hasta el momento no se han obtenido resultados concretos, ni mucho menos normativas vigentes, pero es de esperar que dentro de un plazo no mayor a un año esto sea efectivo<sup>76</sup>.

#### **4.1.1. Especificaciones de Calidad**

Las especificaciones de calidad para bioetanol y biodiesel, han sido propuestas por un equipo técnico del sector público nacional, apoyado en la revisión de la normativa internacional. El documento técnico fue sometido a consulta pública según lo requiere la Organización Mundial de Comercio, para así aprobar normas técnicas.

El decreto para las especificaciones de calidad de bioetanol y biodiesel, que ya emitió el Ministerio de Economía, se encuentra en proceso de revisión y aprobación por la Contraloría General de la República.

---

<sup>74</sup> PetroBras, disponible en [www.petrobras.com](http://www.petrobras.com)

<sup>75</sup> CNE, Disponible en [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

<sup>76</sup> CNE, Disponible en [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

## 4.2. EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

La Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, dictada en 1994, contempla que ciertos proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Según lo establecido por esta ley, se entiende por impacto ambiental la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada. En función de sus efectos, características y circunstancias, los proyectos deberán presentar uno de los siguientes documentos:

- **Declaración de Impacto Ambiental (DIA)**: documento descriptivo de una actividad o proyecto que se pretende realizar, o de las modificaciones que se le introducirán, otorgado bajo juramento por el respectivo titular, cuyo contenido permite al organismo competente evaluar si su impacto ambiental se ajusta a las normas ambientales vigentes.
- **Estudio de Impacto Ambiental (EIA)**: documento que describe pormenorizadamente las características de un proyecto o actividad que se pretenda llevar a cabo, y/o su modificación. Debe proporcionar antecedentes fundados para la predicción, identificación e interpretación de su impacto ambiental y describir la o las acciones que ejecutará para impedir o mitigar sus efectos significativamente adversos.

Los servicios públicos con competencia en materia ambiental evalúan en una sola instancia, si se otorga o no los permisos ambientales sectoriales relacionados al proyecto. Este proceso es administrado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).

Para determinar si un proyecto ingresa o no al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), se debe analizar el artículo 3 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, D. S . N° 95 de 2001, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Éste reglamento ve aquellos proyectos que son susceptibles de causar impacto ambiental, en alguna de sus etapas.

Los siguientes son los puntos del artículo 3 del SEIA antes mencionados, que competen a una planta productora.

*k) Instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales.*

*ñ) Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas.*

*ñ.4. Producción, almacenamiento, disposición, reutilización o transporte por medios terrestres, de sustancias inflamables que se realice durante un semestre o más, y con una periodicidad mensual o mayor, en una cantidad igual o superior a ochenta mil kilogramos diarios (80.000 kg/día), entendiéndose por tales a las sustancias señaladas en las Clases 3 y 4 de la NCh 2120/Of89.*

Por lo tanto, como la instalación de una planta productora de bioetanol se encuentra dentro de por lo menos uno de estos puntos, ésta debe ser sometida a un SEIA.

Con estos antecedentes medioambientales de la industria del etanol, el siguiente paso en el procedimiento de evaluación ambiental es realizar un Análisis de Pertinencia, lo que significa determinar la generación o presencia de efectos, características o circunstancias que definen la pertinencia de presentar un estudio de impacto ambiental.

Según las exigencias de la normativa ambiental, este proyecto no debería de presentar un EIA, pues no representa un peligro mayor para la población en la medida que respete las normas atingente al desarrollo de su proceso productivo y tratamiento de residuos. Sin embargo, se recomienda presentar de igual forma la documentación detallada que este proceso impone como obligatorias, para tener una revisión experta del impacto ambiental efectivo del mismo y poder implementar medidas que aminoren este daño de forma preventiva.

El SEIA contempla un proceso de fiscalización, establecido por la ley chilena, donde se comprueba que efectivamente los proyectos al ser ejecutados cumplan con las precauciones acordadas durante su revisión en este sistema.

### **4.3. NORMAS PARA RESIDUOS LÍQUIDOS INDUSTRIALES**

Uno de los principales problemas ambientales de la industria del bioetanol son las vinazas procedentes de los procesos de destilación para obtener el etanol azeotrópico. Las vinazas son los fondos que quedan en los calderines de las torres de destilación. Son líquidos oscuros, con una gran cantidad de sólidos suspendidos, tanto de materia orgánica como inorgánica, así como altos valores de DBO<sup>77</sup> (30000 a 60000 mg/lit) y DQO<sup>78</sup> (100000 g/lit). Una destilería típica puede producir cerca de 20 lit de vinazas por cada lit de etanol producido<sup>79</sup>. Además, estos residuos poseen un gran contenido de sales (con predominio de iones K, Ca y SO<sub>4</sub>) y un pH bajo (3.5-4.5).

En el Anexo 3 se muestra una tabla con las emisiones aceptadas por el concepto de residuos líquidos industriales.

Cabe destacar que las normas asociadas a DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y pH son las más atingentes a este proyecto.

### **4.4. LEGISLACIÓN RELACIONADA A LOS IMPUESTOS SOBRE EL BIOETANOL.**

En la actualidad los combustibles fósiles derivados del petróleo están regulados por la ley 18.502, específicamente en el artículo 6, en donde se indica la manera de calcular dicho impuesto. En el caso del bioetanol, el Ministerio de Hacienda ha declarado en los medios desde el año 2006 la no aplicabilidad del impuesto específico para este tipo de combustible. Esta declaración fue confirmada a través de la página de la Comisión Nacional de Energía (CNE)<sup>80</sup>.

---

<sup>77</sup> DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

<sup>78</sup> Demanda Química de Oxígeno.

<sup>79</sup> Sánchez O, Cardona C, 2005.

<sup>80</sup> CNE, disponible en [www.cne.cl](http://www.cne.cl)

La no aplicabilidad del impuesto específico al bioetanol es de suma importancia al momento de analizar un proyecto de esta envergadura, ya que ésto incidirá directamente en el precio del bioetanol y por lo tanto en la viabilidad del proyecto.

## 5. ESTUDIO TÉCNICO

### 5.1. MATERIA PRIMA<sup>81</sup>

Los materiales lignocelulósicos que se utilizan para producir etanol de segunda generación están compuestos con materia rica en base de celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales no poseen valor alimenticio alguno. Este material puede ser catalogado en tres grupos distintos:

- Residuos forestales (raleos, astillas, chips, aserrín, etc.)
- Residuos agrícolas (rastrajo de maíz, trigo, caña de azúcar, etc.)
- Residuos municipales (embalajes, cartones, papel, desperdicio de alimentos, etc.)

En el caso particular de este estudio, se consideraron residuos agrícolas como materia prima, específicamente rastrajo de maíz proveniente de la VI Región. No se estudiará la posibilidad de utilizar más de una materia prima, debido a que los procesos estudiados en éste informe indican que las plantas en su mayoría son dependientes de cual se utilice<sup>82</sup>.

#### 5.1.1. Ubicación

Para lograr identificar la región que proporcionará la materia prima (rastrajo de maíz) a la planta, se estudiara la disponibilidad de este tipo de residuo por regiones.

La industria del maíz se desarrolla en forma extensa en Chile, encontrándose siembras de maíz desde la I hasta IX región, incluyendo la Región Metropolitana. En Chile existe una superficie cultivada de 102.955 hectáreas de maíz de grano seco, concentrándose la mayor cantidad en la VI región (46.704 hectáreas)<sup>83</sup>. En el Gráfico 13 se puede ver la distribución de la cantidad de hectáreas sembradas de maíz.

Según el Gráfico 13, la VI Región posee un 45,37% del total de superficie sembrada y le siguen la VII, RM y VIII, con porcentajes muy inferiores. Además, como se analizó en el punto 3.6, la gravedad de producción del maíz se concentra en esta región con un 57% del total del maíz sembrado en Chile.

La VI Región se divide en 32 comunas particularmente interesantes, ya sea por la superficie sembrada, la producción anual de maíz en qqm<sup>84</sup> y/o el rendimiento en qqm/ha<sup>85</sup>, lo cual será fundamental al momento de elegir las comunas idóneas para abastecer a la planta de la materia prima.

---

81 Almada, M, 2006.

82 Llynd, S. 1996.

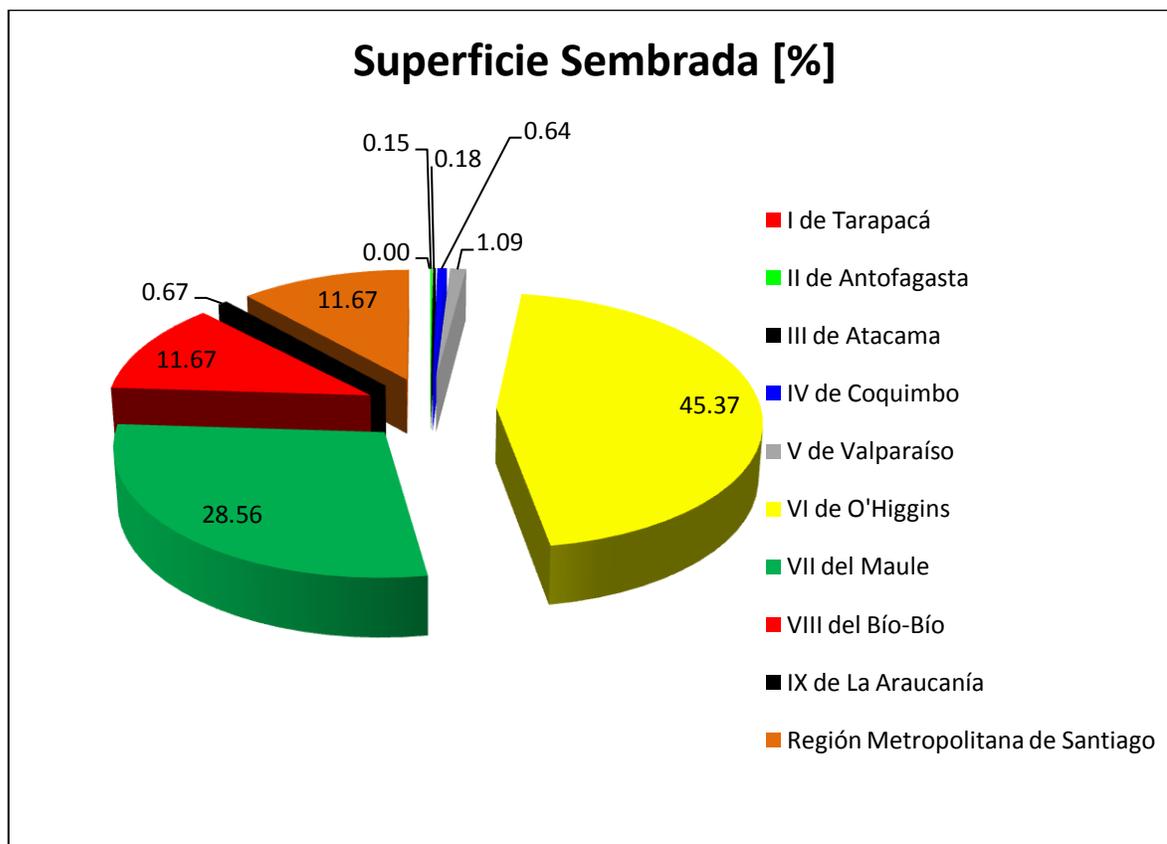
83 [www.ine.cl](http://www.ine.cl)

84 qqm: quintal métrico

85 Ver Anexo 4

No se descarta la posibilidad de agregar otras comunas, las cuales puedan abastecer a la planta de materia prima en caso de ser necesario<sup>86</sup>. Para ésto existen comunas tanto en la VI Región como en la Región Metropolitana, que podrían aportar materia prima sin variar en demasía la logística de transporte detallada en el punto 5.2.

Gráfico 13: Superficie sembrada con maíz en Chile



Fuente: INE. Censo Agropecuario 2007, disponible en [www.ine.cl](http://www.ine.cl).

A pesar de que el maíz posee estacionalidad de siembra y cosecha, es decir es sembrado y cosechado en cierta época del año, el estudio contempla el almacenamiento del rastrojo de maíz que se obtiene anualmente en la zona y por lo tanto no depende de esta estacionalidad.

### 5.1.2. Caracterización

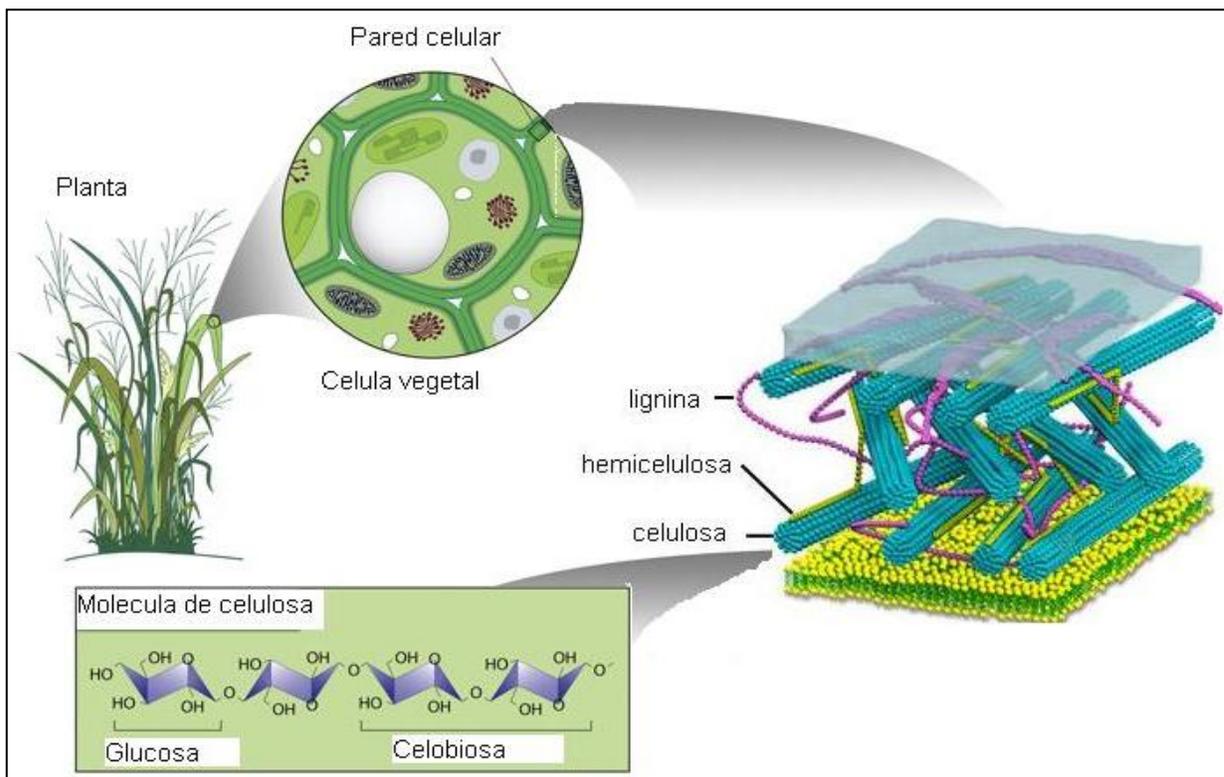
Como se puede ver en la Figura 2, la pared celular de los vegetales se compone de polímeros de carbohidratos, -específicamente celulosa, hemicelulosa, lignina- y una pequeña porción de sales, ácidos y minerales.

86 Ver Anexo 4

La hemicelulosa<sup>87</sup> está compuesta de glucosa y otros azúcares solubles en agua (pentosas), la que tiende a formar estructuras ramificadas y rodea los filamentos de celulosa ayudando en la formación de las microfibrillas. Específicamente, las hemicelulosas son heteropolisacáridos (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, que a su vez están formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces  $\beta$  (1-4) (fundamentalmente xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido glucurónico). Estos forman una cadena lineal ramificada.

La celulosa es una larga cadena de unidades de glucosa, que se agrupan formando filamentos, los cuales constituyen estructuras más gruesas. Más en detalle, la celulosa es un polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de glucosa, puesto que es un homopolisacárido (compuesto por un solo tipo de monosacárido). Es rígido, insoluble en agua, y contiene desde varios cientos hasta varios miles de unidades de  $\beta$ -glucosa. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante, ya que forma la mayor parte de la biomasa terrestre.

Figura 2: Estructura del rastrojo de maíz.



Fuente: DOE. Cellulosic Ethanol. [www.genomicsgtl.energy.gov.com](http://www.genomicsgtl.energy.gov.com). Agosto, 2009.

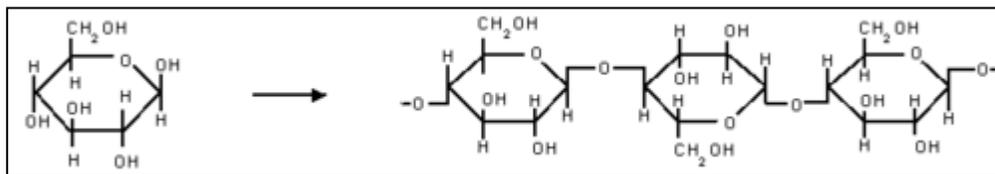
La celulosa se forma por la unión de moléculas de  $\beta$ -glucosa. La celulosa es una larga cadena polimérica de peso molecular variable, con fórmula empírica  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , con un valor mínimo de

<sup>87</sup> Yang, H *et al.* 2007.

n= 200. La celulosa tiene una estructura lineal (ver Figura 3) o fibrosa, en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas de glucosa, tornándolas insolubles al agua. Esto hace que la celulosa sea insoluble en agua, originando fibras compactas que constituyen la pared celular de las células vegetales.

La lignina se concentra en la pared celular del rastrojo, ayudando a mantener las microfibrillas entre sí. Ésta es la encargada de entregar rigidez a la planta y ayuda en el transporte de agua. La lignina está constituida por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos. Los polímeros de lignina son estructuras transconectadas con un peso molecular de 10.000 uma<sup>88</sup>. Se caracteriza por ser un complejo aromático no carbohidrato, del que existen muchos variantes estructurales (ligninas). Resulta conveniente utilizar el término lignina en un sentido colectivo para señalar la fracción lignina de la fibra. Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce.

Figura 3: Estructura de la celulosa



Fuente: [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)

De estos compuestos, sólo la celulosa y parte de la hemicelulosa pueden ser convertidos en etanol. El otro compuesto principal, la lignina, puede ser procesada para generar productos tales como medicamentos (LigMed-A), adhesivos naturales, etc.

Las sustancias que son de interés básico en la materia prima para la producción de bioetanol son un tipo de hidrocarburos, también conocidos como sacaroides o azúcares simples. Éstos pueden ser simples (glucosa) o más complejos (celulosa), posibilitando su uso en forma distinta.

Los principales azúcares presentes en los vegetales pueden ser clasificados como:

- **Sustratos fermentables:** Son posibles de fermentar en presencia de levaduras u otros compuestos, para así obtener etanol directamente de ellos.
- **Sustratos no fermentables directamente:** Para sufrir fermentación alcohólica necesitan ser degradados a azúcares más simples susceptibles de fermentar. Este tratamiento previo se llama hidrólisis o sacarificación<sup>89</sup>.

88 Uma: unidad de masa atómica  
89 Ver Anexo 5 para más detalles

La materia prima a utilizar (proveniente de la VI región), está caracterizada detalladamente<sup>90</sup>, en sus componentes estructurales. Por otro lado, hay estudios<sup>91</sup> sobre los valores teóricos de los componentes del material lignocelulósico. En la Tabla 5 se muestran los valores, tanto teóricos como del estudio de Santibáñez.

Al comparar la información, se aprecia que los datos teóricos como los del estudio de Santibáñez se asemejan bastante, lo cual da validez al estudio. La diferencia se relaciona a que los datos teóricos corresponden a datos promedios del material en distintas condiciones, mientras que los datos del estudio varían según la localización del material y sus características geomorfológicas. Cabe destacar que el término holocelulosa se refiere al material obtenido después de la deslignificación, lo cual significa a la suma de hemicelulosa, ceniza, extraíbles y celulosa.

Tabla 5: Caracterización de residuos agrícolas de maíz.

Componente Químico	Teórico [%]	Estudio [%] <sup>(1)</sup>
Lignina	18,28	13,53
Holocelulosa	78,36	73,36
Celulosa	41,21	41,51
Extraíbles	18,34	9,78
Cenizas	6,34	3,33
Hemicelulosa	/	31,85

Fuente<sup>(1)</sup>: Estudio Sr. Pablo Santibáñez<sup>92</sup>.

Analizando el rendimiento del rastrojo de maíz de una hectárea de producción de maíz se logran 18 toneladas de rastrojo de maíz<sup>93</sup>. Además, es importante mencionar que del total del rastrojo de maíz obtenido por hectárea sólo se utilizará el 50% del material para la producción de etanol, ya que el restante se utiliza para abonar la tierra de cultivo<sup>94</sup>.

## 5.2. LOCALIZACIÓN

Como se examinó en la sección 5.1.1. la planta estaría ubicada en la VI región, debido a la mayor disponibilidad de rastrojo de maíz. Esta disponibilidad en la zona está directamente relacionada con la superficie sembrada de maíz. La distribución de las plantaciones total de maíz en la zona se puede ver en el Anexo 4.

Para ver la localización de la planta se analizaron factores como precio por tonelada de flete por kilómetro recorrido, mapas geomorfológicos de la región, disponibilidad de rastrojo de maíz, accesos viales dentro de la región y cercanía a recursos de aguas.

90 Santibáñez P. Caracterización de la materia prima lignocelulosica. Chile, 2009.

91 Garay *et al.* 2008.

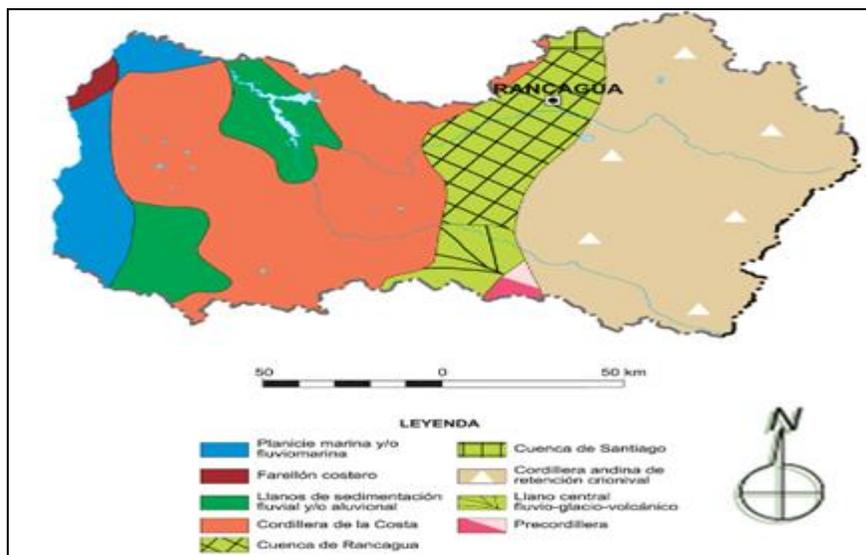
92 Santibáñez, P. 2009.

93 Faiguenbaum, H. 2009.

94 Consultoría con Sr. Agustín Cordero, Ingeniero agrónomo radicado en la VI región.

En primer lugar la relación precio por tonelada de rastrojo de maíz por kilómetro recorrido en Chile está descrito por Chile Transporte A.G. Ésta es una asociación gremial que reúne a las grandes empresas que cubren los distintos sectores del transporte de carga por carretera en Chile y tiene como objetivo la profesionalización de esta industria. Esta asociación gremial estipula un precio por tonelada transportada de 0,06 USD por kilómetro recorrido. Esto permite dar el primer paso para definir la localización de la planta en la VI Región.

Figura 4: Mapa geomorfológico VI región



Fuente: Borgel, 1983.

Al analizar mapas de la VI Región, se puede apreciar que ésta no posee grandes variaciones en el relieve. Sólo en el sector cordillerano existen pronunciadas elevaciones (3000 msnm a 4000 msnm<sup>95</sup>)<sup>96</sup>, las cuales dificultarían el transporte de la materia prima. En cambio el territorio ubicado al oeste de Rancagua presenta una superficie bastante homogénea, que sólo es alterada por la escasa elevación que adquiere la cordillera de la costa en este sector, alcanzando apenas unos 800 msnm<sup>97</sup>. En la Figura 4 se puede apreciar que al oeste de Rancagua, existe una morfología idónea para el fácil transporte de la materia prima, ya que solo existen morfologías como cuencas, cordillera de la costa (escasa elevación) y llanos.

Por otro lado, es importante observar los accesos viales que posee la VI región, los cuales permitirán ver los accesos reales que se dispondrá para el transporte de los rastrojos de maíz. Como se aprecia con las líneas de color rojo en la Figura 5, Peumo (en un círculo rojo) posee accesos a la mayoría de las comunas de la región, ya sea por carreteras, caminos principales o caminos secundarios. Todos estos accesos son pavimentados, facilitando aun más el transporte de la materia prima.

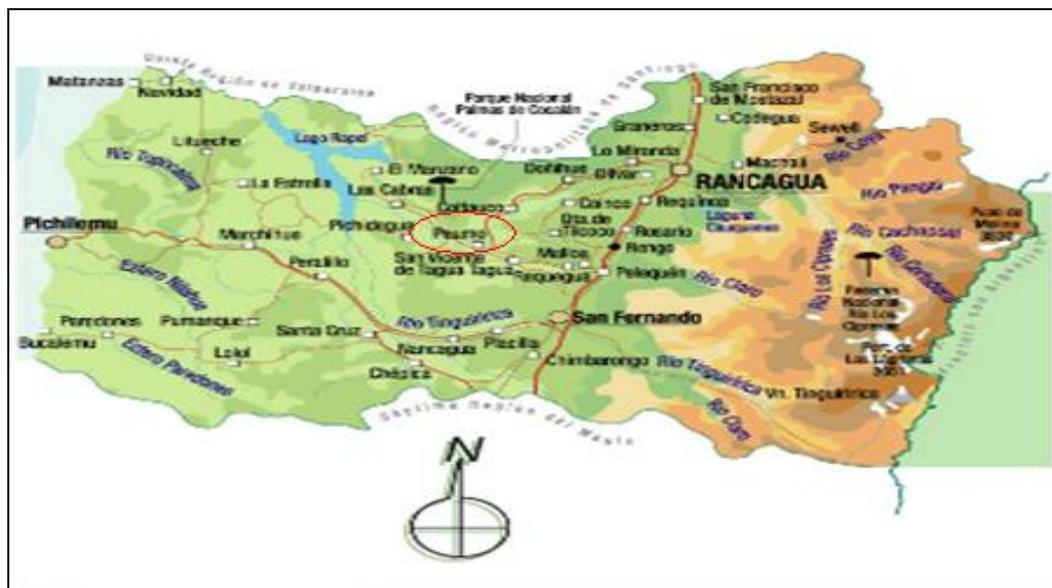
95 Msnm: metros sobre el nivel del mar.

96 Datos [www.vi.cl](http://www.vi.cl)

97 Msnm: metros sobre el nivel del mar.

Al elegir la localización de la planta, es necesario tener en cuenta la disponibilidad de materia prima para un radio menor a 50 kilómetros medidos desde la planta<sup>98</sup>. Ésto debido a que el costo de la recolección de la materia prima aumenta considerablemente si no se siguen estos patrones de logística de transporte. Además se considera factores como la geomorfología, cantidad de materia prima disponible y acceso vial, lo cual sumado al precio del transporte indicará la comuna idónea para localizar la planta.

Figura 5: Mapa físico VI región



Fuente: Dirección de fronteras y límites del estado

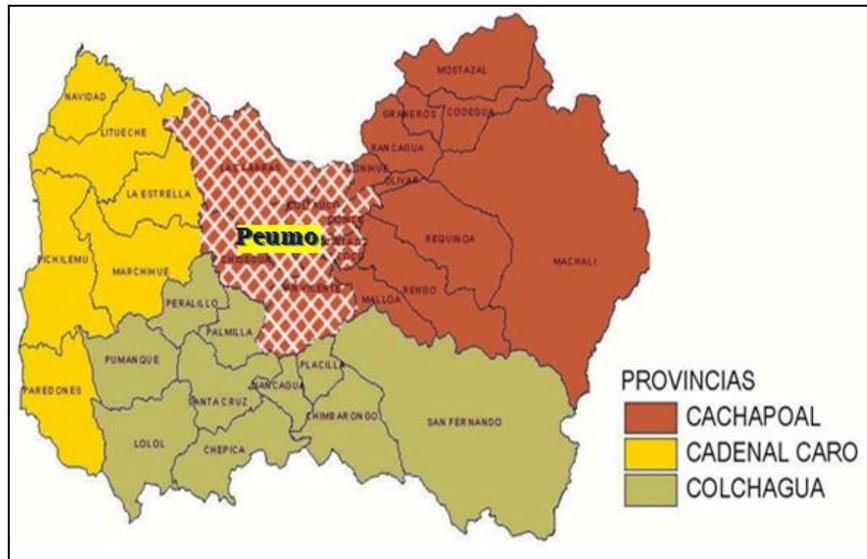
Además, la localidad de Peumo está ubicada a no más de 1 kilómetro del río Cachapoal, lo cual es muy importante al momento de definir la localización de la planta, debido a las necesidades de agua que posee el proyecto.

Es por ésto que se considera que la localidad idónea es la comuna de Peumo, por poseer todos los factores antes mencionados, lo cual permitirá reducir el costo asociado al transporte de la materia prima y a su vez cumplir con los requisitos de agua de la planta.

En la Figura 6 se muestra la VI Región, dividida por comunas; además se aprecian las comunas seleccionadas para alimentar la planta ubicada en Peumo. En la Tabla 6 se enumera las comunas electas, con sus respectivas hectáreas sembradas, producción total, rendimiento, distancia relativa con Peumo y la cantidad de rastrojo de maíz que estaría disponible para el proyecto, el cual considera solo un 50% del material disponible<sup>99</sup>.

98 Robuste F., 2005.  
99 Fuente www.ine.cl

Figura 6: Comunas seleccionadas para el proyecto en la VI región



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Comunas electas con materia prima.

	Superficie total [ha]	Producción total [qqm]	Rendimiento promedio [qqm/ha]	Distancia c/r a Peumo [km]	Rastrojo de maíz [Ton]
<b>Pichidegua</b>	5.468	656.788	120	15	104.144
<b>San Vicente</b>	4.759	625.873	132	10	99.242
<b>Las Cabras</b>	2.692	324.297	120	18	51.422
<b>Quinta de Tilco</b>	1.853	268.923	145	28	42.642
<b>Coltauco</b>	1.292	192.616	149	21	30.542
<b>Coinco</b>	793	64.007	81	38	10.149
<b>Peumo</b>	381	48.331	127	-	7.664
<b>Total Comunas</b>	17.239	2.180.835	125		345.805

Fuente: INE. Censo Agropecuario 2007, disponible en [www.ine.cl](http://www.ine.cl)

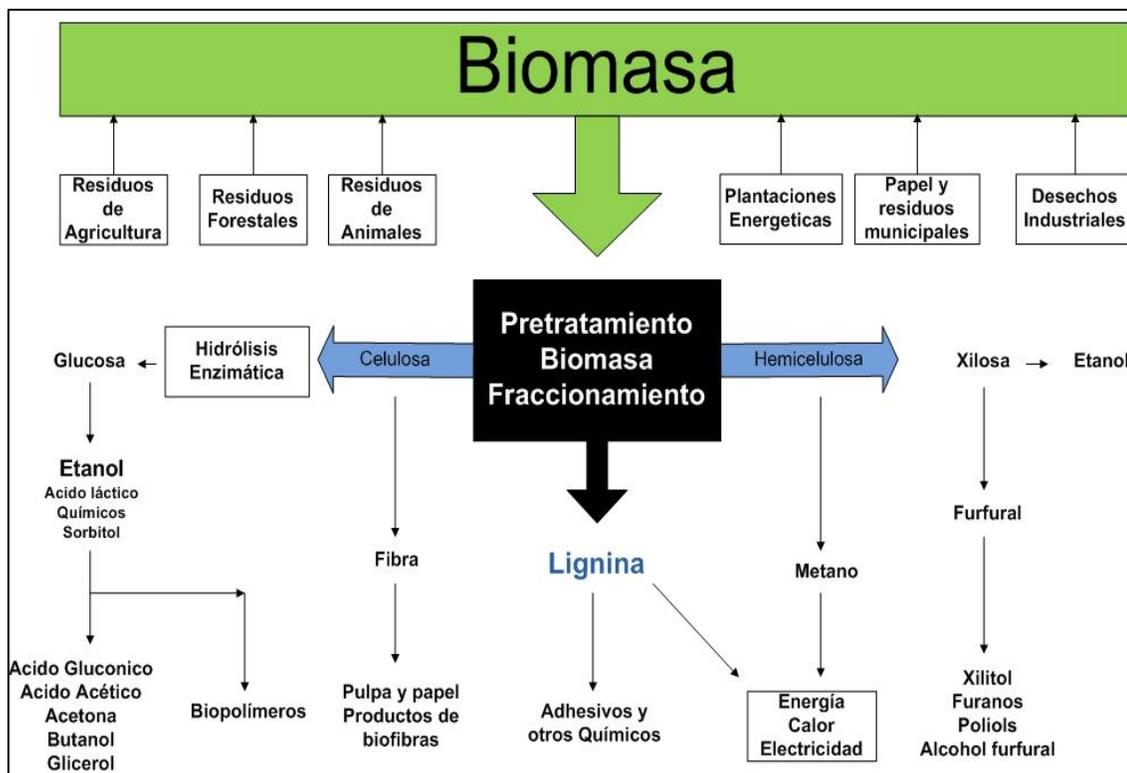
Con esta cantidad de materia prima, se prevé una producción anual de aproximadamente 75.000 m<sup>3</sup> de bioetanol, obteniendo un factor de conversión de rastrojo a bioetanol de 0,22 m<sup>3</sup> de bioetanol por tonelada de rastrojo de maíz, el cual se obtuvo tras el diseño conceptual de la planta en estudio.

### 5.3. PRODUCTOS

Los productos elaborados a partir de una biorefinería<sup>100</sup> son varios, siendo el bioetanol el principal. Existe una serie de productos derivados de la biorefinería que podrían aportar a la rentabilidad del proyecto. Los productos de la biorefinería provienen de tres fracciones de la biomasa -la celulosa, la hemicelulosa y la lignina- los cuales son parte fundamental de la materia prima a utilizar.

En la Figura 7 se muestra una serie de productos que provienen de los distintos componentes estructurales de la biomasa, las cuales se analizaron por parte. Además de los productos provenientes del fraccionamiento de la biomasa, existen 4 de ellos asociados directamente con la biorefinería: el CO<sub>2</sub>, el biogás, los biofertilizantes y la levadura como alimento animal y/o cosmético.

Figura 7: Productos derivados de la biorefinería



Fuente: [www.purevisiontechnology.com](http://www.purevisiontechnology.com)

#### 5.3.1 Productos Derivados de la Celulosa

A continuación se enumeraran los productos que se pueden obtener a partir de la celulosa y una breve reseña de ellos.

<sup>100</sup> Mas detalle de biorefinería en Capitulo 11 de definiciones.

- **Bioetanol**

La reacción involucrada en la producción de bioetanol, a través de la fermentación de la glucosa por parte de la levadura, es la siguiente:



El bioetanol es un producto químico ( $C_2H_5OH$ ) obtenido a partir de la fermentación de azúcares que se encuentran en algunos productos vegetales, tales como cereales (maíz), remolacha y caña de azúcar. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa. Las plantas crecen gracias al proceso de fotosíntesis, en el que la luz del sol, el dióxido de carbono de la atmósfera, el agua y los nutrientes del suelo forman moléculas orgánicas complejas como el azúcar, los hidratos de carbono y la celulosa, que se concentran en la pared celular de la planta, los que posteriormente son utilizados para la elaboración de bioetanol.

El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. Tras un proceso de sacarificación, fermentación y destilado, se obtiene alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, el cual tras ser deshidratado puede ser utilizado como combustible.

El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energético con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. Existe además otra alternativa para su uso, en forma de aditivo de la gasolina como etil-terbutil éter (ETBE).

Se le llama bioetanol de primera generación al etanol producido a partir de material alimenticio, provenientes de azúcares, los cuales están contenidos en productos alimenticios tales como la caña de azúcar, la remolacha y cereales. Éste es producido mediante la fermentación de los azúcares del almidón.

Se le llama bioetanol de segunda generación al etanol obtenido a partir de material lignocelulósico, a menudo llamado biomasa y la cual no compite en precio, como son los alimentos. Ésto quiere decir material de origen biológico que contiene azúcares (en forma de celulosa y hemicelulosa), pero que generalmente es clasificado como desecho orgánico. Su materia prima puede ser cualquier tipo de biomasa vegetal, desde desechos agrícolas o madereros hasta cultivos energéticos específicos. En el caso particular de este proyecto, el bioetanol de segunda generación provendrá de residuos de cosecha de maíz.

A continuación se muestran algunas ventajas y desventajas del etanol de segunda generación con respecto al de primera generación.

### **Ventajas del bioetanol de segunda generación con respecto al de primera:**

- Menor nivel de impactos ambientales, en lo que se refiere a emisiones de CO<sub>2</sub> y otros agentes contaminantes.
- Un mayor rendimiento en combustible o energía por hectárea, debido a que es posible aprovechar el total de la biomasa.
- El gran potencial disponible en una vasta gama de materia prima, y en particular, de residuos o desechos como paja, maíz o madera.
- No compite por el suelo destinado a alimentos

### **Desventajas del bioetanol de segunda generación con respecto al de primera:**

- La necesidad de inversiones elevadas para una planta de bioetanol con respecto a plantas productoras de combustibles convencionales. Esto, debido a que es una tecnología nueva, la cual no está ampliamente desarrollada a nivel mundial
- Los problemas logísticos relacionados con el abastecimiento de materias primas, ya que el de primera aprovecha la logística de transporte de los alimentos.
- La producción de los biocombustibles de segunda generación competiría también en alguna dimensión, con otros usos de los suelos en la agricultura, el desarrollo urbano, usos forestales o hábitats naturales, aumentando así el precio de esta materia prima, algo que ya sucedió con el bioetanol de primera generación.
- La posible utilización de organismos modificados genéticamente en cultivos energéticos, ya que estos pueden afectar al ecosistema al momento de polinizar otros cultivos. Es necesario hacer un estudio minucioso sobre las alteraciones genéticas y los posibles efectos en el medio ambiente.

- **Biopolímeros**

Los biopolímeros<sup>101</sup> plásticos son unas estructuras moleculares compuestas por cadenas de monómeros, que en conjunto poseen una estructura y propiedades similares a los plásticos de origen fósil. Usando como materia prima los residuos generados en diferentes industrias (bioetanol, aguas residuales, biomasa) se pueden conseguir dichos biopolímeros, con la propiedad fundamental de que son biodegradables y totalmente inocuos en el momento de su descomposición.

Las propiedades y características de biodegradabilidad que dichos polímeros poseen, los hacen muy versátiles para un gran número de funciones, como por ejemplo su uso en el

---

101 Fuente: Science Book; [www.Sciencebook.com](http://www.Sciencebook.com)

packaging (envases) y utilidades biomédicas (suturas, parches cápsulas de liberación controlada y cirugía facial).

- **Papel**

El papel<sup>102</sup> es una delgada hoja elaborada mediante pasta de fibras vegetales que son molidas, blanqueadas, desteñidas en agua, secadas y endurecidas posteriormente. A la pulpa de celulosa, normalmente, se añaden sustancias como polipropileno o polietileno, con el fin de proporcionar diversas características. Las fibras están aglutinadas mediante enlaces por puente de hidrógeno. También se denomina papel, hoja o folio a su forma más común como lámina delgada.

El papel se usa para infinidad de cosas. Aparte de las más habituales (escritura e impresión) hay una serie de usos curiosos:

- Para la papiroflexia (Arte de origen japonés en el cual se realizan figuras con el papel).
- Puertas. Algunas puertas de baja calidad constan de dos chapas de madera en cuyo interior se encuentran unas celdas tipo panal de abeja, que dan consistencia, hechas de papel.
- Decorativo como sucedáneo de madera.
- Dinero (billetes). Es un papel complicado de fabricar y de imitar. Se fabrica con un gran porcentaje de pasta de algodón, lo que le confiere resistencia (fibras muy largas). Se añaden fibras especiales que brillan con luz ultravioleta y se le aplican marcas al agua.
- El empapelado decorativo de departamentos en arquitectura interior.

### **5.3.2. Productos Derivados de la Lignina**

A continuación se enumeraran los productos que se pueden obtener a partir de la lignina; se dará una breve reseña de ellos.

- **Lignina de uso comerciales**

La lignina de uso comercial en estado sólido puede ser utilizada de varias formas. Ésta puede ser ocupada como fuente energética a través de la combustión generando energía para algún uso específico como el ingreso a la matriz energética de un país, o el uso particular de una industria.

---

102 Fuente: Science Book; [www.Sciencebook.com](http://www.Sciencebook.com)

- **Adhesivos naturales**

Adhesivo es una sustancia que puede mantener unidos a dos o más cuerpos por contacto superficial. Su importancia en la industria moderna es considerable. Los adhesivos de origen vegetal o naturales son a base de derivados de la patata, el maíz, etc., tales como el almidón o la lignina. Sus usos varían desde adhesivos para uso doméstico o infantil, adhesivos sólidos y adhesivos líquidos. Además las normativas europeas EN 314-1 y EN 314-2<sup>103</sup>, exigen cada vez más que los adhesivos sean menos corrosivos, dañinos para el ambiente, lo cual apunta claramente a los adhesivos naturales como una alternativa potente.

- **LigMed-A**

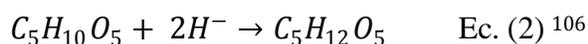
El LigMed-A<sup>104</sup> es un derivado químico de la lignina, el cual posee como característica ser un medicamento antidiarreico en animales, específicamente en porcinos. Este medicamento fue desarrollado y estudiado en Cuba por entidades tales como el Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria (CENSA), Centro de Investigación y Desarrollo de Medicamentos (CIDEM) y Centro de Investigación y Evaluaciones Biológicas (CIEB) de la Universidad de la Habana<sup>105</sup>. Es una alternativa como medicamento animal, de mediano costo, el cual podría reemplazar en un futuro cercano a los antidiarreicos sintéticos.

### 5.3.3. Productos Derivados de la Hemicelulosa

A continuación se enumeraran los productos que se pueden obtener a partir de la hemicelulosa y se dará una breve reseña de ellos.

- **Xilitol**

La reacción involucrada en la producción de xilitol a partir de la xilosa es:



El xilitol se conoce desde hace más de 90 años y ha sido utilizado durante mucho tiempo como endulzante para diabéticos en diversos países de Europa y Asia. Pocas sustancias químicas han sido investigadas tan profundamente como ésta en cuanto a la seguridad para su consumo por el hombre.

Hoy en día, el xilitol es aceptado como un ingrediente/aditivo dietético en 28 países como así también por la FAO/OMS. Es una de las más valiosas alternativas en cuanto a sustitutos naturales del azúcar. Es parte del metabolismo humano y su propiedad de no ser fermentable lo convierte en una importante herramienta de prevención de caries.

---

103 Normas UNE, 2009.

104 Cruz, R., *et al* 1997.

105 Más detalle en Anexo 6

106 H<sup>-</sup>: Protón de hidrógeno

Su producción comercial se lleva a cabo por síntesis a partir de material de desecho de plantas, obteniéndose como producto final xilitol cristalino. El material de desecho puede ser pulpa de madera, bagazo de caña de azúcar, rastrojo de maíz o cáscaras de almendras. Todos ellos contienen xilano, el cual se extrae y con posterioridad se trata para llegar a los cristales de xilitol.

Desde el punto de vista químico, el xilitol se clasifica como un polialcohol formado por una cadena de 5 carbonos o alcohol pentahídrico. El xilitol tiene poder edulcorante y perfil de sabor similares a los de la sacarosa. Con otros edulcorantes presenta sinergismo. Otra de sus propiedades características es su "efecto refrescante" gracias a la "sensación de frío" que produce a nivel del nervio trigémino. Esto es debido a su bajo calor de disolución de -153 KJ/kg. Además, posee la capacidad de enmascarar el sabor de otros ingredientes.

La lista de propiedades técnicas del xilitol se completa con:

- Baja viscosidad.
- Alta solubilidad (169g/100g 20°C).
- Baja actividad en agua, lo que da una alta estabilidad microbiológica.
- Alta estabilidad térmica y química.
- Moderada higroscopicidad.

La utilización dentro de la industria es muy variada, por ejemplo:

En productos "sin azúcar":

- Chiclet
- Mentas
- Caramelos
- Chocolates

Productos farmacológicos:

- Tabletas con vitaminas
- Suplementos minerales

- **Bioetanol**

En el punto 5.3.1. ya se mencionó una reseña de este producto, el cual provendría de la fermentación de las pentosas y no de las hexosas.

- **Productos furanos**

Los productos furanos provienen directamente de la xilosa, la que al ser procesada producirá una serie de productos furanos. Estos serán enumerados a continuación:

- Nylon 6
- Productos químicos
- Resinas furaneas

#### **5.3.4. Productos de la Biorefinería**

A continuación se enumeraran los productos que están asociados a biorefinería y se dará una breve reseña de ellos.

- **Biofertilizantes**

Un abono orgánico o biofertilizante, es un fertilizante que no está fabricado por medios industriales, como los fertilizantes (hecho a partir de combustibles fósiles y aire) o los obtenidos de minería, como los fosfatos o el potasio. Los orgánicos provienen de animales, restos de comida vegetal, u otra fuente orgánica y natural.

Actualmente los fertilizantes inorgánicos suelen ser más baratos y con dosis más precisas y más concentradas de nutrientes. Sin embargo, salvo en cultivo hidropónico, los abonos orgánicos son necesarios para reponer la materia orgánica del suelo. A continuación se indican algunas desventajas y ventajas de los biofertilizantes:

##### **Desventajas de los fertilizantes inorgánicos:**

- Degradan la vida del suelo y matan microorganismos que ponen a disposición de las plantas nutrientes.
- Necesitan más energía para su fabricación y transporte.
- Generan dependencia del agricultor hacia el suministrador del fertilizante.

##### **Ventajas de los biofertilizantes:**

- Permiten aprovechar residuos orgánicos.
- Recuperan la materia orgánica del suelo y permiten la fijación de carbono en el suelo, así como la capacidad de absorber agua.
- Suelen necesitar menos energía, incluso durante su fabricación.

Actualmente el consumo de fertilizantes orgánicos está aumentando debido a la demanda de alimentos orgánicos y la conciencia por el cuidado del medio ambiente.

- **Biogás**

Se llama biogás a la mezcla constituida por metano ( $\text{CH}_4$ ) en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y ácido sulfúrico. Sus características se aprecian en la Tabla 7.

En el proceso se produciría por un proceso realizado a los desechos del proceso, tanto RILes como RISEs, con lo cual se podría obtener biogás.

La incorporación de esta fuente energética se ha visto en importantes ciudades del mundo, como es el caso de Santiago de Chile, la cual incluye un importante porcentaje de gas procedente de esta fuente, en la red de distribución urbana de gas natural.

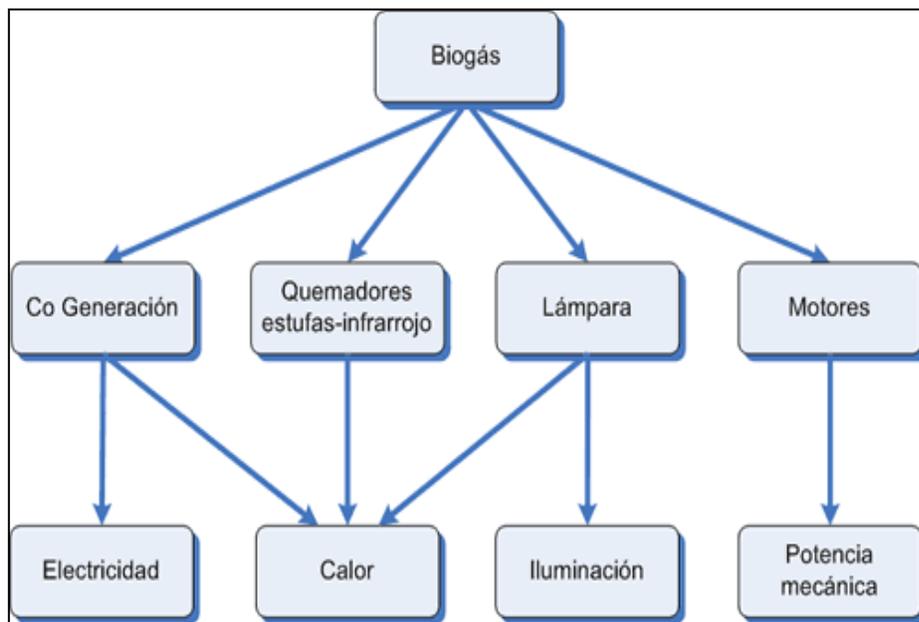
En principio el biogás puede ser utilizado en cualquier equipo comercial diseñado para uso con gas natural. La Figura 8 resume las posibles aplicaciones del biogás

Tabla 7: Características del biogás.

CARACTERISTICAS	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> S	OTROS	BIOGAS 60/40
Proporciones % Volumen	55-70	27-44	1	3	100
Valor Calórico MJ/m <sup>3</sup>	35,8	-	10,8	22	21,5
Valor Calórico kCal/m <sup>3</sup>	8600	-	2581	5258	5140
Ignición % en aire	5 a 15	-	-	-	6 a 12
Temp. ignición en °C	650-750	-	-	-	650-750
Presión crítica en Mpa	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5-8,9
Densidad g/l	0,7	1,9	0,08	-	1,2
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	0,83
Inflamabilidad Vol. en % aire	5 a 15	-	-	-	6 a 12

Fuente: [www.textocientifico.com](http://www.textocientifico.com)

Figura 8: Usos del biogás.



Fuente: [www.textocientifico.com](http://www.textocientifico.com)

- **CO<sub>2</sub> envasado**

La presencia de un exceso de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera tiene un protagonismo central dentro de la ciencia ambiental. En todo el mundo la gente está preocupada por la cantidad excesiva de CO<sub>2</sub> atmosférico debido a que está originando cambios no deseados en nuestro ambiente, tales como el efecto invernadero, calentamiento global, descongelamiento de los glaciares, etc.

Hoy en día existe una serie de empresas que utilizan el CO<sub>2</sub> como materia prima para producir un sinnúmero de productos. A continuación se muestra algunas empresas que utilizan el CO<sub>2</sub> como materia prima:

- Carbon Sciences, Santa Bárbara, California: Esta empresa tiene un proceso patentado biocatalítico que podría ser empleado en plantas para convertir sus emisiones en metanol. Este producto puede convertirse después en gasolina, butanol y combustibles para aviones.
- Norner: Esta empresa está refinando los parámetros de proceso de fabricación de nuevos plásticos a partir de CO<sub>2</sub> además de explorar como las propiedades de estos materiales pueden ser usadas en aplicaciones reales, tales como bolsas de supermercado, laminas, etc.

- **Levadura como producto industrial**

Tras ser utilizada en la fermentación, la levadura es recuperada y purificada a través de un filtro especialmente diseñado para tal finalidad. La levadura recuperada no presenta niveles de contaminación significativos, por lo cual puede ser vendido como alimento para animales y/o como insumo para la cosmetología.

Es un complemento rico en proteínas y vitaminas, ideal para suplementar dietas deficientes, siendo de fácil digestibilidad y rápida absorción por el organismo animal. Por dar un ejemplo, recientemente se está utilizando la levadura de cerveza, *Saccharomyces cerevisiae*, como uno de los aditivos que producen efectos beneficiosos en los pollos de carne.

En el caso de la industria cosmetológica, la levadura es utilizada como ingrediente en una serie de cremas y productos para la piel, los cuales aportan nutrientes a ésta.

### **5.3.5 Productos Seleccionados**

Los productos seleccionados en el proceso están directamente relacionados con la caracterización de la materia prima, el rendimiento de la producción de bioetanol, su proceso particular de producción y los precios en el mercado de éstos. Es de suma importancia mencionar que muchos de los productos antes mencionados fueron descartados debido a su incompatibilidad con el material disponible, su baja cotización en el mercado o la complejidad de su proceso productivo.

Es por esto que al analizar los factores antes mencionados y el proceso particular de la planta (ver punto 5.4) se determinó la selección de los siguientes productos:

- Bioetanol
- Levadura como alimento animal
- Xilitol
- Lignina para fines comerciales

Estos serán los 4 productos que generará la planta de biorefinería de rastrojo de maíz, los cuales aportarán a la sustentabilidad y rentabilidad de ésta, debido a la cantidad que se produce y al precio de mercado que poseen. Estos serán comercializados en el mercado nacional, debido a que poseen un amplio mercado dentro de éste.

## 5.4. PROCESO

### 5.4.1 Proceso General

Los procesos para producir bioetanol difieren principalmente en los métodos usados para pretratar, hidrolizar y fermentar la biomasa. Para entender de mejor forma estos conceptos, la hidrólisis corresponde al proceso en donde se liberan los azúcares y la fermentación es donde se convierten esos azúcares en etanol<sup>107</sup>.

En la Figura 9 se presentan los procesos para la obtención de bioetanol. Una parte muy importante es la producción de co-productos de biorefinería<sup>108</sup>, lo cual provocará un excedente, el cual permitirá disminuir en forma considerable los costos de producción.

Los procesos principales de la producción de bioetanol son los siguientes<sup>109</sup>:

- Molienda o reducción de tamaño.
- Pretratamiento de la biomasa: la celulosa y hemicelulosa son liberadas de la lignina y la hemicelulosa es convertida a azúcar C5.
- Hidrólisis con enzimas: La celulosa se convierte a glucosa (azúcar C6).
- Fermentación de azúcares: Las azúcares C5 y C6 son convertidas en bioetanol.
- Recuperación del etanol: Tras la fermentación se forma un mosto que se concentra por destilación para obtener alcohol hidratado (con aproximadamente 5% de agua). Para obtener el alcohol absoluto (99%), se realiza un proceso específico de deshidratación.
- Tratamiento de aguas y sólidos: Tratar los RILes y RISEs en forma correcta.

---

107 Fransson, G. *et al.* 2000.

108 Mas detalle de biorefinería en Capitulo 11 de definiciones.

109 PICCOLO, C, 2007.

La hidrólisis puede ser realizada con ácidos minerales o enzimas celulasas (que convierten la celulosa en azúcares simples). El proceso realizado con enzimas es más económico y tiene mejores proyecciones de disminución de los costos, debido a los avances en tecnología e investigación.

Otro proceso completamente distinto utiliza la gasificación de la biomasa. Ésta alternativa ha sido desarrollada por privados, por lo que no es de conocimiento público. Aún se considera la utilización de enzimas como la opción más económica de producción de bioetanol.

Las etapas de hidrólisis y fermentación se pueden configurar de distintas formas. Aún no se conoce la línea de procesos óptima, pero están siendo investigadas a través de plantas piloto. Las configuraciones son<sup>110</sup>:

- Hidrólisis y Fermentación Secuencial (SHF): Las azúcares C5 y C6 son sacarificadas y fermentadas en distintos reactores.
- Sacarificación y Fermentación Simultáneas (SSF): La hidrólisis y fermentación del azúcar C6 son realizadas en el mismo reactor, en forma simultánea.
- Sacarificación y Co-Fermentación Simultáneas (SSCF): La hidrólisis y la fermentación de los azúcares C5 y C6 son en el mismo reactor.
- Bioproceso Consolidado (CBP): El bioetanol y todas las enzimas requeridas son producidas en un solo reactor.

La tecnología que tendrá el proceso será el de SSF y se escoge debido a sus características de simultaneidad, lo cual disminuye los costos de la planta. Ésto debido a que al realizar la sacarificación y fermentación por separado se necesitaría del doble de equipos para esta finalidad, aumentando el costo de la planta. Además se desea fermentar solo los azúcares C6 y así no aumentar el costo de las enzimas asociadas a la fermentación que se utiliza para fermentar tanto azúcares C5 y C6.

#### **5.4.2. Descripción del Proceso Productivo Elegido**

A continuación se describirá proceso a proceso la planta diseñada conceptualmente durante este trabajo por el autor, analizando los procesos elegidos<sup>111</sup>, sus características y el por qué de su elección. En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo, el cual enumera los procesos utilizados con los flujos correspondientes.

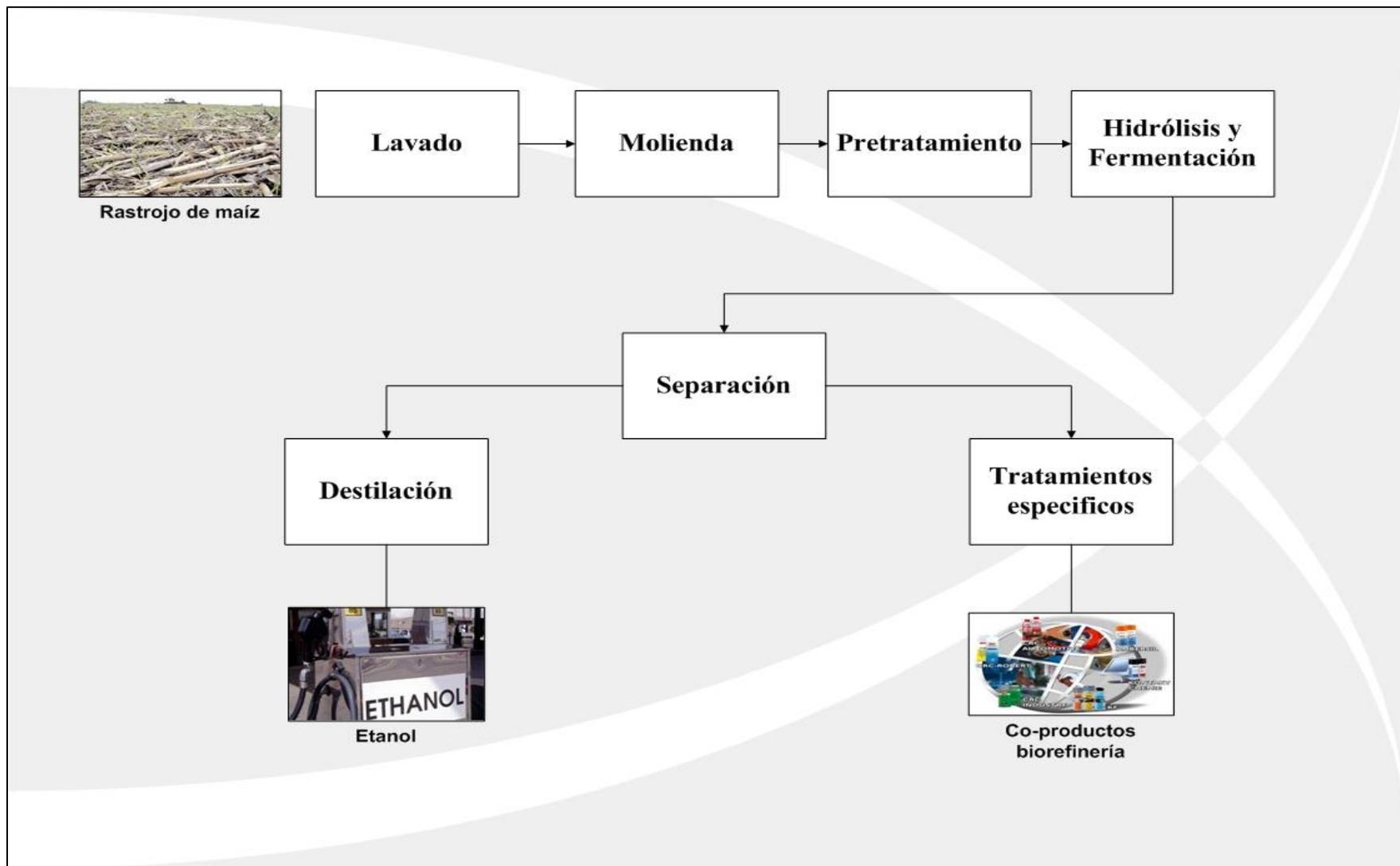
A su vez en la Tabla 8 se muestran algunas propiedades fisicoquímicas de los principales compuestos que participan en el proceso.

---

110 Pereira, N. 2006.

111 Margeot, A *et al.* 2000.

Figura 9: Diagrama de bloques del proceso en estudio



Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Propiedades fisicoquímicas de algunos compuestos

	PM <sup>112</sup> [g/mol]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Punto de fusión [°C]	Punto de ebullición [°C]
Lignina	28.000	1.060	-	-
Celulosa	180,16	1.540	260	Descompone
Xilosa	150,13	1.525	144	230
Arabinosa	150,13	1.500	158	Descompone
Galactosa	180,16	1.653	-273,15	-273,15
Manosa	180,16	1.644	-273,15	-273,15
Agua	18	998	-	100
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	94	1.787	10	337
Etanol	46	789	-114,3	78,4
CO <sub>2</sub>	42	2	-78	-57
Celluclast 1,5L	-	1.200	-	-
Novozymes 188	-	1.180	-	-
Xilitol	152,15	1.520	96	216
Biomasa	-	1.200	-	-

Fuente: Elaboración propia

- **Lavado (D0)<sup>113</sup>:** Durante este proceso en donde se lava el material para su posterior tratamiento. Es aquí en donde se aspira y filtra el material recibido, para así eliminar impurezas tales como polvo, piedras y arena que pudiese traer consigo la materia prima. Este paso tiene como fin eliminar partículas que pudiesen ser nocivas para los siguientes procesos, purificando así la materia prima. Los equipos utilizados en esta etapa fueron elegidos según las características de las impurezas, ya que el filtro separa elementos de mayor tamaño como las piedras, y la aspiradora extrae aquellos de menor tamaño, tales como la arena y el polvo.
- **Molienda (D1)<sup>114</sup>:** Este proceso es utilizado para la reducción del tamaño de la materia prima, para así poder realizar los siguientes procesos en condiciones óptimas. En el caso particular del proceso seleccionado, se utiliza un molino de bolas vibratorias, el cual reduce a polvo la materia prima mediante la rotación y vibración de un tambor que contiene bolas de acero. La característica de éste es reducir el material desde un tamaño de 10 a 30 mm a uno de aproximadamente 3,2 mm. Éste fue elegido justamente por el tamaño final del material, necesario para la realización de las siguientes etapas.
- **Impregnación con ácido (D2):** En este proceso el material es impregnado con ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), con la finalidad de acondicionar el material para su posterior rompimiento. El ácido sulfúrico se agrega diluido en agua al 1 % (p/p) el cual se agrega al material en una proporción 2:1, es decir una razón de dos medidas de ácido sulfúrico

112 PM: Peso Molecular

113 Hervé, J. 2007.

114 Sun, Y. *et al.* 2002.

diluido en agua por una medida de material a 600 psi. Este proceso fue elegido debido a que la bibliografía estudiada<sup>115</sup> así lo recomienda para el caso específico de la materia prima y su posterior rompimiento.

- **Explosión a vapor (D3):** Este proceso, más conocido como *steam explosion*, realiza el rompimiento del material, separando los compuestos para su posterior tratamiento. En esta etapa, la lignina, el material hemicelulósico, la celulosa y otros compuestos son separados, debido a la reacción que ocurre tras recibir vapor de agua a alta temperatura. El material es afectado por el vapor de agua a una temperatura de 190°C por 90 segundos, logrando un rendimiento de rompimiento aproximado de 90 %<sup>116</sup> a 600 psi. Cabe mencionar que un porcentaje significativo del material es transformado en inhibidores<sup>117</sup>, los cuales serán separados en procesos posteriores. Al igual que la impregnación con ácido, la explosión a vapor fue elegida por características específicas mencionadas en la bibliografía estudiada, ya que ambos procesos están muy relacionados uno con el otro.

**Filtro sólido/líquido (D4)<sup>118</sup>:** La finalidad de este filtro es separar los inhibidores del flujo principal para su posterior tratamiento. En esta etapa se separan dos flujos; los sólidos, en donde se encuentra el material que se destinará al proceso de SSF y el flujo líquido, el cual está compuesto mayoritariamente por agua y los inhibidores. Ésto es realizado por un filtro rotatorio continuo, con un tamaño de poro de 2 mm, el cual separa la entrada en dos flujos, sólido y líquido. Este equipo fue elegido por sus características específicas, las que permiten separar ambas fases con un rendimiento aproximado de 90 %.

- **Pre-Inóculo (D15):** En este reactor se realiza el pre-inóculo de las levaduras (*S. cerevisiae*), el cual se rige por la cinética de Monod. La ecuación de Monod (Ecuación 3) entrega el  $\mu_{max}$  (máximo específico de crecimiento [1/hr] igual a 0,525), usado en la ecuación de crecimiento batch para la levadura (Ecuación 4). Con esto se caracteriza la producción de levadura.

$$\mu_s = \mu_{max} * \left[ \frac{S_s}{K_s + S_s} \right] \text{ (Cinética de Monod)} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$X_f = x_0 * e^{\mu_{max} * t} \text{ (Ecuación de crecimiento batch)} \quad \text{Ec. (4)}$$

---

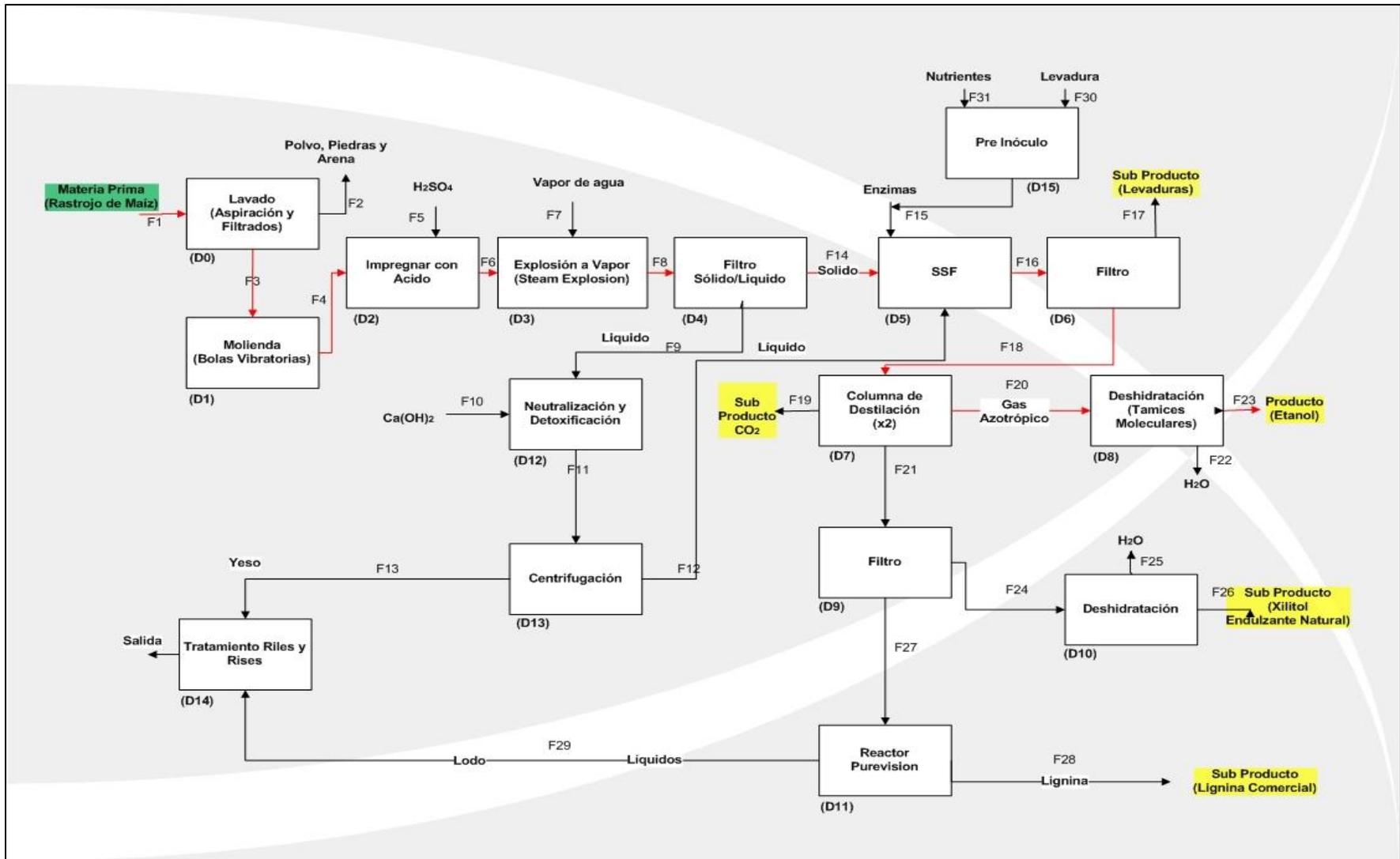
115 Tucker, M. *et al.* 2003.

116 Ballesteros, M. *et al.* 2006.

117 Lio, C. 202.

118 Tucker, M. *et al.* 2003.

Figura 10: Diagrama de flujo



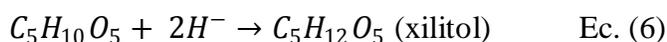
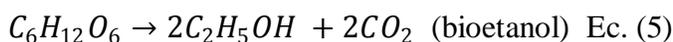
Fuente: Elaboración propia en base a estudios asociados

Tabla 9: Flujos involucrados en el diagrama de flujo [Kg/día]

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24	F25	F26	F27	F28	F29	F30	F31	
Lignina	114.842	13	114.829	114.255		113.684		113.115						112.550		111.987		111.427		11	110.304	11		3	3		109.750	108.653	549			
Celulosa	349.279	30	349.249	347.503		345.765		313.073	23.480		23.363	23.013	234	288.027		17.362		17.275		2	17.101	2					17.015	85	16.845			
Xilosa	191.488	11	191.477	190.520		189.567		152.782	6.875		6.841	6.465	342	145.143		82.511		82.098		8	81.271	8		2	2		80.863	404	80.054			
Xilitol																35.122		34.947		3	34.595	3		31.132		30.976	3.290	16	3.257			
Arabinosa	46.684	11	46.673	46.439		46.207		37.241	1.676		1.667	1.576	83	35.379		28.673		28.530		3	28.242	3		1	1		28.100	141	27.819			
Galactosa	24.615	11	24.604	24.481		24.359		22.056	1.654		1.646	1.621	16	20.291		17.159		17.073		2	16.901	2					16.816	84	16.648			
Manosa	10.610	11	10.599	10.546		10.493		9.501	713		709	698	7	8.741		7.392		7.355		1	7.281	1					7.244	36	7.172			
Ceniza	28.265	11	28.254	28.113		27.972		27.832						27.693		27.555		27.417						1	1		27.007	135	26.737			
Extraíbles	83.012	5	83.007	82.592		82.179		81.768	80.542		80.139	17.230	62.508	818		17.957		17.868									17.600	88	17.424			
Agua	94.311	13	94.298	93.826	1.876.549	1.969.906	2.546.932	4.506.989	4.033.755		4.013.586	1.826.182	2.167.337	450.699		2.265.496		2.254.169		22.429	2.209.254	22.295	10	55	55		2.198.153	10.991	2.176.171			
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>					19.891	19.792		19.693	1.871		1.861		1.852	17.724		17.635		17.547										17.285	86	17.112		
Inhibidores								78.644	74.319		73.947	1.109	72.468	3.932		5.016		4.991									4.916	25	4.867			
Etolanol																186.950		186.016		183.235	925		182.320				921	5	912			
CO <sub>2</sub>																152.410		151.648	150.889													
Celluclast 1,5L															23.042	2.981		2.966										2.921	15	2.892		
Novozymes 188															14.514	1.877		1.868										1.840	9	1.822		
S. cerevisiae															22	4.258	4.237														0,1	
Nutrientes															6.402	2.994		2.979										2.934	15	2.905		18
Residuos	104.790	104.790														32.511		32.348		290	31.736	22.613		1	1		31.576		31.418			
Ca(OH) <sub>2</sub>										49.854	49.854		49.604																			
Glucosa																																4
Flujo Total	1.047.895	104.906	942.990	938.275	1.896.441	2.829.925	2.546.932	5.362.694	4.224.884	49.854	4.253.614	1.877.893	2.354.452	1.110.996	43.981	3.017.846	4.237	2.998.520	150.889	205.983	2.612.491	45.225	182.330	31.194	62	30.976	2.568.233	120.787	2.434.605	0,1	22	
Temperatura (°C)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	80	80	25	25	25	35	35	25	25	45	45	45	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Presión (psi)	14,7	14,7	14,7	14,7	600	600	600	600	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7

Fuente: Elaboración propia

- **SSF (D5)<sup>119</sup>**: Como ya se mencionó anteriormente, el proceso SSF (sacarificación y fermentación simultánea) tiene como objetivo realizar la hidrólisis y la fermentación en el mismo reactor. Este proceso recibe los azúcares, liberándolos a través de la sacarificación y luego los convierte en bioetanol, con una conversión de 51% de glucosa a bioetanol y un rendimiento del 89%. La temperatura a la que debe estar el reactor es de 35°C y el tiempo de residencia es de aproximadamente 96 horas. Además de la elaboración de bioetanol, se producen subproductos tales como el xilitol (con una producción de 44 g/l de solución y obteniendo los hidrógenos de los nutrientes de la biomasa), que posteriormente será aislado y comercializado como endulzante natural. Para realizar la hidrólisis y la fermentación es necesario agregar levaduras (*S. cerevisiae*)<sup>120</sup>, proveniente del pre-inóculo, enzimas (Celulasas) y nutrientes (proporcionados por la biomasa), los cuales son fundamentales para provocar la reacción deseada. Por otro lado este proceso produce CO<sub>2</sub> y residuos, los cuales deberán ser separados en procesos posteriores. Este proceso fue elegido debido a la característica de simultaneidad, lo cual aporta significativamente al momento de analizar los costos asociados a la planta. A continuación se muestran las reacciones asociadas a la producción de bioetanol y xilitol:



- **Filtro (D6)**: Su finalidad es separar la levadura (*S. cerevisiae*) del flujo principal para así poder comercializarla. Ésto es realizado por un filtro de prensa tipo *batch*, que separa la levadura del resto del flujo con una eficiencia aproximada del 95 % [peso/peso], a través de poros de 25 mm. Este equipo fue elegido por sus características específicas, las cuales permiten separar la levadura de la corriente principal, con un posterior secado.
- **Columna de destilación (D7)<sup>121</sup>**: Esta etapa consta de dos columnas de destilación (columna de destilación binaria), las cuales están compuestas por platos perforados y campanas burbujeadoras. Estas columnas separan los flujos de entrada con lo que se obtiene el CO<sub>2</sub> y el bioetanol producido en la fermentación. La primera columna de destilación separa el CO<sub>2</sub> del resto de los productos de la corriente. En la segunda columna de destilación se obtiene el bioetanol, para luego deshidratarlo y comercializarlo. El proceso consta de dos columnas de destilación debido a la característica azeotrópico del bioetanol. Según la literatura la eficiencia de esta etapa permitiría recuperar el 99,5 % del bioetanol producido, sin embargo, para ser más realista, se consideró una recuperación de 99 %. El tiempo de residencia es de aproximadamente una hora, con temperaturas que superen el punto de ebullición del etanol (78°C), pero inferiores al punto de ebullición del agua (100°C), logrando así separar estos dos flujos.
- **Deshidratación (D8)**: Este proceso tiene como finalidad deshidratar el agua contenida en el bioetanol. Para ésto se debe utilizar tamices moleculares, que adsorben el agua

---

119 Ohgreb, K *et al.* 2007.

120 Sun, Y *et al.* 2002.

121 Elaboración propia

contenida en el bioetanol. Este proceso tiene una eficiencia de 99 %, lo cual permite extraer casi la totalidad del agua presente en el bioetanol y lograr así las especificaciones de calidad de éste. El agua es desechada, debido a que no es significativa para ser reutilizada.

- **Filtro (D9):** La finalidad de este filtro es separar el xilitol del flujo principal, para así poder ser comercializado. Ésto es realizado por un filtro de membrana, el cual separa el xilitol del resto del flujo con una eficiencia aproximada del 90 %. Es importante mencionar que este filtro es un equipo único en su diseño en el mundo, que está siendo desarrollado en forma confidencial por USDA<sup>122</sup> en conjunto con el Instituto Politécnico de Virginia, por lo que se desconoce todas las especificaciones del equipo. Éste fue elegido por sus características específicas, que permiten separar el xilitol de la corriente principal.
- **Deshidratación (D10):** Este proceso es idéntico al proceso D8, con la única diferencia que el material deshidratado es xilitol. El agua es desechada, debido a que no es significativa para ser reutilizada.
- **Reactor Purevision (D11)<sup>123</sup>:** Este proceso tiene la finalidad de separar la lignina de la corriente principal. Ésta es una tecnología bastante nueva, que está siendo desarrollada por la empresa Purevision Technology a nivel de laboratorio. Por ello no se cuenta muchas especificaciones del equipo, pero sí se conoce la eficiencia de éste, que alcanza un 90 % (p/p). Claramente este equipo fue elegido por sus características en lo que a separación de lignina respecta.
- **Neutralización y detoxificación (D12)<sup>124</sup>:** Este proceso tiene como finalidad detoxificar y neutralizar, por medio del hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), los inhibidores producidos en la explosión a vapor. Las cantidad de hidróxido de calcio es de 1,2 % (p/p) con respecto al total del material que ingresa en este proceso. El tiempo de residencia es de dos horas, a una temperatura de 80°C. Tras realizar este proceso el material podrá ser separado en dos flujos: RISEs y líquido.
- **Centrifugado (D13):** Este proceso logra separar el flujo principal, proveniente de la neutralización y detoxificación, en dos flujos: uno que contiene material sólido (yeso) y otro que contiene material líquido, el cual será recirculado al proceso SSF. Con esto se intenta optimizar el proceso, aprovechando al máximo la celulosa y los compuestos de la hemicelulosa que quedaron en el flujo que fue neutralizado y detoxificado.
- **Tratamiento de RILes y RISEs (D14):** Este proceso consiste en almacenar tanto los residuos líquidos como los sólidos, con la finalidad de externalizar su tratamiento a otra empresa. Hay que recalcar que solo se almacenan los residuos, el tratamiento se externaliza a un tercero, el cual lo retira oportunamente.

---

122 USDA: United States Department of Agriculture

123 [www.purevision.com](http://www.purevision.com)

124 Cantarella, M. *et al.* 2003

### 5.4.3. Balance de Masa

Para realizar el balance de masa de la planta conceptual del proyecto, se realizó un estudio bibliográfico de los procesos involucrados, los cuales están descritos en el Capítulo 5.4.2. Este está ampliamente desarrollado en el Anexo 21, en donde se toman especificaciones del punto anterior. A continuación se muestran algunas tablas resumen del balance de masa (operando la planta durante 330 días del año, 24 horas al día), en donde se podrá ver los flujos del proceso, un detalle de los flujos importantes y una relación del rendimiento de la materia prima con respecto a los productos de la biorefinería.

Tabla 10: Resumen de flujos del proceso

Resumen de Flujos [Kg/día]											
Flujo	Presión [psi]	T [°C]	Flujo	Presión [psi]	T [°C]	Flujo	Presión [psi]	T [°C]	Flujo	Presión [psi]	T [°C]
F1	1.047.895	14,7	25	F12	1.877.893	14,7	25	F23	182.342	14,7	25
F2	104.906	14,7	25	F13	2.354.452	14,7	25	F24	31.196	14,7	25
F3	942.990	14,7	25	F14	1.110.996	14,7	25	F25	64	14,7	25
F4	938.275	14,7	25	F15	43.981	14,7	35	F26	30.976	14,7	25
F5	1.896.441	600	25	F16	3.017.846	14,7	35	F27	2.568.233	14,7	25
F6	2.829.925	600	25	F17	4.237	14,7	25	F28	120.787	14,7	25
F7	2.546.932	600	25	F18	2.998.520	14,7	25	F29	2.434.605	14,7	25
F8	5.362.694	600	25	F19	150.889	14,7	45	F30	0,09	14,7	25
F9	4.224.884	14,7	25	F20	205.984	14,7	45	F31	22	14,7	25
F10	49.854	14,7	80	F21	2.612.491	14,7	45				
F11	4.253.614	14,7	80	F22	22.613	14,7	25				

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Flujos importantes del proceso

Flujos importantes		
Flujos	Kg/día	Tipo
F1	1.047.895	Rastrojo Maíz
F16	150.889	CO <sub>2</sub>
F17	4.237	Levadura
F23	182.342	Etanol
F26	30.976	Xilitol
F28	120.787	Lignina

Fuente: Elaboración propia

Al revisar la Tabla 12, se puede apreciar que de 1 tonelada de materia prima se obtiene 227 litros de bioetanol. Esto no dista considerablemente de lo mencionado en bibliografía asociada, ya que ésta estipula una relación de 300 litros de bioetanol por tonelada de materia prima. Es importante señalar que esta relación varía según la composición de la materia prima utilizada en cada proceso, lo cual puede aumentar o disminuir el rendimiento señalado por la bibliografía.

Tabla 12: Relación materia prima con productos

Relación con respecto a la materia prima	
Materia prima	Cantidad
Rastrojo Maíz [Ton]	1
Etanol [Litros]	227
Levadura [Kg]	6
Xylitol [Kg]	31
Lignina [Kg]	111
CO <sub>2</sub> [ton]	0

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.4. Dimensionamiento de los equipos

##### Reactores

En el caso de los estanques se dimensionó a través de los flujos que necesitarían estos, con lo cual se dimensiono su volumen y dimensiones, siempre tomando en cuenta el tiempo de residencia de cada equipo.

Debido al efecto corrosivo que particulariza al proceso de producción de bioetanol, se recomienda seleccionar equipos de acero inoxidable para aquellas etapas que contengan bioetanol o ácido sulfúrico en sus corrientes. Los diámetros y alturas de los reactores fueron estimados considerando una relación diámetro: altura como 1:3. Las cifras de diseño se pueden apreciar en el Anexo 21.

##### Columna de destilación

El equipo usado para separar la mezcla etanol-agua fue una columna de destilación binaria, con platos perforados y campanas burbujeadoras.

La entrada se hace por platos intermedios, llamado de alimentación. La parte superior a la alimentación se llama “enriquecimiento” y la parte posterior se llama “agotamiento”.

Se supone la entrada a 30°C y la temperatura a la que se debe llevar la mezcla es 97,6°C, mientras que se aproximaron las fracciones molares de entrada del etanol a 0,07 y de agua a 0,93. La fracción molar en el destilado es 0,88 para el etanol y 0,12 para el agua. En el *stillage*, la fracción molar de etanol es 0,04 y de agua es 0,96. Esto se puede apreciar en la

Tabla 13, la cual se muestra a continuación.

Tabla 13: Fracciones molares de corrientes de destilación

	Alimentación $z_f$	Producto Cabeza $\chi_d$	Producto Cola $\chi_b$
Agua	0,93	0,12	0,96
Etanol	0,07	0,88	0,04

Fuente: Elaboración propia

Si se conoce la composición y temperatura del flujo que entra a la columna, se puede aplicar el método gráfico Mc Cabe-Thiele<sup>125</sup> para determinar el número de platos que componen la columna. Se grafican las líneas de operación en el diagrama (x,y). El eje X representa la fracción molar de etanol en la fase líquida de la mezcla etanol-agua, mientras que el eje Y representa la fracción molar de etanol en la fase vapor. Todo esto se grafica a partir del diagrama de equilibrio para gases azeotrópico, utilizando la metodología antes descrita.

En Anexo 9 se muestra el gráfico trazado, que incluye las curvas de operación de enriquecimiento y agotamiento. A partir de este gráfico (analizándolo computacionalmente) se obtuvo que la columna de destilación debiera tener 40 platos para cumplir con las condiciones impuestas para el diseño de la etapa. Debido a las condiciones corrosivas que presenta el etanol, se recomienda utilizar este equipo de acero inoxidable. Las dimensiones se pueden apreciar con mayor detalle en el Anexo 21, en donde se especifican los detalles de éste.

### Otros equipos

Además de los reactores y la columna de destilación, existe una serie de equipos a los cuales se les realizó un dimensionamiento. Dentro de estos equipos están los filtros, centrífugas, deshidratadores, tanques, silos y molinos, los cuales fueron dimensionados a través de sus respectivas ecuaciones de diseño. A continuación se enumerarán las ecuaciones de diseño para cada tipo de equipo:

- **Filtro rotatorio:**  $t = \left(\frac{V}{A}\right)^2$ , en donde t es el tiempo de residencia, V el volumen del filtro, A es el área del filtro y está asociado a una constante para este tipo de filtro.
- **Filtro de prensa:** Se realizó a través de tablas de diseño para filtros de prensa<sup>126</sup>.
- **Centrifuga:**  $\left(\frac{Q}{\eta*\Sigma}\right)_{tipo\ 1} = \left(\frac{Q}{\eta*\Sigma}\right)_{tipo\ 2}$ , en donde Q es el flujo volumétrico,  $\eta$  es la eficiencia y  $\Sigma$  es una constante que depende del tipo de centrifuga utilizada. En este caso se escaló a partir de otra centrifuga de menor dimensión.

125 Método utilizado para el cálculo de los platos de un destilador  
126 Tablas en [www.acsmedioambiente.com](http://www.acsmedioambiente.com)

- Deshidratador:  $Q = \frac{V}{\tau}$ , en donde Q es el flujo volumétrico, V el volumen y  $\tau$  el tiempo de residencia.
- Tanques y Silos: estos fueron dimensionados usando criterios de personas expertas en la materia<sup>127</sup>.
- Molino de bolas vibratorias:  $Vc = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$ , en donde Vc es la velocidad crítica y D el diámetro del molino.

A continuación se aprecian las dimensiones de los equipos.

Tabla 14: Dimensionamiento tanques y silos

Tanques y Silos			
Tipo	Volumen [m3]	L. A. o H. [m]	Diámetro [m]
Silo Materia Prima (S0)	418	8,61	8,61
Tanque H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (T1)	17	7,46	2,99
Tanque Ca(OH) <sub>2</sub> (T2)	20	7,27	2,91
Silo Agua (S3)	1.167	18,11	9,06
Tanque Etanol (T4)	227	11,06	4,42
Tanque Xilitol (T5)	24	7,75	3,10
Tanque Lignina (T6)	102	8,65	3,46
Silo Riles y RIses (S7)	582	9,05	9,05
Tanque Levadura (T8)	0,00013	0,16	0,06
Tanque Levadura I (T9)	6	3,49	1,40
Tanque Enzima (T10)	47	4,83	1,93
Tanque Nutrientes (T11)	135	8,63	3,45
Tanque CO <sub>2</sub> (T12)	138	5,48	2,19

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15: Dimensionamiento equipos

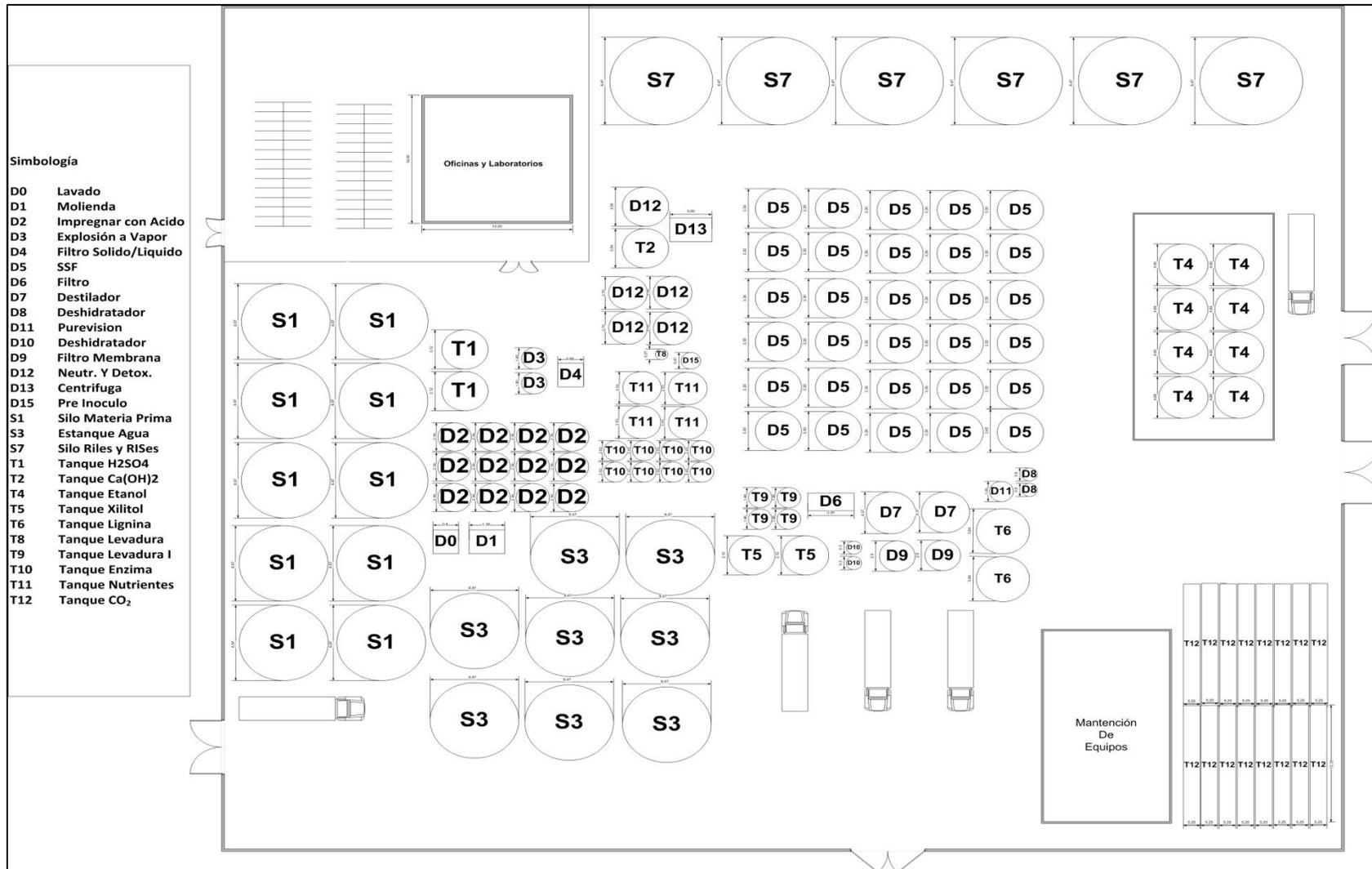
Equipos			
Tipo	Volumen [m3]	Largo, Ancho o Alto [m]	Diámetro [m]
Lavado (D0)	418,36	0,71	0,6
Molienda (D1)	17,41	1,37	1,05
Impregnar con Acido (D2)	20,15	6,50	2,17
Explosión a Vapor (D3)	1166,67	4,91	1,64
Filtro Solido/Liquido (D4)	226,54	0,59	0,6
SSF (D5)	24,34	11,09	3,698
Filtro (D6)	101,59	3,33	-
Destilador (D7)	581,69	24,40	4,37
Deshidratador (D8)	0,00	2,38	0,795
Purevision (D11)	5,93	8,64	2,879
Deshidratador (D10)	47,30	1,12	0,373
Filtro Membrana (D9)	134,67	2,00	1,788
Neutr. Y Detox. (D12)	0,00	7,88	2,626
Centrifuga (D13)	82,033	3	0,93
Pre Inoculo (D15)	0,006	0,41	0,14

Fuente: Elaboración propia

#### 5.4.5 Layout de la Planta

A continuación se muestra el *layout* de la planta, el cual se hizo bajo el dimensionamiento realizado en el capítulo anterior. El área total de la planta es de 5.700 m<sup>2</sup>, lo que incluye la planta en sí, oficinas, estacionamientos, áreas de carga y descarga y zona de mantención de equipos.

Figura 11: Layout de la planta



Fuente: Elaboración propia

## 6. ESTUDIO ECONÓMICO

### 6.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento a utilizar es la obtención del costo de producción de bioetanol, para así determinar el potencial del negocio en el mercado y a su vez analizar ciertos parámetros, los cuales tienen un gran impacto en el estudio económico.

La inversión en el proyecto se determina a través del costo de los equipos y el costo de capital. Se realiza el flujo de caja para obtener el costo del etanol, calculado como el precio mínimo de venta para que el valor presente neto del proyecto sea nulo.

El estudio económico aquí efectuado se basa en las estimaciones realizadas por el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE), principalmente en los estudios efectuados por la NREL (National Renewable Energy Laboratory). No se incluye en el estudio los posibles costos asociados a restricciones de patentes.

El estudio económico completo está evaluado en dólares a Noviembre de 2009. Para ésto se hizo las correcciones respectivas. Se considera que 1 dólar equivale a 525 pesos chilenos, debido a que este es el precio promedio del dólar durante los meses de investigación de este trabajo (agosto y diciembre del 2009).

### 6.2. EQUIPOS

Debido a que la tecnología requerida para este tipo de proyectos no está disponible para personas ajenas a las empresas que la desarrollan<sup>128</sup>, el costo de los equipos se estimó mediante cotizaciones de los equipos dimensionados en el punto 5.4.4. Esta cotización fue realizada a través de la página de internet de la empresa Matche<sup>129</sup>, en donde se obtuvo el precio FOB 2007 de los equipos, silos y tanques<sup>130</sup>.

Luego se reactualizaron los costos de los equipos al 2009, utilizando la ecuación que actualiza los costos de los equipos por época:

$$\frac{Ca}{Cb} = \frac{Ia}{Ib}$$

En la cual:

Ca: Costo de un equipo en la fecha actual (2009).

Cb: Costo de un equipo en una fecha pasada (2007).

Ia: Índice de precios actual (2009).

Ib: Índice de precio de una fecha pasada (2007).

---

128 Empresas como Iogen, BRI o ETEK

129 [www.matche.com](http://www.matche.com)

130 Ver Anexo 10

Esta ecuación utiliza el índice de Marshall and Swift, el cual es publicado bimensualmente en la revista Chemical Engineering, revista que está disponible en línea<sup>131</sup>. Los índices correspondientes a los años de interés se muestran en la Tabla 16, con los cuales se obtiene el costo de los equipos para el año 2009<sup>132</sup>.

Tabla 16: Índice de Marshall and Swift

Índice M & S	
Año	Índice
2007	1373
2009	1477

Fuente: www.che.com

Posteriormente se debe obtener los costos CIF (Cost, insurance and freight, o costo, seguro y flete) de los equipos. Para esto se consultó con el Sr. Rodrigo Torres, el cual posee una vasta experiencia en el rubro del transporte marítimo. Él indicó que los costos asociados al flete marítimo, costo de desembarco, arancel, seguros y transporte al lugar de la planta corresponden a un 30% del costo FOB (*free on board* o libre a bordo) de los equipos. En la Tabla 17 se aprecia un resumen del costo de capital<sup>133</sup> y el total de costos de equipos no instalados (TCNE).

Tabla 17: Costo de capital

Tipo	Costo de Capital 2009 [US\$ millones]
Equipos	49,8
Silos	3,9
Tanques	13,9
<b>Total costo equipos no instalados (TCNE)</b>	<b>67,7</b>

Fuente: Elaboración propia

El costo total de los equipos asciende a 67,7 millones de dólares del 2009, en donde los fermentadores y reactores son los equipos de mayor costo. Otros equipos que poseen un costo considerable son algunos tanques y silos que necesita el proceso, los cuales podrían ser comprados, fabricados e instalados a un menor costo por proveedores en Chile<sup>134</sup>.

Para conocer la inversión total del proyecto se utilizó la misma metodología que en el estudio de KIM y HAYES.2006<sup>135</sup>, el cual se basa en los estudios del laboratorio NREL del Departamento de Energía de EE.UU. (DOE). En Chile no es usual utilizar esta metodología pero debido a la

131 www.che.com

132 Ver Anexo 11

133 Ver detalle en Anexo 12

134 Observaciones de empresa Luigi en una estimación de una planta de etanol de maíz en Chile.

135 Ver bibliografía numero 32

característica exploratoria de la investigación, y a que la tecnología aún no está disponible, no es recomendable usar otros métodos.

En la Tabla 18 se consideran los costos directos e indirectos de la construcción de la planta:

Tabla 18: Inversión

	Índice	[US\$ MM]
<b>Total Costos de equipos no instalados (TCNE)</b>		<b>67,7</b>
Transporte e instalación	1,42*TCNE	96,1
<b>Total Costos de equipos instalados (TCE)</b>		<b>96,1</b>
Bodega	1,5%TCE	1,4
Preparación del sitio	9%TCE	0,9
<b>Total de Costos de Instalación (TCI)</b>		<b>98,4</b>
<b>Costos indirectos</b>		
Costos prorrateables	10% TCI	9,8
Gastos de campo	10% TCI	9,8
Construcción	25% TCI	24,6
Proyecto de contingencia	3% TCI	3,0
<b>Total de inversión de capital (TIC)</b>		<b>145,7</b>
Otros costos (incluido terreno e importación de equipos)	10% TIC	14,6
<b>Total de inversión del proyecto</b>		<b>160,3</b>

Fuente: Elaboración propia basado en estudio KIM y HAYES. 2006. EE.UU.

El factor de instalación se aplica al precio de venta del equipo, el cual se utiliza para estimar los costos necesarios para la disposición de un equipo y dejarlo operando. El promedio de los factores de instalación de los equipos de la planta es 1,42<sup>136</sup>. Con esto se puede obtener el total de costos de equipos instalados (TCE), que asciende a US\$ 96,1 millones.

El Total de Costos de Instalación (TCI) corresponde a los costos de equipos instalados (TCE), la bodega (para repuestos de los equipos y las herramientas relacionadas) y la preparación del sitio. Los costos asociados a la bodega corresponden a un 1,5% del TCE y la preparación del sitio, el cual incluye los caminos, estacionamientos y pavimentación, corresponde a un 9% del TCE. El TCI es de US\$ 98,4 millones.

Los costos indirectos se estiman como el 48% del TCI; incluyen los costos prorrateables (compensaciones adicionales a los salarios, cargas y seguros de los contratistas de la construcción), gastos del campo (equipos pequeños, facilidades de construcción temporales y supervisión de la construcción), construcción, cañerías y proyecto de contingencia. Éstos alcanzan US\$ 47,3 millones.

---

<sup>136</sup> Wooley, R. 1999.

El Total de Inversión de Capital (TIC) es US\$ 145,7 millones y corresponde a la suma de TCI con los costos indirectos.

Los costos asociados al terreno (desde comprar el terreno, los permisos y los derechos de paso), los asociados a la importación de los equipos (incluyendo transporte, impuestos y tasas de importación) y otros costos extras de la construcción (como los vehículos de planta, los costos de puesta en marcha y las horas extra durante la construcción) se estiman como el 10% del Total de Costo de Inversión (TIC), alcanzando los US\$14,6 millones.

De esta forma el Costo Total de la Inversión del Proyecto es US\$ 160,3 millones. Al comparar éste resultado con otros estudios, se puede ver que el costo total de inversión es similar a otras plantas estudiadas. Al realizar la comparación, es necesario ver la capacidad de esta y su inversión y luego realizar la comparación. En la tabla se puede apreciar tal comparación.

Tabla 19: Comparación de plantas de etanol celulósico

Planta	Capacidad [m <sup>3</sup> /año]	Costo inversión total [US\$MM]
Estudio propio	75.000	160
NREL and Harris Group	80.000	201
TOMSA <sup>137</sup>	80.000	190
LLYND, L <sup>138</sup>	228.000	540

Fuente: Elaboracion propia

## 6.3. COSTOS OPERACIONALES

### 6.3.1. Costos Variables de Operación

Los costos variables de la planta son aquellos en los que se incurre sólo cuando se encuentra operando y dependen del nivel de producción. Incluyen los insumos, los costos de transformación, los costos del manejo de los residuos y los subproductos obtenidos.

Es relevante mencionar que con las investigaciones que se desarrollan a nivel mundial, el proceso para producir etanol a partir de material lignocelulósico está mejorando, con lo que se aumentaría la eficiencia y disminuirían los costos. Estas mejoras se podrían lograr debido principalmente a los avances desarrollados tras años de estudio de las enzimas que participan en el proceso, las que además de tener un menor precio, lograrían una conversión más eficiente de la materia prima lignocelulósica a bioetanol.

La planta operaría 330 días al año, ésto equivale a 7.920 horas y los 35 días restantes se realizan revisiones y mantenimientos de los equipos y la planta en general.

Para una planta de 74.760 m<sup>3</sup> de bioetanol al año, se producen aproximadamente 10 m<sup>3</sup> de etanol por hora. La materia prima (rastrojo de maíz), necesaria para alcanzar el nivel de producción es de 43,6 m<sup>3</sup>/hr.

137 Correa, T. 2008.

138 Llynd, L. 1996.

En la Tabla 20 se muestran los insumos necesarios para la producción de bioetanol y los co productos de la biorefinería. Las cantidades estipuladas se obtienen del balance de masa realizado en el punto 5.4.3. o por escalamientos de la planta de la NREL (diesel y electricidad). Al escalar a través de una planta de la NREL, se tiene como ventaja el conocimiento que ya posee esta empresa, pero como desventaja el hecho de que no es 100% fidedigno al estudio realizado. Pero como el estudio es exploratorio, se decidió hacer este tipo de escalamiento.

Para obtener los precios de los insumos, se realizaron búsquedas en distintos proveedores, los cuales pudiesen entregar los productos requeridos, o a través de la opinión de personas entendidas en la materia.

El precio del rastrojo de maíz fue obtenido bajo la opinión experta de José Antonio Valdes<sup>139</sup>, el cual estima un precio del insumo de 7,5 US\$/m<sup>3</sup>, debido al costo oportunidad que posee este material como fuente energética o calorífica. Además, se consideran los costos asociados al transporte y acumulación de la materia prima, lo cual se realiza en silos especializados. El precio del diesel a mayoristas es US\$1,17/kg y se calculó en base a la estructura de precios de ENAP (Empresa Nacional de Petróleo de Chile). En el caso del costo de la energía eléctrica, el precio ha ido en aumento en los últimos años, alcanzando \$44/kWh<sup>140</sup> en la actualidad. En el Anexo 13 se puede ver la evolución histórica del precio de la energía eléctrica en Chile. Se espera que el precio continúe en aumento.

Tabla 20: Insumos

Insumos	Unidad/hr	Unidad/año	US\$/Unidad	Costo Anual MMUS\$	Porcentaje [%]
Rastrojo de maíz [m <sup>3</sup> ] <sup>141</sup>	44	345.150	7,5	2,59	0,03
Agua [Kg]	184.312	1.459.748.875	0,00006	0,09	0,002
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> [Kg]	829	6.564.170	0,19	1,21	0,01
Celluclast 1,5 L [m <sup>3</sup> ]	0,88	6.937	2.745	19,04	0,28
Novozymes 188 [m <sup>3</sup> ]	1,09	8.671	2.745	23,80	0,38
<i>S. cerevisiae</i> [Kg]	0,004	31	8,00	0,0002	~0
Nutrientes [Kg]	0,93	7.343	0,36	0,003	~0
Ca(OH) <sub>2</sub> [Kg]	956	7.575.310	0,12	0,89	0,02
Diesel [Kg]	196	1.550.102	1,17	1,81	0,02
Electricidad [MWh]	5	39.917	58	2,32	0,04
Flete Rastrojo de maíz [Ton]	1.048	345.805	7,8	2,70	0,04
Tratamiento RILes y RISes [Kg]	96.148	31.728.820	0,40	12,70	0,18
Total (Sin electricidad)				49,45	
<b>Total</b>				<b>67,16</b>	<b>1,00</b>

Fuente: Elaboración propia, basado en NREL y expertos.

Algunos de los insumos tales como hidróxido de calcio y ácido sulfúrico, fueron cotizados en la empresa Oxiquim<sup>142</sup>, distribuidores y comercializadores de productos químicos. El costo de los

139 Área investigación CMPC

140 PMN Precio medio de mercado SIC, Fuente: www.cne.cl

141 Analizado en el punto 5.2

insumos pueden ser optimizados porque los volúmenes requeridos de algunos son muy altos y se puede hacer un contrato con el proveedor para disminuir su costo.

El costo de las enzimas fue obtenido a través de los datos obtenidos por la NREL<sup>143</sup>, quienes obtuvieron el precio de éstos para una planta piloto de características similares y luego se realizó un escalamiento para la planta en estudio. Cabe mencionar que el precio obtenido para las enzimas, está dentro del rango de 2 USD a 8 USD por galón de bioetanol producido<sup>144</sup>. Es importante al momento de realizar un estudio de sensibilidad, que este insumo tendiera a disminuir sus precios.

El costo de la levadura (*S. cerevisiae*) se obtuvo tras realizar una cotización en línea<sup>145</sup>, la cual entregó un costo promedio de este insumo de 8 US\$/Kg..

Algunos químicos y nutrientes (peptona y extracto de levadura) que se necesitan en menor volumen no se encuentran especificados en los estudios disponibles. Otros no se pudieron cotizar en Chile, por lo que se utilizó como referencia el precio de estos insumos en EE.UU. ajustados al año 2009 por el Índice de Precios para Químicos de EE.UU.<sup>146</sup>.

Para el caso de los costos asociados al tratamiento de RILes y RISes, se cotizó el valor de externalizar el manejo de estos residuos por kilogramo en la empresa Bravo Energy Chile S.A. Existe la posibilidad de hacer un pretratamiento de estos desechos, para así extraer el agua y otros nutrientes que se pudiesen reutilizar en el proceso. Pero debido a la gran variedad y cantidad de contaminantes presentes en el flujo, conviene más externalizar estos desechos que intentar separarlos y así disminuir posibles costos asociados a éste flujo.

Los costos asociados al transporte de la materia prima fueron tratados en el punto 5.2., en donde se especifica la obtención de este costo.

Es con ésto que se obtiene un total de US\$ 67,16 millones en costos anual de insumo, lo cual podría disminuir considerablemente si es que el costo de las enzimas desendería o por otro lado su rendimiento aumentase. Ésto es razonable, ya que se ha visto que ambos aspectos han evolucionado de forma positiva en los últimos años.

### **6.3.2. Costos Fijos de Operación**

Los costos fijos son los que se incurre independientemente del nivel de producción en que se encuentre la planta. Estos costos incluyen el sueldo de los trabajadores y los costos generales.

En la Tabla 21 se puede apreciar los recursos humanos y los sueldos líquidos asociados a cada recurso.

---

142 [www.oxiquim.cl](http://www.oxiquim.cl)

143 NREL, 2000.

144 Conversaciones con Dra. María Elena Lienqueo

145 [www.sciencestuff.com](http://www.sciencestuff.com)

146 Wooley, R. 1999. EE.UU.

Para determinar los recursos humanos de la planta se utilizó como referencia el estudio KIM, J. & HAYES, K.M., 2006, EE.UU., considerando que el tamaño de la planta es menor al del estudio tomado como referencia. Además se determinó los sueldos y el número de trabajadores en cada cargo a través de estudios realizados<sup>147</sup> por COPEC y Arauco para proyectos de similares características, adaptándose a las necesidades específicas de este proyecto.

Al operar la planta las 24 hrs. del día los 7 días de la semana es necesario que exista personal de recambio para completar los 4 turnos. El total de empleados de la planta es 53 y el costo total de los sueldos al año es de US\$917.000.

Los sueldos líquidos son una parte de los costos fijos de la planta; en la Tabla 22 se muestra cómo se estiman los otros costos fijos, en donde se especifica detalladamente cada ítem y su procedencia. Estos índices se basan en la metodología utilizada por la NREL en proyectos similares al de que se está realizando en esta memoria.

Tabla 21: Recursos humanos

	Sueldo mes [US\$]	Cantidad	Costo Total Anual [US\$]
Gerente General	4.000.000	1	91.429
Gerente de Administración y Finanzas	2.400.000	1	54.857
Jefe de Planta	2.400.000	1	54.857
Ingeniero de Planta	2.000.000	1	45.714
Ingeniero de Mantenimiento	1.800.000	1	41.143
Jefe de Personal	1.800.000	1	41.143
Jefe de Laboratorio	1.200.000	1	27.429
Jefe de Turno	800.000	5	91.429
Técnico de Laboratorio	600.000	2	27.429
Técnico de Mantenimiento	600.000	5	68.571
Operadores de Turno	500.000	25	285.714
Operario de Patio	450.000	5	51.429
Administrativos y Operarios	400.000	4	36.571
<b>Total Sueldos</b>	<b>18.950.000</b>	<b>53</b>	<b>917.714</b>

Fuente: Elaboración propia

La mantención de equipos se estima como el 2% del costo de los equipos instalados (US\$ 96,1 millones), es decir, US\$ 1,9 millones. Los gastos generales están directamente relacionados con los trabajadores de planta y se estiman como el 50% de los sueldos. El seguro de incendio tiene un costo de US\$295 mil al año, se estima como el 0,3% del costo total de instalación de la planta (el costo de los equipos instalados, la bodega y la preparación del sitio suma US\$ 98,4 millones).

147 Correa, T. 2008.

El total de costos fijos anuales de la planta es de aproximadamente US\$3,6 millones.

Tabla 22: Costos fijos de operación de una planta de producción de bioetanol

		MUS\$
<b>Total Sueldos</b>		<b>918</b>
Mantención de equipos	2% TCE	1.923
<b>Gastos Generales</b>		
Beneficios de Empleados	30% Sueldos	275
Mantención de Edificios	5% Sueldos	46
Suministros de Oficinas	5% Sueldos	46
Energía Oficinas	10% Sueldos	92
<b>Total Gastos Generales</b>		
Seguros	0,3% TCI	295
<b>Total Costos Fijos</b>		<b>3.595</b>

Fuente: Elaboración propia

#### 6.4 CAPITAL DE TRABAJO

El capital de trabajo corresponde al dinero que debe estar disponible para cubrir el funcionamiento inicial y permanente del negocio, cubriendo el desfase natural entre el flujo de ingresos y egresos. Ese dinero es necesario para comprar la materia prima y los insumos (30 días), para pagar los sueldos (primer semestre), para manejar el almacenamiento del producto terminado, pagar impuestos y las cuentas por cobrar y por pagar (30 días).

Se consideran las ventas por cobrar<sup>148</sup> y los insumos por pagar para 30 días. En la Tabla 23 se presenta el cálculo del capital de trabajo. Esto se desagrega de esta forma, debido a que los gastos y ventas son considerados mensualmente, realizando flujos mes a mes. Por ejemplo, el costo asociado a la materia prima será desembolsado en pagos mensuales a los distribuidores, pagando la totalidad de éste mensualmente durante el año. Es por esto que el cálculo de este ítem, se realizó por cada ítem mensualmente, para así obtener el capital de trabajo.

Tabla 23: Cálculo de capital de trabajo

	MUS\$
Sueldos primer semestre	459
Stock insumos y materia prima de 30 días	4.313
Ventas por cobrar de 30 días	7.967
<b>Total</b>	<b>12.739</b>

Fuente: Elaboración propia

148 Precio Etanol en Chile US\$ 600/m<sup>3</sup>

Además, se muestra en la Tabla 24 los ingresos por venta anual de los productos de la biorefinería.

Tabla 24: Ingresos por venta de productos

Producto	Cantidad anual	Ingreso anual [MMUS\$]
Etanol [m3]	74.759	44,9
Lignina [Kg]	37.809.788	3,8
Xilitol [Kg]	10.222.116	2,0
Levadura [Kg]	1.398.101	2,1
CO <sub>2</sub> [Kg]	49.793.485	34,9

Fuente: Elaboración propia

El capital de trabajo total es US\$ 12,7 millones.

## 6.5. PLANIFICACION

El tiempo que toma construir la planta es relevante al realizar el estudio económico para saber en qué periodo ocurren los flujos de dinero. En la primera etapa se realizará la inversión para construir la planta y luego comienza una producción menor, en el periodo de ajustes para lograr el rendimiento de diseño de la planta, lo que implica menores ingresos.

Para construir una planta industrial se debe seguir una serie de pasos donde al terminar una etapa se comienza la siguiente. Las refinerías grandes toman 3,5 años en construirse, pero ese tipo de procesos generalmente es de mayor dimensión que el de producir bioetanol. Por otro lado, la bibliografía<sup>149</sup> muestra que construir plantas de etanol a partir de rastrojo de maíz toma un poco más de 2 años. Se determina el tiempo total de construcción de la planta en 2,5 años.

En la Tabla 25 se presentan las principales actividades que se deben realizar con su duración y porcentaje de costos asociado al proyecto.

El total de inversión del proyecto son US\$ 160,3 millones que se desglosan en las distintas etapas de la construcción de la planta. En los primeros 6 meses se diseña la obra, desde el plan de calendarización hasta la determinación de todos los equipos, esta etapa tiene asociado un costo de US\$ 13 millones (8% de la inversión inicial). El siguiente semestre se encargan todos los equipos, se realiza la estructura gruesa y los sistemas de energía y la mayoría de los principales equipos se dejan instalados. Esta segunda etapa tiene un costo de US\$ 98 millones (61% de la inversión inicial). Al año subsiguiente se debe tener todos los equipos instalados y listos para la puesta en marcha, se realizan las primeras pruebas. La última etapa tiene un costo de US\$ 50 millones (31% de la inversión inicial).

---

149 NREL, 2000.

Tabla 25: Planificación

Mes Inicio	Mes Termino	Descripción de actividades	Total de Inversión [%]	US\$MM
0	6	• Establecer el plan y calendarización	8	13
		• Diseño de ingeniería conceptual		
		• Arreglos completos para equipos y plantas		
6	18	• Detalle de ingeniería completos	61	98
		• Todos los equipos encargados		
		• Estructura gruesa completa		
		• 80% de los equipos prioritarios instalados		
18	30	• Estanques, tuberías y sistema eléctrico	31	50
		• Todos los equipos de proceso instalados		
		• Construcción completa y puesta en marcha		

Fuente: Elaboración propia basada en Wooley, R. 1999<sup>150</sup>.

Durante la construcción se realizan actividades de puesta en marcha que requerirán personal adicional, una de estas actividades es la prueba de equipos durante la construcción. Los costos adicionales de la puesta en marcha fueron considerados en la inversión inicial del proyecto (en el punto 6.2).

## 6.6. FLUJO DE CAJA

La construcción de la planta demora 2,5 años y la inversión es de US\$ 160,3 millones. Luego de esto la planta comienza a operar con un 50% de su capacidad el primer año, un 70% de su capacidad el segundo año, y un 100% los años siguientes, debido a lo innovador del proyecto y los posibles ajustes que éste pueda necesitar. Los costos e ingresos se presentan en la Tabla 26.

Al variar la capacidad de producción, disminuyen los costos variables y los ingresos (los costos fijos se mantienen constantes). Los ingresos se obtienen por las ventas del bioetanol y los co-productos asociados a la biorefinería. Si la producción es del 50% de la capacidad, la venta de bioetanol también es la mitad, por estar directamente relacionado. En este caso se consideró el precio de venta del bioetanol en US\$ 600/m<sup>3</sup>.<sup>151</sup>

Tabla 26: Producción con distintas capacidades

	US\$MM			
	Total	Capacidad 50%	Capacidad 70%	Capacidad 100%
Ingreso etanol	44,9	22,43	31,4	44,9
Ingresos co-productos	42,8	21,39	29,9	42,8
Costos variables	51,8	25,88	36,2	51,8
Costos fijos	3,6	1,80	2,5	3,6

Fuente: Elaboración propia

150 Wooley *et al*, 1999.

151 Se supone en este estudio un precio de US\$600 por m<sup>3</sup> de bioetanol en Chile.

Los parámetros para el flujo de caja están expuestos en la Tabla 27.

Tabla 27: Parámetros del flujo de caja

Financiamiento propio	60%
Tasa de Interés	8%
Periodo de pago	10 años
Tasa de descuento	15%
Horizonte de tiempo	20 años
Depreciación acelerada	
Equipos	6 años
Silos y tanques	10 años
Impuesto	17%

Fuente: Elaboración propia basada en KIM, J. 2006.

Para el caso particular de este proyecto, se considera una tasa de descuento de 15% y además será financiado en un 40% de la inversión inicial, con una tasa de interés del 8% anual y un periodo de pago de 10 años. Esta información fue obtenida bajo la opinión experta del Sr. Rodrigo Caro<sup>152</sup>, quien posee una vasta experiencia en proyectos de esta magnitud. El resto del porcentaje de la inversión inicial será a través de entidades, empresas o personas interesadas en el tema, que aportaran el capital, pasando a ser inversionistas del proyecto. Sin embargo se analizara a su vez el caso con financiamiento puro, es decir sin préstamo alguno.

El horizonte de tiempo para evaluar el proyecto es de 20 años, debido a que los estudios de plantas de bioetanol con estas características utilizan horizontes de entre 20 a 25 años de vida útil<sup>153</sup>.

La depreciación legal estipulada por el Servicio de Impuesto Interno<sup>154</sup> (SII) varía según el activo. Los equipos poseen una depreciación acelerada de 6 años, mientras que los silos y los tanques poseen una depreciación de 10 años.

El impuesto de primera categoría para las empresas en Chile es de 17%.

El precio del bioetanol producido en EE.UU., a partir de maíz, es de US\$ 600/m<sup>3</sup>, mientras que el producido en Brasil (a partir de la caña de azúcar) y comercializado en EE.UU. es de US\$ 500/m<sup>3</sup>.<sup>155</sup>

El flujo de caja para el bioetanol y co-productos de la biorefinería, a partir de rastrojo de maíz en Chile para un escenario que no considere préstamo, se presenta en la Tabla 28. En este se considera un Valor Presente Neto (VPN) cero, con lo cual se obtuvo que el costo de producción de bioetanol de rastrojo de maíz en Chile sea igual a US\$ 650 por m<sup>3</sup> de etanol y con un periodo

---

152 Ingeniero Químico, área finanzas CMPC

153 Los estudios de EE.UU. de Wooley, R: (NREL) 1999 y de KIM, J. 2006 con un horizonte de tiempo de 20 años.

154 [www.sii.cl](http://www.sii.cl)

155 El precio del etanol en EE.UU. es de US\$600/m<sup>3</sup> y el de Caña de azúcar es de US\$500/ m<sup>3</sup>. ([www.ethanolstatistics.com](http://www.ethanolstatistics.com))

de recuperación de 7 años, lo cual demuestra que debido al alto costo de producción del bioetanol, el proyecto con financiamiento puro no sería rentable.

Además se realizó un flujo de caja para el caso con préstamo<sup>156</sup>. Éste caso también considera VPN cero, con lo cual se obtuvo que el costo de producción de bioetanol de rastrojo de maíz en Chile sea igual a US\$ 540 por m<sup>3</sup> de etanol y un periodo de recuperación de 7 años, un valor que se acerca bastante al rango de venta del etanol comercializado mundialmente<sup>157</sup>.

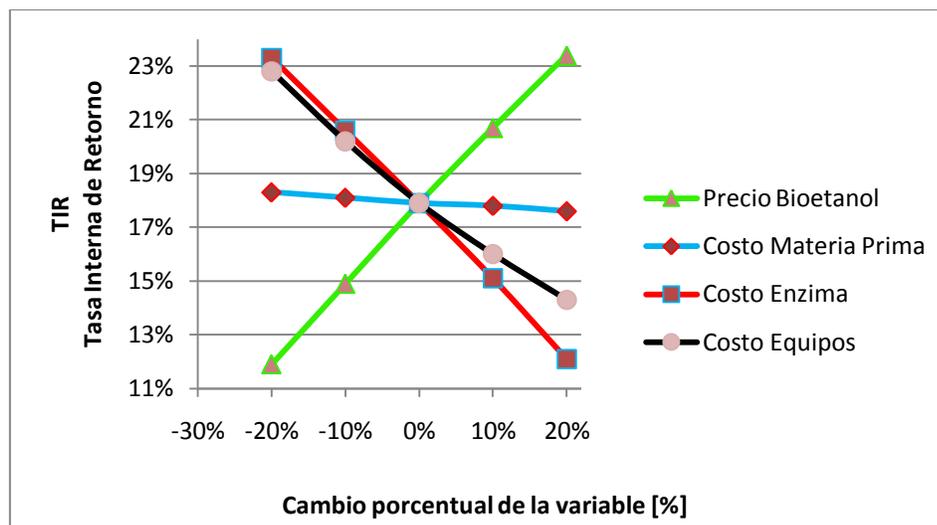
Al ver ambos escenarios, con préstamo y sin él, podemos ver que el proyecto en estudio es rentable bajo las condiciones de préstamo, esto debido a que el costo de producción del bioetanol se asemeja bastante con los del bioetanol producido en Brasil y EE.UU. Por lo tanto existiría un margen entre el costo y el precio de venta, con lo cual se obtendrían utilidades.

## 6.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizaron análisis de sensibilidad para las variables precio de venta del bioetanol, costo de la materia prima, costo de las enzimas y de los equipos. El caso base corresponde a un precio de venta del bioetanol de US600/m<sup>3</sup> y, de acuerdo a los estudios realizados, el costo de la materia prima es de 7,5 US\$/m<sup>3</sup>, el costo de las enzimas es de 2.745 US\$/m<sup>3</sup> y el costo de los equipos de de US\$ 67,7 millones.

En el Gráfico 14 se aprecia como varía la Tasa Interna de Retorno (TIR) al ir variando porcentualmente las variables en estudio. Se puede apreciar que el proyecto es altamente sensible a las variaciones del precio de venta del bioetanol, al costo de los equipos y al costo de las enzimas y poco sensible al costo de la materia prima.

Gráfico 14: Análisis de sensibilidad



Fuente: Elaboracion propia

156 Detalle de préstamo y cuotas en Anexo 14  
157 Ver Anexo 15

Tabla 28: Flujo de caja sin préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 540 US\$/m<sup>3</sup>. VPN = 0.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	650																					
Ingresos por bioetanol		24,29	34,01	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59	48,59
Co- Productos		21,39	29,94	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78
<b>Total Ventas</b>		<b>45,68</b>	<b>63,96</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>	<b>91,37</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
<b>Total Costos</b>		<b>29,48</b>	<b>39,83</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>
Depreciación Legal		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>6,06</b>	<b>13,98</b>	<b>25,86</b>	<b>25,86</b>	<b>25,86</b>	<b>25,86</b>	<b>34,22</b>	<b>34,22</b>	<b>34,22</b>	<b>34,22</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>	<b>36,01</b>
Impuestos de 1° Categoría		1,03	2,38	4,40	4,40	4,40	4,40	5,82	5,82	5,82	5,82	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>5,03</b>	<b>11,61</b>	<b>21,47</b>	<b>21,47</b>	<b>21,47</b>	<b>21,47</b>	<b>28,41</b>	<b>28,41</b>	<b>28,41</b>	<b>28,41</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>
Depreciación Legales		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo Operacional</b>		<b>15,18</b>	<b>21,75</b>	<b>31,61</b>	<b>31,61</b>	<b>31,61</b>	<b>31,61</b>	<b>30,19</b>	<b>30,19</b>	<b>30,19</b>	<b>30,19</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>
Capital de Inversión	160,27																					
Capital de Trabajo	12,74																					
Recuperación de Capital de Trabajo																						12,74
<b>Flujo Capital</b>	<b>-173,01</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,74</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-173,01</b>	<b>15,18</b>	<b>21,75</b>	<b>31,61</b>	<b>31,61</b>	<b>31,61</b>	<b>31,61</b>	<b>30,19</b>	<b>30,19</b>	<b>30,19</b>	<b>30,19</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>29,89</b>	<b>42,63</b>
<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-173,01</b>	<b>-157,85</b>	<b>-136,17</b>	<b>-104,69</b>	<b>-73,27</b>	<b>-41,89</b>	<b>-10,56</b>	<b>19,31</b>	<b>49,14</b>	<b>78,93</b>	<b>108,67</b>	<b>138,07</b>	<b>167,43</b>	<b>196,74</b>	<b>226,01</b>	<b>255,23</b>	<b>284,41</b>	<b>313,54</b>	<b>342,64</b>	<b>371,69</b>	<b>413,05</b>	

Fuente: Elaboración propia

Permaneciendo las demás variables constantes, la holgura para competir mediante disminución de precios es de aproximadamente un 10% (precio del etanol cercano a US\$ 540/m<sup>3</sup>), en el que la TIR alcanza la tasa de descuento de 15%, determinada para este tipo de proyecto. El valor de las enzimas puede aumentar hasta un 10%, llegando a 3.020 US\$/m<sup>3</sup> y el costo de los equipos puede aumentar hasta un 10%, llegando a un costo de US\$ 74,5 millones, en donde el proyecto deja de ser rentable.

### 6.6.1. Precio del Bioetanol

El costo de producción del bioetanol en donde el VPN en el flujo de caja es nulo, es de US\$ 540 por m<sup>3</sup>. Para ahondar en el estudio de sensibilidad, se analizó con mayor profundidad algunos escenarios que resultan pesimistas y otros más optimistas.

Un caso pesimista para este proyecto sería que el impuesto específico a la gasolina disminuyera o simplemente no siguiera siendo aplicado. En el caso que fuese eliminado el impuesto específico es poco probable, pero sí la disminución de éste. Asumiendo el caso de que se suprimiese este impuesto<sup>158</sup>, el precio de la gasolina en promedio sería de US\$ 680/m<sup>3</sup>, con lo cual el precio del bioetanol también. Para este escenario el proyecto tendría un VPN de US\$ 48,7 millones, con un periodo de recuperación de 4 años y una TIR de 22%, lo cual es muy positivo.<sup>159</sup>

Dentro de los casos optimistas, uno de estos sería que el precio de venta de la gasolina en Chile es de aproximadamente US\$ 1.150 por m<sup>3</sup>. Si la mezcla E5 (5% de bioetanol en la gasolina) fuese opcional en Chile, el precio del bioetanol podría ser el mismo que al que se transa la gasolina. Es por esto que el máximo precio posible del bioetanol en Chile sería de US\$ 1.150 por m<sup>3</sup>, con lo cual el proyecto tendría un VPN de US\$ 212 millones, un periodo de recuperación de capital de 2 años y la TIR sería igual a 41%.<sup>160</sup>

Otro caso que se puede estudiar es el que sucede en Brasil, en donde el precio del bioetanol es cercano a 70% del costo de la gasolina<sup>161</sup>. Ésto puede ser debido a que el bioetanol posee una densidad energética 30% menor a la de la gasolina, lo que implica recorrer una menor distancia por volumen de bioetanol en comparación con la gasolina. Si en Chile el precio del bioetanol fuera 70% del precio de la gasolina, éste se vendería a US\$ 800 por m<sup>3</sup>. Con este precio, el VPN del proyecto sería de US\$ 90,4 millones, con un período de recuperación de 3 años y una TIR de 27%.<sup>162</sup>

Los precios analizados asumen que la venta de bioetanol no posea competencia. Esta afirmación no es tan descabellada, debido a que hasta la fecha de la realización de este estudio, no existen planta productoras de bioetanol en Chile. Frente a posibles importaciones de bioetanol, como la demanda mundial de bioetanol sobrepasa con creces a la oferta de éste, es improbable que el precio sea menor al que se comercializa en EE.UU. y Brasil, ya que además se debería sumar todos los costos asociados a importación.

---

158 Ver Anexo 7

159 Ver Anexo 16

160 Ver Anexo 17

161 En este país el uso de bioetanol es optativo y existe una importante flota de vehículos Flex fuel.

162 Ver Anexo 18

Representantes de PETROBRAS<sup>163</sup> han dicho que, como el bioetanol reemplaza los aditivos para aumentar el octanaje de la gasolina, el precio del bioetanol podría ser similar al de la gasolina, si es que éste no está bajo las normas de una ley atingente. Esto llevaría al bioetanol a ser un producto comercialmente similar a la gasolina y por ende con precios cercanos.

Con un margen del 10% sobre el costo de producción del bioetanol, el precio de venta es cercano a US\$ 600 por m<sup>3</sup>, similar al precio que se comercializa en EE.UU. (a partir de maíz) y menor al máximo precio que podría tener en Chile (gasolina sin impuesto específico), por lo cual es un precio razonable para la comercialización de este producto. En este caso el VPN es de US\$ 20,9 millones, un periodo de recuperación del capital inicial de 5 años y una TIR de 18%.<sup>164</sup>

### 6.6.2 Costo de las Enzimas

Al analizar el costo asociado a las enzimas, se aprecia que el proyecto es altamente sensible al precio de éstas y por ende el VPN. El costo de las enzimas, al momento de realizar el estudio, es bastante elevado (2.500 US\$/m<sup>3</sup>), pero ha ido disminuyendo considerablemente al pasar los años. Ésto se debe principalmente a la gran cantidad de investigaciones relacionadas al tema, las cuales buscan encontrar enzimas más eficientes y a su vez con un menor costo de producción. Para analizar con mayor profundidad el estudio de sensibilidad, se representarán escenarios en donde el costo de la enzima estará sobrevalorado y subvalorado, manteniendo el resto de los parámetros constantes.

Para el caso de la sobrevaloración de la enzima, ya se analizó el caso marginal del proyecto, en donde el valor de las enzimas podría aumentar aproximadamente en un 10%, llegando a 3.020 US\$/m<sup>3</sup>, obteniendo una TIR de 15% y logrando así un VPN nulo. Pero es importante analizar casos en que el precio de las enzimas supere lo estipulado a través de estudios bibliográficos y recomendaciones. Para esto, se analizaron dos casos, uno en que el precio de la enzima aumente en un 30% y el otro un 50%. Para el primer caso se obtiene un VPN de US\$ -40.2 millones, con una TIR de 9% y para el segundo caso se obtiene un VPN de US\$ -82,6 millones, con una TIR de 2%, mostrando claramente que el proyecto no es rentable con estas condiciones.

Para el caso de la subvaloración del costo de la enzima, se analizarán nuevamente dos casos, la disminución del precio de las enzimas en un 30% y en un 50%. Para el primer caso se obtiene un VPN de US\$ 40,5 millones, con una TIR de 21% y para el segundo caso se obtiene un VPN de US\$ 122,1 millones, con una TIR de 31%, mostrando claramente la gran rentabilidad del proyecto en estas condiciones. Cabe mencionar que se estima que el precio de las enzimas bajen hasta 10 veces su valor actual, lo cual aumentaría considerablemente la rentabilidad del proyecto<sup>165</sup>.

Este estudio fue realizado con factores arbitrarios (tanto de aumento y disminución del precio de la enzima), pero muestra claramente la alta sensibilidad que el proyecto posee ante la variación

---

163 Workshop organizado por la CNE

164 Ver **Anexo 19**

165 Variando el flujo de caja en el **Anexo 21**

del valor de este insumo. Es por ésto que el desarrollo de nuevas tecnologías es de suma importancia, permitiendo a futuro disminuir el costo de las enzimas y así lograr una mayor rentabilidad en proyectos de esta índole.

### **6.6.3 Costo de los Equipos**

La TIR también es altamente sensible a los costos de los equipos del proyecto. Si los equipos cuestan 10% más de lo estimado, llegando a US\$ 74,5 millones, aún sigue siendo conveniente realizar la inversión con una TIR de 16%, pero si cuesta 20% más, deja de serlo, llegando a una TIR de 14%. En proyectos de esta envergadura es frecuente que las estimaciones de los costos de los equipos tengan errores del 10%, por lo cual podría asumirse este error y aun así, poder llevar a cabo el proyecto, manteniendo la conveniencia que éste posee<sup>166</sup>.

### **6.6.4 Costo de la Materia Prima**

El costo de la materia prima es de US\$ 7,5 por kilogramo, si aumenta en un 20% sería US\$ 9 por kilogramo y si disminuye en 20% costaría US\$ 6 por kilogramo. La sensibilidad de la TIR a esta variable es muy baja, por lo cual la rentabilidad del proyecto no se vería afectada significativamente, variando entre 19% y 17%.

Si aumenta la demanda de rastrojos de maíz, se tendría que aumentar el radio de recolección lo que implica un incremento en los costos de transporte y con ello, aumentaría el precio del rastrojo de maíz en planta. Este escenario es posible debido a la creciente demanda de fuentes energéticas, pero con bajas probabilidad, ya que el rastrojo de maíz no es utilizado como materia prima en otro rubro (hasta la realización de este estudio).

En caso de que la materia prima se hiciese escasa o aumenta el costo de oportunidad de ésta, se debería ver la posibilidad de tener una planta multipropósito, con lo se podría operar con más de un tipo de materia prima y así evitar esta dependencia.

### **6.6.5. Venta de CO<sub>2</sub>**

La venta de CO<sub>2</sub> aporta en los ingresos del proyecto, haciéndolo más rentable. Pero cabe ver cuán rentable es vender el CO<sub>2</sub> en forma comercial, esto debido a los altos costos de almacenamiento asociados a éste producto. Al analizar el proyecto sin el almacenamiento y venta de este co-producto, podemos ver que con un precio de venta del bioetanol de US\$ 600 por m<sup>3</sup>, el VPN es de US\$ - 147 millones<sup>167</sup>, sin poder recuperar la inversión y por lo tanto no se puede estimar la TIR del proyecto. Por lo tanto es sumamente importante este co-producto, ya que da rentabilidad al proyecto.

---

<sup>166</sup> Variando el flujo de caja en el Anexo 21  
<sup>167</sup> Ver Anexo 20

## 7. ESCENARIO FUTURO

Hoy en día el etanol se encuentra integrado al sistema de combustibles en países como Brasil, Estados Unidos y algunos de la Unión Europea. Pero claramente esas naciones y el mundo entero está volcando su atención al bioetanol de segunda generación, el cual no compite con los precios de los alimentos.

Actualmente se encuentran operando plantas piloto que producen bioetanol a partir de una amplia variedad de materias primas (desechos de madera, rastrojo de maíz, desechos municipales, cartón o papel, etc.). Dentro de estas plantas se encuentra la de Bioengineering Resources Inc. (BRI), ubicada en Arkansas, EEUU, EthanolTechnik (ETEK) en Ornskoldsvik, Suecia, Iogen, Canadá, la National Renewable Energy laboratory (NREL) del Department of Energy (DOE) en Colorado, EEUU y la BC International, en Louisiana, EEUU, Abengoa en Salamanca, España.

En el Taller Internacional “Bioenergía para un desarrollo sustentable”<sup>168</sup>, la experta española en bioetanol lignocelulósico Mercedes Ballesteros<sup>169</sup> informó que se espera que la tecnología para producir bioetanol lignocelulósico industrial se encuentre disponible completamente a partir del año 2012.

Por todas las investigaciones que se están realizando para producir el bioetanol de segunda generación, se espera que se reduzcan los costos con mayor peso en la evaluación del proyecto. Para el año 2012 se espera que el costo del bioetanol sea cercano a US\$260/m<sup>3</sup>. Principalmente se lograría aumentando el rendimiento de la conversión la materia prima a bioetanol llegando a 0,34 m<sup>3</sup> de bioetanol por tonelada (actualmente el rendimiento es 0,26 m<sup>3</sup>/ton en la literatura).

Uno de los factores que incide en el alto costo de producción del bioetanol es el precio de las enzimas. Hace una década este costo era visto como la mayor barrera para la conversión de la biomasa a bioetanol, pero hoy ha disminuido y se espera que, con las investigaciones que se están realizando, disminuya aún más. Además de este tópico, existen otros aspectos en que se está trabajando para disminuir los costos de producción, los cuales son la integración de las etapas del proceso y una mayor flexibilidad de las materias primas utilizadas en las plantas productoras de bioetanol.

En este estudio se utilizó el proceso SSF (sacarificación y fermentación simultánea), que posee grandes ventajas económicas con respecto a otros procesos de esta índole. Pero a futuro se espera que se desarrollen procesos más eficientes y económicos, como el BCP (Bioproceso consolidado), el cual es aun más eficiente y económico el proceso, ya que el bioetanol y todas las enzimas requeridas son producidas en un solo reactor.

---

168 Taller Internacional. Bioenergía para un desarrollo sustentable. Biocombustibles: Desafíos en Tecnologías y Mercados. 2009, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

169 Mercedes Ballesteros, trabaja en CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España). Contacto: m.ballesteros@ciemat.es

## 8. CONCLUSIONES

La sustitución de gasolina por etanol en Chile debería seguir una manera muy similar a lo que está ocurriendo en EE.UU. y Europa, comenzando con la mezcla E5 (gasolina con 5% de etanol), como es el caso de Brasil, país pionero en la producción de etanol y de su utilización como biocombustible. La regulación de etanol en Chile permitirá su uso mezclado con gasolina hasta en un 5% y es altamente probable que no se vea agravado con el impuesto específico de la gasolina, por lo que será conveniente para el consumidor por su menor costo. El interés en el uso del etanol como biocombustible radica en que se ajusta mejor al actual sistema de transporte que otras formas de energía renovable y permite disminuir la contaminación y la dependencia al petróleo. En el caso de Chile, la producción de biocombustibles tiene una serie de ventajas, desde la diversificación de la matriz energética hasta el impulso económico.

Debido a los problemas económicos que ha traído la producción mundial de etanol a partir de alimentos, se ha optado por impulsar el desarrollo de la tecnología para producir bioetanol lignocelulósico. Al producir bioetanol de rastrojo de maíz se aprovechan las fortalezas agrícolas del país. Se espera que esta tecnología se encuentre disponible completamente para el año 2012. Es por esto que durante la realización de este trabajo de título, se estudió en forma exploratoria el desarrollo de una industria productora de bioetanol y co-productos de biorefinería, a partir de rastrojo de maíz en Chile.

Analizando el punto de vista técnico del trabajo, es evidente la factibilidad del proyecto. Esto se debe a las características y cantidad del material utilizado como materia prima (rastrojo de maíz), la localización de la planta, los co-productos seleccionados y específicamente el proceso seleccionado para la producción de bioetanol, el cual genera un rendimiento bastante bueno comparado con otros proyectos de características similares.

Se determinó que la mejor ubicación para la planta es en la VI Región, ya que ésta tiene la mayor cantidad de rastrojos de maíz en Chile. La ubicación específica sería en Peumo, bajo el concepto de biorefinería, la cual es la comuna que mejora la logística de transporte asociado al estudio. La capacidad de la planta sería de 75 mil m<sup>3</sup> al año de bioetanol y requiere 345 mil toneladas de rastrojo de maíz al año como materia prima. Este nivel de producción cubriría el 45% de la demanda nacional de etanol en el año 2010, si la mezcla es de E5. La producción de co-productos (CO<sub>2</sub> alimenticio, levadura industrial, xilitol y lignina) de la planta de bioetanol entrega un importante valor agregado ésta.

Se realizó un estudio sobre los productos secundarios, derivados de la biorefinería, acotando una lista de productos, para así seleccionar posteriormente aquellos productos idóneos para el caso del estudio. Además se analizó sus características y atractivo comercial los cuales fueron útiles al momento de realizar la elección final de estos. Además se realizó un estudio de los procesos involucrados en la producción de los productos secundarios, con lo cual se pudo realizar posteriormente el diseño conceptual de una planta de biorefinería, con un amplio detalle de está.

Al desarrollar el balance de masa, se calculó la totalidad de los flujos y componentes de una planta generadora de aproximadamente 75.000 m<sup>3</sup>/año de bioetanol a partir de rastrojo de maíz. Los rendimientos obtenidos son muy similares a los mencionados por la literatura, en particular para el caso de la cantidad de litros de bioetanol por tonelada de materia prima utilizada. En el

caso estudiado se obtuvo un rendimiento de 227 litros de bioetanol (mientras que en la literatura este rendimiento bordeaba los 300 litros por tonelada), 6 kg de levadura, 31 kilogramos de xilitol, 111 kg de lignina y 144 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de materia prima<sup>170</sup>.

Para el caso del dimensionamiento de equipos, éste fue realizado minuciosamente analizando las características particulares de cada proceso, para así escalarlos según las necesidades de la planta conceptual. Es importante señalar que algunos equipos (filtro de membrana y reactor Purevision) fueron dimensionados según dispositivos convencionales, debido a que ambos se encuentran en pleno desarrollo y la información aún no es de uso público al momento de realizar el estudio. Algunos de los costos más relevantes fueron los del SSF (36 MMUS\$), de los tanques de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (5 MMUS\$) y tanques de lignina (3 MMUS\$).

Para el caso del cálculo del consumo energético, este se realizó a través de un escalamiento de una planta de la NREL, lo cual trae consigo un error asociado. Pero al ser un estudio exploratorio, el cual intenta mostrar preliminarmente los resultados de una planta de estas características en Chile, se asume como una buena aproximación. Eso sí, sería interesante ver la posibilidad de realizar una integración energética en la planta, lo cual disminuiría considerablemente los costos asociados al proceso, evitando así un uso excesivo de consumo energético.

Analizando la factibilidad económica, se observa que al estimar los costos e ingresos asociados al flujo de caja del proyecto, los resultados son relativamente buenos. Según las condiciones y parámetros del segundo semestre del año 2009, en cuanto al precio del dólar, materia prima, co-productos seleccionados y enzimas, se obtuvo una inversión inicial de US\$ 160,3 millones. El costo de producción del bioetanol para obtener un VPN 0 en el caso de proyecto puro o sea sin préstamo, es US\$ 650/m<sup>3</sup>, lo cual supera el costo de producción de bioetanol tanto en Brasil como en EE.UU. Para el caso de en que el proyecto fuese financiado en un 40%, el costo de la producción de bioetanol es US\$ 540/m<sup>3</sup>, precio dentro del rango del etanol comercializado en EE.UU. de caña de azúcar y de maíz. El precio de venta del bioetanol en Chile podría llegar a US\$1.150/m<sup>3</sup> por los altos precios actuales del petróleo y por el impuesto específico de la gasolina aplicado en Chile. Suponiendo un precio de venta del etanol de US\$600/m<sup>3</sup>, el VPN del proyecto es de US\$20,9 millones, el periodo de recuperación del capital es de 5 años (el horizonte de tiempo para la evaluación del proyecto es de 20 años) y la TIR de 18%. Por esto que sería interesante continuar con el estudio en un futuro cercano.

En este estudio se pudo constatar una legislación incierta para muchos escenarios asociados a los biocombustibles. Todavía no existe una normativa de calidad oficial para el bioetanol, ni se sabe de estudios ambientales que puedan predecir un impacto positivo o negativo de su utilización. Esta situación debiese de estar regularizándose antes de 2012 en Chile.

Finalmente, se recomienda realizar estudios con mayor profundidad, en donde se ahonde aun más en el tema estudiado, atendiendo con mayor detalle al proceso y posibles variantes que este pudiese tener. Además ver la posibilidad de hacer una planta multipropósito, con lo cual se diversificaría los productos de la biorefinería y a su vez la posibilidad de utilizar más de un tipo de materia prima (rastroyo de trigo) y no solo los rastrojos de maíz.

---

170 La literatura se refiere a un rendimiento promedio, en el cual la materia prima varía desde madera, maíz, caña de azúcar, etc.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. ALAMADA, M. 2006. Análisis de la producción de materias primas para la producción de bioetanol y biodiesel, y de estos combustibles, presentes y esperada hasta 2020, en países potencialmente proveedores de Chile. Programa Nacional de Biocombustibles de la Dirección de Agricultura de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos (Sagpya). Chile.
2. BALLESTEROS, M. 2006. Bioetanol, carburantes sin petróleo. Revista Investigación y Ciencia., noviembre 2006. España.
3. BALLESTEROS, M., BALLESTEROS, I., OLIVA, J., MARTINEZ, J., CARRASCO, J. 1995. Explosión a vapor como pretratamiento de la biomasa lignocelulósica. CIEMAT, España..
4. BCI. Disponible en: [www.bcintlcorp.com](http://www.bcintlcorp.com). Visitada en Octubre, 2009
5. BIOPLANET. 2007. La carrera energética, un camino de avances y grandes desafíos. Chile.
6. CANTARELLA, M., CANTARELLA, L., GALLIFUOCO, A., SPERA, A., ALFANI, F. 2003. Comparison of different detoxification methods for steam-exploded poplar Wood as a substrate for the bioproduction of ethanol in SHF and SSF. Italia.
7. CAVIERES KORN, P. 2007. Etanol de la Biomasa como alternativa energética. Seminario comisión de agroenergía. Chile.
8. CAVIERES KORN, P. 2009. Biocombustibles Marco Global. Seminario Mes de la Energía. Chile, Chile.
9. CHAVES, M. 2004. Bioetanol como complemento de combustibles. México.
10. Chemical Engineering Journal. Disponible en: [www.che.com](http://www.che.com). Visitada en Octubre, 2009.
11. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE). 2007. Circular n°30 del 16 de mayo del 2007 materia: instruye sobre el tratamiento tributario de los biocombustibles denominados biodiesel y bioetanol. Chile.
12. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE).. Disponible en: [www.cne.cl](http://www.cne.cl). Visitada en Septiembre, 2009.
13. CONAMA. Fuentes contaminantes. Disponible en: [www.conama.cl](http://www.conama.cl). Visitada en Agosto, 2009.

14. CORREA, T. 2009. Estudio exploratorio de la producción de etanol en Chile a partir de residuos forestales. Chile.
15. COTTER, J., TIRADO, R. 2007. Políticas sobre bioenergía. Greenpeace Internacional,
16. CRUZ, R., DOPICO, D., FIGUEREDO, J., RODRIGUEZ, M., MARTINEZ, G. 1997. Uso de la Lignina de bagazo con fines Medicinales. Cuba.
17. CUZEN, J. 2008. Blue Fire Ethanol, “The Future of etanol”. Chile.
18. DIETRICH, J., TEMME, K. 2006. Energy Independence: The promise of cellulosic etanol. University of California, Berkley, EE.UU.
19. DOE. Cellulosic Ethanol. Disponible en: [www.genomicsgtl.energy.gov.com](http://www.genomicsgtl.energy.gov.com). Visitada en Agosto, 2009.
20. Ensilicio. Disponible en: [www.ensilicio.com](http://www.ensilicio.com). Visitada en Septiembre, 2009.
21. FAIGUENBAUM, H. 2009. Manejo del rastrojo de maíz y ventajas de su incorporación al suelo. Chile.
22. FRANSSON, G., LINDSTEDT, J. 2005. Production of Bioethanol from lignocelluloses. Ornskoldsvik, Suecia.
23. Gobierno de Chile. 2007. Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile. Chile.
24. GOYAL, G., TAN, Z., YIN, C., MARSOLAN, N., AMISON, T. 2006. Biorefinery-an Overview. EE.UU.
25. HAMELINCK, C., VAN HOOIJDONK, G., FAAIJ, A. 2003. Prospects for etanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development progress. Holanda.
26. HERVE, J. 2007. Diseño Conceptual de una Planta de Biodiesel. Chile
27. Indura. Disponible en: [www.indura.net](http://www.indura.net). Visitada en Septiembre 2009.
28. INE. Censo agropecuario. Disponible en: [www.ine.cl](http://www.ine.cl). Visitada en Agosto, 2009.
29. Iogen. Disponible en: [www.iogen.ca](http://www.iogen.ca). Visitada en Octubre, 2009.
30. International Energy Agency. Disponible en: [www.iea.com](http://www.iea.com). Visitada en Agosto, 2009.
31. KAMM, B., KAMM, M. 2004. Principles of biorefineries. Alemania.
32. KHOSLA, V. 2005. “Biofuels: think out of the barrel”. EE.UU.

33. KIM, JOHN & HAYES, KENWIN, M. 2006. Southern pine as feedstock for renewable fuel industry; A feasibility study of lignocellulosic ethanol production in Georgia. Georgia Institute of Technology: Enterprise Innovation Institute, EE.UU.
34. LIO, C., BRINK, D., BLANCH, H. 2002. Identification of potential fermentation inhibitors in conversion of hybrid poplar hydrolyzate to ethanol. EE.UU.
35. LYND, L. 1996. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass. EE.UU.
36. MABEE, W., GREGG, D., ARATO, C., BERLIN, A., BURA, R., GILKES, N. 2006. Updates on Softwood-to-Ethanol Process Development. Canada.
37. MARGEOT, A., HAHN-HAGERDAL, B., EDLUND, M., SLADE, R., MONT, F. 2009. New Improvements for lignocellulosic ethanol. EE.UU.
38. Matche. Disponible en: [www.matche.com](http://www.matche.com). Visitado en Octubre, 2009.
39. MC ALOON, A., TAYLOR, F., YEE, W., IBSEN, K., WOOLEY, R. 2000. Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks. EE.UU.
40. NREL. 2000. *The DOE Bioethanol Pilot Plant, A Tool for Commercialization*. EE.UU.
41. Naciones Unidas (UN). 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas.
42. Organización para la Comercialización y Desarrollo Económico (OCDE). 2006. Informe de la OCDE de la producción en Brasil a partir de caña de azúcar. OCDE, Chile.
43. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2006. "Comité público-privado de bioenergía" Chile.
44. OHGREN, K., BURA, R., SADDLER, J., ZACCHI, G. 2007. Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover. Suecia.
45. ORTEGA, R., MUÑOZ, R., ACOSTA, L., FERNANDEZ, C., PUIGGROS, J., FERNANDEZ, P. 2007. Evaluación del potencial productivo de biocombustibles en Chile con cultivos agrícolas tradicionales. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
46. PATROUILLEAU, R., LACOSTE, C., YAPURA, P., CASANOVAS, M. 2007. Perspectiva de los Biocombustibles en la Argentina, con énfasis en el etanol de base celulósica. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina.
47. PEREIRA, J. 2003. The Chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. Universidad Federal do Paraná, Brasil.

48. PEREIRA, N. 2006 Biomass of lignocellulosic composition for fuel ethanol production and the context of biorefinery. Brasil.
49. PEREZ, C., CHAVES, M., GALPERIN, C. 2007. *Desarrollo de los biocombustibles: ¿cuál es el lugar de la política comercial?* Mexico.
50. PETROBRAS. Disponible en: [www.petrobras.com](http://www.petrobras.com). Visitada en Agosto, 2009.
51. PUREVISION. Disponible en: [www.purevision.com](http://www.purevision.com). Visitada Octubre, 2009.
52. RAGAUSKAS, A. *et al* (13). 2006. "The path forward for bio-fuels and biomaterials", *Science*, vol 311, 27 enero 2006, p.484-489.
53. ROBUSTE, F. 2006. Transport Logistic. EE.UU.
54. SANCHEZ, O., CARDONA, C. 2005. Producción Biotecnológica de alcohol carburante I: Obtención a partir de diferentes materias primas. Venezuela.
55. SANTIBAÑEZ, P. 2009. Caracterización de la materia prima Lignocelulosico. Chile.
56. SII. Disponible en: [www.sii.cl](http://www.sii.cl). Visitada en Septiembre, 2009.
57. Science Book. Disponible en: [www.sciencebook.com](http://www.sciencebook.com). Visitada en Octubre, 2009.
58. SOLOMONS, G. 2008. Fundamentals of organic Chemistry. EE.UU.
59. SUN, Y., CHENG, J. 2002. Hydrolisis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. EE.UU.
60. TAYLOR, G. 2006. Biofuels and the biorefinery concept. University of Southhampton, UK.
61. TUCKER, M., KIM, K., NEWMAN, M., NGUYEN, Q. 2003. Effects of the temperature and moisture on dilute-acid steam explosion pretreatment of corn stover and cellulase enzyme digestibility. EE.UU.
62. Ventajas. Disponibles en: [www.biocombustibles.cl](http://www.biocombustibles.cl). Visitada en Agosto, 2009.
63. VILLAJANA, J. 2005. Evaluación técnico económica y anteproyecto de una planta de etanol por fermentación y su uso como combustible. México.
64. WORLDWATCH INSTITUTE (WI). 2007. Production of ethanol. EE.UU.
65. WOOLEY, R., RUTH, M., GLASSNER, D., SHEEN, J. 1999. Process Design and Costing of Bioethanol Technology: A Tool for determining the Status and Direction of

Research And Development. Bioetchnology Center for Fuels and Chemical, National Renewable Energy Laboratory (NREL) a U.S. Deparment of Energy (DOE) Laboratory, EE.UU.

66. YANG, H., TYAN, R., CHEN, H., HO LEE, D., ZHENG, C. 2007. Characteristics of hemicellilose, cellulose and lignin pyrolysis. China.

## 10. SIGLAS

- há: Hectáreas.
- qqm: quintal métrico.
- DBO5: Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días y a 20 °C.
- ERNC: Energía Renovable No Convencional.
- DQO: Demanda Química de Oxígeno.
- DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.
- CNE: Comisión Nacional de Energía
- CONAMA: Corporación Nacional del Medio Ambiente
- DOE: Departamento de Energía de EE.UU.
- FOB: Precio Free on Board
- NREL: Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EE.UU.
- ODEPA: Oficina De Estudios y Políticas Agrarias de Chile.
- MMUS\$: Millones de dólares.
- MUS\$: Miles de dólares.
- CHP: Chilean Pesos (Pesos Chilenos).
- VPN: Valor Presente Neto.
- TIR: Tasa Interna de Retorno.
- RILes: Residuos Industriales Líquidos.
- RISes: Residuos Industriales Sólidos.

## 11. DEFINICIONES

1. **Rastrojo de maíz:** Este se refiere a los residuos de cosecha de maíz, en donde éste término es utilizado en forma masiva en Chile.
2. **Biorefinería:** Una biorefinería es una planta industrial destinada a la refinación de celulosa, por medio de la cual, y mediante un proceso adecuado, se obtienen diversos biocombustibles, tales como bioetanol, biodiesel, biogás, etc. Adicionalmente, y como parte natural del proceso, se obtienen diversos coproductos, derivados de componentes de la materia prima, tales como la lignina, xilosa y furfurales. Cabe mencionar que existen varios tipos de biorefinería, los cuales dependerán de la materia prima utilizada, su caracterización y los co-productos electos para el proceso.
3. **Largo Plazo:** Se define como largo plazo, periodos de 40 años o más, para el caso particular de esta memoria.
4. **Mediano Plazo:** Se define como mediano plazo, periodos de entre 10 a 40 años, para el caso particular de esta memoria.
5. **Corto plazo:** Se define como corto plazo, periodos de menos de 10 años, para el caso particular de esta memoria.
6. **Estudio Exploratorio:** En esta memoria se entenderá como estudio exploratorio una investigación pionera y de forma inicial, la cual no está claramente desarrollada en el mundo entero. Es por esto que sus resultados apuntan a entregar directrices y conclusiones para futuros estudios en la materia.
7. **Evaluación Técnico Económica:** Corresponde a una evaluación del proyecto, tanto en sus aspectos técnicos como económicos, sin desentenderse del aspecto exploratorio del estudio.
8. **Etanol celulósico o lignocelulósico:** Etanol producido a partir de celulosa, el cual está contenido en residuos agrícolas, forestales y/o municipales. En el segundo caso (lignocelulosico) la biomasa contiene lignina.
9. **Bioetanol de primera generación:** Etanol producido a partir de material alimenticio, provenientes de azúcares, los cuales están contenidos en productos alimenticios tales como la caña de azúcar, la remolacha y cereales. Este es producido mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
10. **Bioetanol de segunda generación:** Etanol producido a partir del material celulósico, proveniente de la celulosa contenida en residuos agrícolas, forestales y/o municipales.

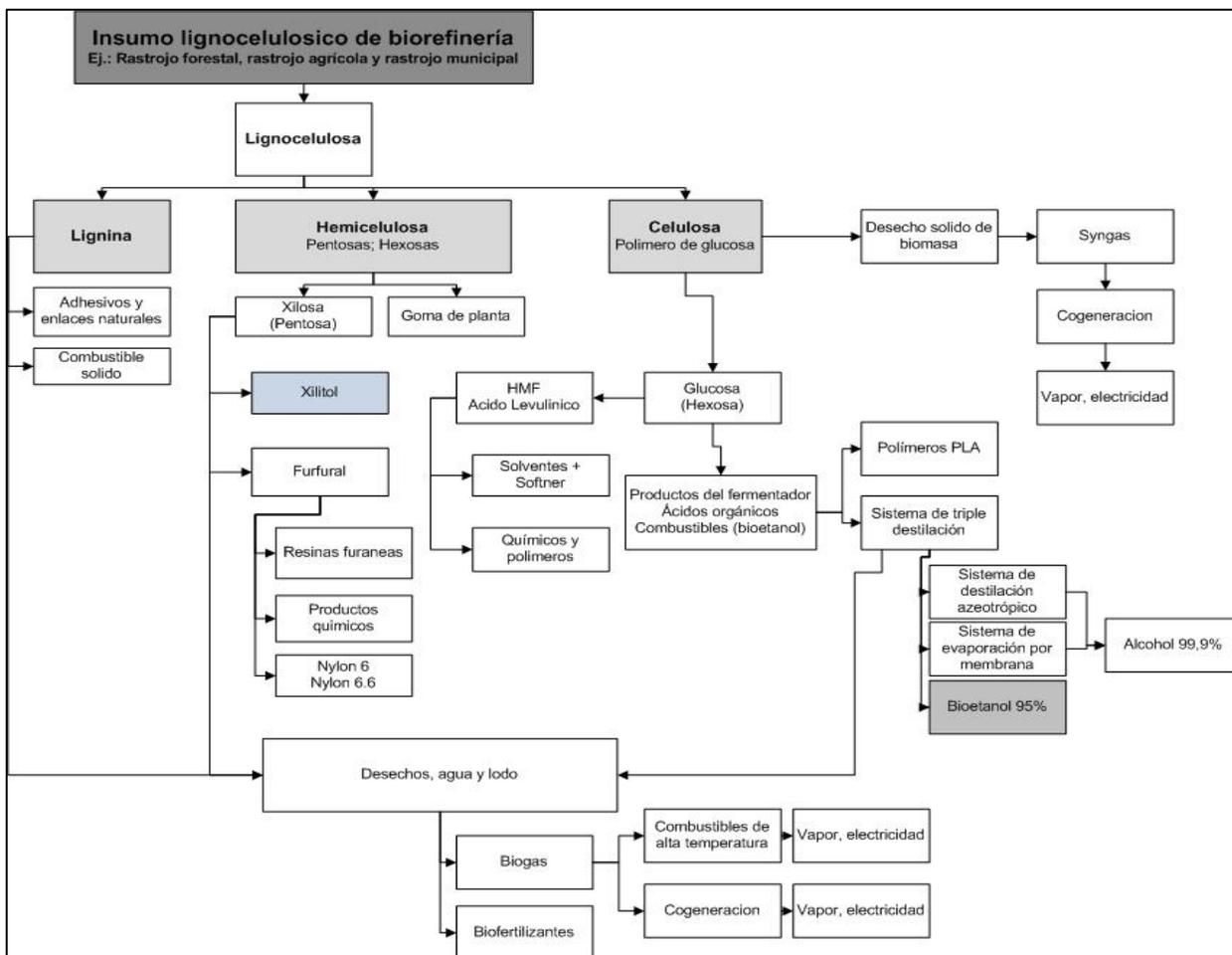
11. **Celulosa:** polisacárido compuesto exclusivamente de moléculas de glucosa; es pues un homopolisacárido (compuesto por un solo tipo de monosacárido); es rígido, insoluble en agua, y contiene miles de unidades de  $\beta$ -glucosa. La celulosa es la biomolécula orgánica más abundante en el ecosistema, ya que forma la mayor parte de la biomasa terrestre.
12. **Hemicelulosa:** Las hemicelulosas son heteropolisacáridos (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, los cuales a su vez están formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces  $\beta$  (1-4) (fundamentalmente xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa y ácido glucurónico). Entre estos monosacáridos destacan más: la glucosa, la galactosa o la fructosa.
13. **Lignina:** La lignina está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos. Los polímeros de lignina son estructuras transconectadas con un peso molecular de 10.000 uma. Se caracteriza por ser un complejo aromático (no carbohidrato) del que existen muchos polímeros estructurales (ligninas). Resulta conveniente utilizar el término lignina en un sentido colectivo para señalar la fracción lignina de la fibra. Después de los polisacáridos, la lignina es el polímero orgánico más abundante en el mundo vegetal. Es importante destacar que es la única fibra no polisacárido que se conoce.
14. **Glucosa:** La **glucosa** es un monosacárido con fórmula empírica  $C_6H_{12}O_6$ , la misma que la fructosa pero con diferente posición relativa de los grupos  $-OH$  y  $O=$ . Es una hexosa, es decir, que contiene 6 átomos de carbono, y es una aldosa, esto es, el grupo carbonilo está en el extremo de la molécula.
15. **Dextrosa:** Es la terminología que utiliza la industria alimentaria para denominar a la D-glucosa (un esteroisómero de la glucosa)
16. **Fructosa:** La fructosa, o levulosa, es una forma de azúcar encontrada en las frutas y en la miel. Es un monosacárido con la misma fórmula empírica que la glucosa pero con diferente estructura. Es una cetohexosa (6 átomos de carbono).
17. **Sacarosa:** La sacarosa o azúcar común es un disacárido formado por alfa-glucopiranososa y beta-fructofuranosa. Su fórmula química es  $C_{12}H_{22}O_{11}$ .
18. **Maltosa:** La maltosa o azúcar de malta es un disacárido formado por dos glucosas unidas por un enlace glucosídico producido entre el oxígeno del primer carbón anomérico (proveniente de  $-OH$ ) de una glucosa y el oxígeno perteneciente al cuarto carbón de la otra.
19. **Almidón:** El almidón es un polisacárido de reserva alimenticia predominante en las plantas, constituido por amilosa y amilopectina. Proporciona el 70-80% de las calorías consumidas por los humanos de todo el mundo. Tanto el almidón como los productos de la hidrólisis del almidón constituyen la mayor parte de los carbohidratos digeribles de la dieta habitual.

20. **Dextrina:** Las dextrinas son un grupo de oligosacáridos de poco peso molecular producidas por la hidrólisis del almidón. Tienen la misma fórmula general que los polisacáridos pero son de una longitud de cadena más corta.
21. **Rafinosa:** La rafinosa es un hidrato de carbono  $\alpha$ - galactosacárido. Se encuentra principalmente en las leguminosas, tales como soya, frijoles, garbanzos, cacahuates, chícharos, alubias, etc. También se ha identificado en algunos cereales, pero en éstos, el contenido de rafinosa siempre está en segundo término, después de la sacarosa.
22. **Xilosa:** un monosacárido que contiene cinco átomos y que contiene un grupo, el cual posee un isómero funcional que es la xilulosa. Tiene forma de pirano (hexágono) y se encuentra ampliamente distribuida en distintas materias vegetales: madera (cerezo), paja, etc.
23. **Vehículo Flex Fuel (VFF):** Vehículos que poseen sensores de oxígeno que reconocen el combustible y ajusta el funcionamiento del motor. De esta forma el usuario puede escoger en cada carga entre gasolina y etanol según conveniencia (precio, disponibilidad, calidad y desempeño). Este vehículo puede usar una mezcla de gasolina hasta con 85% de bioetanol.

## 12. ANEXOS

### Anexo 1: Diagrama productos derivados de la biorefinería

Figura 12: Diagrama de productos lignocelulósicos de la biorefinería.



### Anexo 2: Lista de conferencias, seminarios y charlas

1. Seminario Grupo Finlandia, 2008. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile.
2. Taller Internacional. Bioenergía para un desarrollo sustentable. Biocombustibles: Desafíos en Tecnologías y Mercados. 2009, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

### Anexo 3: Normativa ambiental atingente a residuos líquidos industriales<sup>171</sup>

(Decreto supremo N°90/2000 Secretaría general de la presidencia)

#### Definiciones:

**1.- Residuos líquidos, aguas residuales o efluentes:** Son aquellas aguas que se descargan desde una fuente emisora, a un cuerpo receptor.

**2.- La masa o volumen de un contaminante:** corresponde a la suma de las masas o volúmenes diarios descargados durante dicho mes. La masa se determina mediante el producto del volumen de las descargas por su concentración.

**3.- Cuerpos de agua receptor o cuerpo receptor:** Es el curso o volumen de agua natural o artificial, marino o continental superficial, que recibe la descarga de residuos líquidos. No se comprenden en esta definición los cuerpos de agua artificiales que contengan, almacenen o traten relaves y/o aguas lluvias o desechos líquidos provenientes de un proceso industrial o minero.

**4.- Fuente emisora:** es el establecimiento que descarga residuos líquidos a uno o más cuerpos de agua receptores, como resultado de su proceso, actividad o servicio, con una carga contaminante media diaria o de valor característico superior en uno o más de los parámetros indicados, en la siguiente tabla:

Tabla 29: Parámetros de carga contaminante.

Contaminante	Valor Caracaterístico	Carga contaminante media diaria (equiv. 100 Hab/día)*
PH **	6 - 8	---
Temperatura **	20 ° C	---
Sólidos Suspendidos Totales	220 mg/L	3520 g/d
Sólidos Sedimentables **	6 ml/L 1h	---
Aceites y Grasas	60 mg/L	960 g/d
Hidrocarburos fijos	10 mg/L	160 g/d
Hidrocarburos totales	11 mg/L	176 g/d
Hidrocarburos volátiles	1 mg/l	16 g/d
DBO5	250 mg O <sub>2</sub> /L	4000 g/d
Aluminio	1 mg/L	16 g/d
Arsénico	0,05 mg/L	0,8 g/d
Boro	0,75 mg/L	12,8 g/d
Cadmio	0,01 mg/L	0,16 g/d
Cianuro	0,20 mg/L	3,2 g/d

<sup>171</sup> CONAMA. Fuentes contaminantes. Available at: [www.conama.cl](http://www.conama.cl). Accessed Agosto, 2009.

Tabla 30: Parámetros de carga contaminante

Cloruros	400 mg/L	6400 g/d
Cobre	1 mg/L	16 g/d
Cromo Total	0,1 mg/L	1,6 g/d
Cromo Hexavalente	0,05 mg/L	0,8 g/d
Estaño	0,5 mg/L	8 g/d
Fluoruro	1,5 mg/L	24 g/d
Fósforo Total	10 mg/L	160 g/d
Hierro	1,0 mg/L	16 g/d
Manganeso	0,3 mg/L	4,8 g/d
Mercurio	0,001 mg/L	0,02 g/d
Molibdeno	0,07 mg/L	1,12 g/d
Niquel	0,1 mg/L	1,6 g/d
Nitrógeno total kjeldahl	50 mg/L	800 g/d
Nitrito más Nitrato (lagos)	15 mg/L	240 g/d
Pentaclorofenol	0,009 mg/L	0,144 g/d
Plomo	0,2 mg/L	3,2 g/d
Selenio	0,01 mg/L	0,16 g/d
Sulfato	300 mg/L	4800 g/d
Sulfuro	3 mg/L	48 g/d
Tetracloroetano	0,04 mg/L	0,64 g/d
Tolueno	0,7 mg/L	11,2 g/d
Triclorometano	0,2 mg/L	3,2 g/d
Xileno	0,5 mg/L	8 g/d
Zinc	1 mg/L	16 g/d
Índice de Fenol	0,05 mg/L	0,8 g/d
Poder espumógeno **	5 mm	5 mm
SAAM	10 mg/L	160 g/d
Coliformes Fecales o termotolerantes	10 <sup>7</sup> NMP/100 ml	1,6x10 <sup>12</sup> coli/d

\*) Se considero una dotación de agua potable de 200 L/hab/día y un coeficiente de recuperación de 0,8.

\*\*) Expresados en valor absoluto y no en términos de carga.

Las fuentes que emitan una carga contaminante media diaria o de valor característico igual o inferior al señalado, no se consideran fuentes emisoras para los efectos de esta norma y no quedan sujetos a la misma, en tanto se mantengan esas circunstancias<sup>172</sup>.

---

172 Manual de aplicación Decreto supremo N°90/2000 Secretaria General de la Presidencia.

#### Anexo 4: Comunas de la VI región y datos asociados al rastrojo de maíz

Tabla 31: Comunas VI región y datos asociados al rastrojo de maíz.

	Superficie total (ha)	Produccion total (qqm)	Rendimiento promedio (qqm/ha)
Total Comunas	46.704,80	5.681.122	121,64
Chépica	5.515,60	712.974	129,26
Pichidegua	5.468,10	656.788	120,11
San Vicente	4.759,20	625.873	131,51
Chimbarongo	3.587,40	421.982	117,63
Rengo	3.481,60	417.379	119,88
Palmilla	3.252,50	391.025	120,22
Las Cabras	2.691,90	324.297	120,47
Santa Cruz	2.584,70	289.999	112,20
Malloa	2.549,50	300.466	117,85
Quinta de Tilcoco	1.853,00	268.923	145,13
San Fernando	1.514,60	177.589	117,25
Nancagua	1.298,10	174.718	134,60
Coltauco	1.292,40	192.616	149,04
Placilla	1.174,30	165.356	140,81
Peralillo	1.023,00	105.086	102,72
Rancagua	899,90	85.743	95,28
Coinco	793,30	64.007	80,68
Mostazal	665,60	82.326	123,69
Graneros	497,70	62.793	126,17
Requínoa	435,10	46.451	106,76
Peumo	380,70	48.331	126,95
Marchihue	222,40	20.101	90,38
Machalí	178,10	8.813	49,48
Codegua	169,40	13.343	78,77
Lolol	119,70	8.845	73,89
Doñihue	101,00	8.760	86,73
Olivar	78,60	3.005	38,23
Pumanque	41,50	731	17,61
Navidad	22,70	535	23,57
Pichilemu	21,30	774	36,34
Paredones	12,40	197	15,89
La Estrella	11,30	1.078	95,40
Litueche	8,20	218	26,59

Fuente: INE, [www.ine.cl](http://www.ine.cl)

#### Anexo 5: Clasificación de azúcares

Los azúcares se pueden clasificar según el número de hexosas poseen:

- a) **Monosacáridos:** Formula general  $C_6H_{12}O_6$ . Los principales son la glucosa o dextrosa y la fructosa. Son también denominados hexosas.

- b) **Disacáridos:** Formula general  $C_{12}H_{22}O_{11}$ . Los principales son la sacarosa y la maltosa que son fermentables por la levadura alcohólica. La sacarosa está constituida por una unidad de glucosa y una unidad de fructosa.
- c) **Trisacáridos:** Formula general  $C_{18}H_{32}O_{16}$ . Este grupo está representado principalmente por la rafinosa, que no es fermentable.
- d) **Polisacáridos:** Formula general  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Son constituidos por cadenas de hexosas. No son fermentables.

Dentro de los polisacáridos se destacan el almidón, la dextrina y la celulosa, siendo esta última parte fundamental al momento de producir bioetanol.

### Anexo 6: Características de ligmed-a

A continuación se enumeraran algunas características estudiadas de su efectividad terapéutica:

- Efectividad terapéutica en comparación con siete fármacos similares.

Se mostró la actividad terapéutica del LIGMED-A frente al síndrome diarreico en el cerdo cría y en terneros lactantes. En la Tabla 32 se reporta la efectividad terapéutica del LIGMED-A en el tratamiento de la diarrea del cerdo y se compara con seis de los productos más comúnmente usados en Cuba con este propósito.

Tabla 32: Efectividad terapéutica de 7 fármacos en el tratamiento de diarrea del cerdo cría.

Fármaco	Efectividad (%)
Eritromicina	73.3
Diarrex	76.6
Polvo antidiarreico	79.0
Kenamicina	79.0
Tetracan	85.0
LIGMED-A	88.7
Cloranfenicol	90.4

Fuente: “Uso de la lignina como fuente medicinal”, Cruz, R. 1997.

Puede observarse que el LIGMED-A muestra efectividad comparable con el resto de los productos evaluados. En el curso de los últimos tres años, el LIGMED-A ha sido usado en el tratamiento de más de 20,000 cerdos crías con diarrea. Los veterinarios han evaluado la eficiencia del tratamiento en la mayoría de los casos como satisfactoria, considerando la

evaluación del cuadro clínico, el número y el tiempo de los tratamientos necesarios y la necesidad de terapias adicionales. Tampoco se ha observado efectos secundarios.

- Tiempo de Recuperación.

Como se aprecia en la Tabla 33, la recuperación de los animales es elevada, ya que desde las primeras 24 horas de ser aplicado el producto se ve una disminución considerable en las afectaciones de los animales enfermos. Una de las ventajas de este producto es su origen natural y su uso evita las terapias con antibióticos que usualmente provocan resistencia antibiótica.

Tabla 33: Recuperación de los cerdos crías en el curso del tratamiento con LIGMED-A.

Tratamiento	Recuperación (%)
24 horas	61.4
48 horas	81.6
72 horas	88.7

Fuente: “Uso lignina como fuente medicinal”, Cruz, R. 1997.

### Anexo 7: Precio gasolina y diesel

La forma de calcular el precio de la gasolina, el diesel y kerosene es la siguiente:

$$PM(t) = PI(t) + FEPC + IVA + IE$$

Donde cada sigla corresponde a:

- PM(t): Precio a los distribuidores mayoristas.
- PI(t): Precio internacional puesto en Concón, Chile.
- IE: Impuesto específico 6 UTM/m<sup>3</sup>.
- IVA: Impuesto al valor agregado.
- FEPC(t): Fondo de estabilización de precios del petróleo. Toma valores FC (crédito), FI (impuesto) o cero.

Cuando otorga crédito:  $PM(t) = PI(t) - FC + [PI(t) - FC] * 19\% + IE$

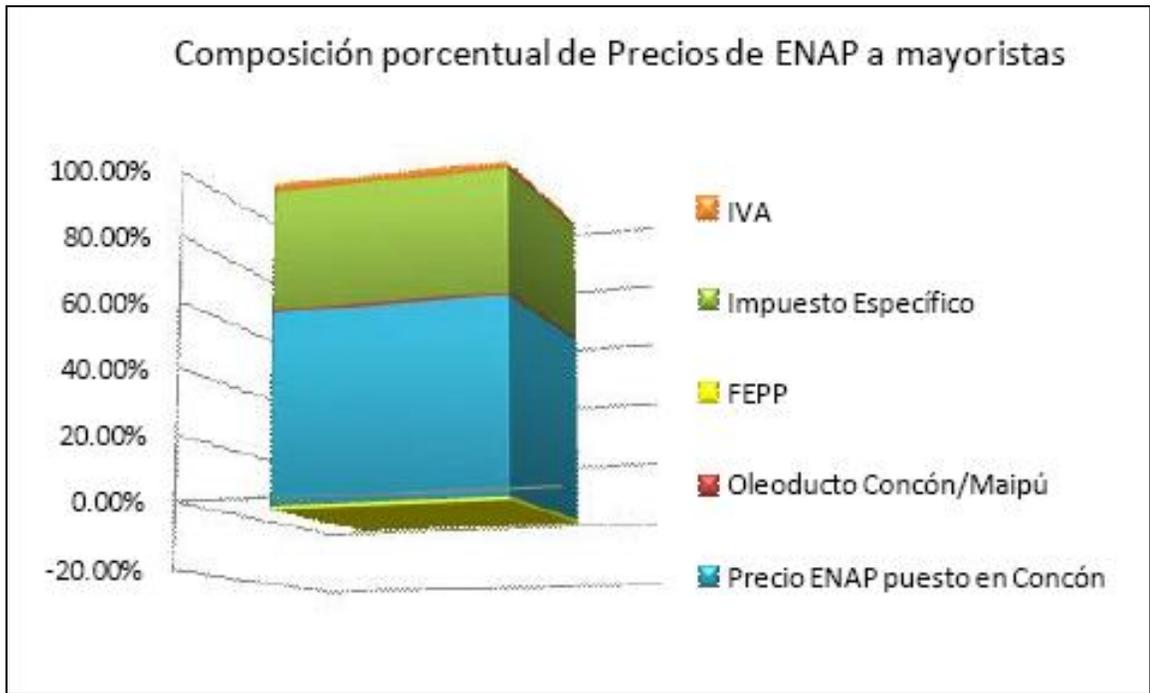
Cuando aplica impuesto:  $PM(t) = PI(t) + FI + PI(t) * 19\% + IE$

La ENAP (Empresa Nacional de Petróleo de Chile, [www.enap.cl](http://www.enap.cl)) publica los precios todas las semanas.

Como ejemplo se presenta la composición de precios del 24 de Enero del 2008 para la gasolina y el diesel:

## GASOLINA

Gráfico 15: Precio de la gasolina



Fuente: Elaboración propia basada en datos de la ENAP

De esta forma se calcula el precio de venta:

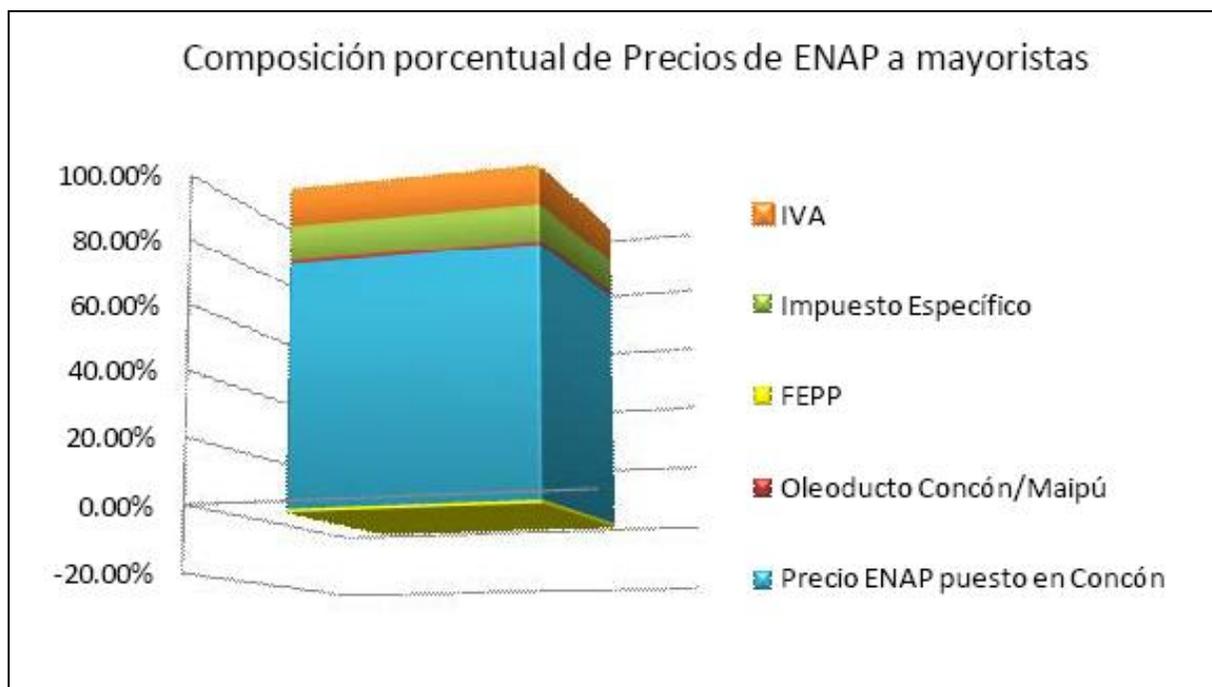
Tabla 34: Precio de gasolina

	Gasolina	US\$/m <sup>3</sup>
Precio ENAP puesto en Concón	59%	680
Oleoducto Concón/Maipú	0,9%	10
FEPP	-7,1%	82
Impuesto Especifico	37,2%	429
IVA	10%	115
Precio Venta Mayorista	100%	1.153

Fuente: Elaboración propia basada en datos de la ENAP

## DIESEL

Gráfico 16: Precio del diesel



Fuente: Elaboración propia basada en datos de la ENAP

De esta forma se calcula el precio de venta:

Tabla 35: Precio diesel

<b>Precio ENAP a Distribuidores Mayoristas en Santiago (Participación porcentual sobre el precio de venta)</b>		
	Diesel	US\$/m <sup>3</sup>
Precio ENAP puesto en Concón	75,1%	721,99
Oleoducto Concón/Maipu	1,1%	10,58
FEPP	-1,5%	-14,42
Impuesto Especifico	11,1%	106,71
IVA	14,2%	136,52
<b>Precio Venta Mayorista</b>	<b>100%</b>	<b>961</b>

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 8: Normativa de calidad del bioetanol sometida a consulta pública por la CNE (Mayo 2007)**

Figura 13: Normativa de calidad del bioetanol

**ESPECIFICACIONES DE CALIDAD, PARA LA PRODUCCIÓN, IMPORTACION,  
TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN, DE  
BIOETANOL Y BIODIESEL**

**Del Bioetanol**

1. Bioetanol es todo combustible líquido compuesto por alcohol etílico anhidro desnaturalizado, obtenido por la destilación del producto de fermentación de materia primas vegetales ricas en azúcares, almidones o lignocelulosa.
2. El proceso de desnaturalización del alcohol etílico deberá realizarse con gasolina automotriz, que cumpla con las especificaciones chilenas vigentes, según la reglamentación para alcoholes etílicos del Servicio Agrícola y Ganadero.
3. Las especificaciones de calidad para bioetanol deberán ser cumplidas por los productos nacionales e importados.
4. Las especificaciones de calidad que deberá cumplir el bioetanol para su comercialización como producto puro y uso en mezclas con gasolina en motores de ignición por chispa para uso automotriz, son las siguientes:

Propiedad	Unidad de medida	Valor propuesto	Método de Ensayo
Etanol	% v/v	mín. 92,1	ASTM D 5501
Metanol	% v/v	máx. 0,5	ASTM D 5501
Goma Lavada	mg/100 ml	máx. 5,0	NCh 1844
Contenido de agua	% v/v	máx. 1,0	ASTM E 203 o ASTM E 1064
Contenido de Desnaturalizador	% v/v	mín. 1,96 máx. 5,0	-
Cloro Inorgánico	ppm (mg/l)	máx. 40 (32)	ASTM D 512 (método C modificado)
Cobre	mg/Kg.	máx. 0,1	ASTM D 1668 (método A modificado)
Acidez (como ácido acético) (l)	% masa (mg/l)	máx. 0,007 (56)	ASTM D 1613
pHe		mín. 6,5 máx. 9,0	ASTM D 6423
Azufre	ppm	máx. 30	NCh 1896
Sulfatos	ppm	máx 4	ASTM D 4806
Apariencia		Visualmente libre de sedimentos y material suspendido. Brillante y claro a temperatura ambiente o 21°C (la mayor de ambas)	Inspección visual a temperatura ambiente

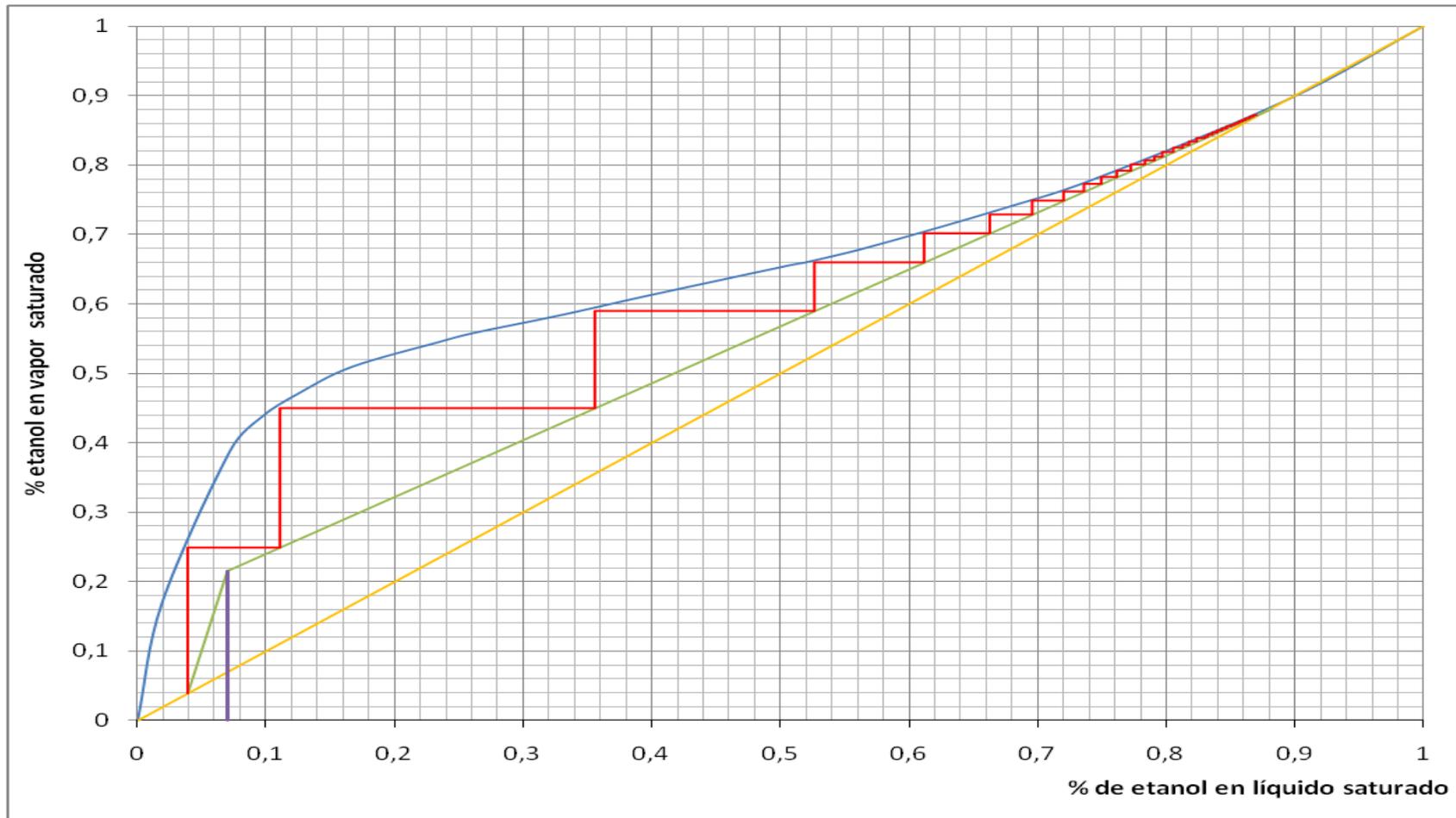
5. El bioetanol se podrá mezclar hasta en un 5% en volumen con gasolina automotriz.

#### **Condiciones Generales**

1. La Superintendencia de Electricidad y Combustibles, establecerá, dentro del año siguiente al de la publicación del decreto de especificaciones para estos combustibles en el Diario Oficial, un método de ensayo alternativo para el número de cetano, parámetro descrito en el artículo 8º del presente decreto.
2. Así mismo, el método de ensayo para la determinación del desnaturalizante deberá ser definido por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles en el plazo de 60 días, a partir de la publicación del decreto de especificaciones para estos combustibles.
3. La Superintendencia de Electricidad y Combustible establecerá el procedimiento, en un plazo de 60 días a contar de la publicación del decreto de especificaciones para estos combustibles, para la inscripción de las instalaciones y las personas naturales y jurídicas que realicen las actividades de producción, importación, almacenamiento, transporte, distribución, mezcla y comercialización de biocombustibles.
4. Será necesario modificar el artículo primero del Decreto Exento Nº 174, de abril de 2001, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción en el siguiente sentido:

## Anexo 9: Calculo de platos de columna de destilación

Gráfico 17: Calculo de platos de columna de destilación



Fuente: Elaboración propia

## Anexo 10: Precio FOB equipos 2007

Tabla 36: Precio FOB equipos 2007

Tipo	Equipo	Cantidad	Precio FOB 2007[US\$]
Lavado (D0)	Filtro Rotatorio	1	112.000
Molienda (D1)	Molino Bolas Vibratorias	1	82.900
Impregnar con Acido (D2)	Reactor	12	489.320
Explosión a Vapor (D3)	Reactor	2	593.248
Filtro Solido/Liquido (D4)	Filtro Rotatorio	2	118.200
SSF (D5)	Fermentador	30	879.345
Filtro (D6)	Filtro Prensa	1	60.472
Destilador (D7)	Destilador	2	220.101
Deshidratador (D8)	Reactor	2	3.900
Purevision (D11)	Reactor	2	168.700
Deshidratador (D10)	Reactor	2	900
Filtro Membrana(D9)	Filtro	1	223.100
Neutr. Y Detox. (D12)	Reactor	5	119.100
Centrifuga (D13)	Centrifuga	1	103.230
Pre Inoculo (D15)	Reactor	3	900
Silo Materia Prima (S1)	Silo Almacenamiento	11	245.987
Tanque H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (T1)	Tanque Almacenamiento	3	17.100
Tanque Ca(OH) <sub>2</sub> (T2)	Tanque Almacenamiento	3	18.600
Silo Agua (S3)	Silo Almacenamiento	9	426.500
Tanque Etanol (T4)	Tanque Almacenamiento	9	78.500
Tanque Xilitol(T5)	Tanque Almacenamiento	3	19.300
Tanque Lignina (T6)	Tanque Almacenamiento	3	47.200
Silo Riles y RIses (S7)	Silo Almacenamiento	7	389.322
Tanque Levadura(T8)	Tanque Almacenamiento	2	47.900
Tanque Levadura I (T9)	Tanque Almacenamiento	5	47.600
Tanque Enzima (T10)	Tanque Almacenamiento	9	79.400
Tanque Nutrientes (T11)	Tanque Almacenamiento	5	36.900
Tanque CO <sub>2</sub> (T12)	Tanque Almacenamiento	16	78.350

**Anexo 11: Cotización costos equipos (FOB 2009)**

Tabla 37: Cotización costos equipos (FOB 2009)

Tipo	Equipo	Cantidad	Precio FOB 2009[US\$]
Lavado (D0)	Filtro Rotatorio	1	120.484
Molienda (D1)	Molino Bolas Vibratorias	1	89.179
Impregnar con Acido (D2)	Reactor	12	526.384
Explosión a Vapor (D3)	Reactor	2	638.184
Filtro Solido/Liquido (D4)	Filtro Rotatorio	2	127.153
SSF (D5)	Fermentador	30	945.952
Filtro (D6)	Filtro Prensa	1	65.053
Destilador (D7)	Destilador	2	236.773
Deshidratador (D8)	Reactor	2	4.195
Purevision (D11)	Reactor	2	181.478
Deshidratador (D10)	Reactor	2	968
Filtro Membrana(D9)	Filtro	1	239.999
Neutr. Y Detox. (D12)	Reactor	5	128.121
Centrifuga (D13)	Centrifuga	1	111.049
Pre Inoculo (D15)	Reactor	3	968
Silo Materia Prima (S1)	Silo Almacenamiento	11	264.620
Tanque H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (T1)	Tanque Almacenamiento	3	18.395
Tanque Ca(OH) <sub>2</sub> (T2)	Tanque Almacenamiento	3	20.009
Silo Agua (S3)	Silo Almacenamiento	9	458.806
Tanque Etanol (T4)	Tanque Almacenamiento	9	84.446
Tanque Xilitol(T5)	Tanque Almacenamiento	3	20.762
Tanque Lignina (T6)	Tanque Almacenamiento	3	50.775
Silo Riles y RISEs (S7)	Silo Almacenamiento	7	418.812
Tanque Levadura(T8)	Tanque Almacenamiento	2	51.528
Tanque Levadura I (T9)	Tanque Almacenamiento	5	51.206
Tanque Enzima (T10)	Tanque Almacenamiento	9	85.414
Tanque Nutrientes (T11)	Tanque Almacenamiento	5	39.695
Tanque CO <sub>2</sub> (T12)	Tanque Almacenamiento	16	84.285

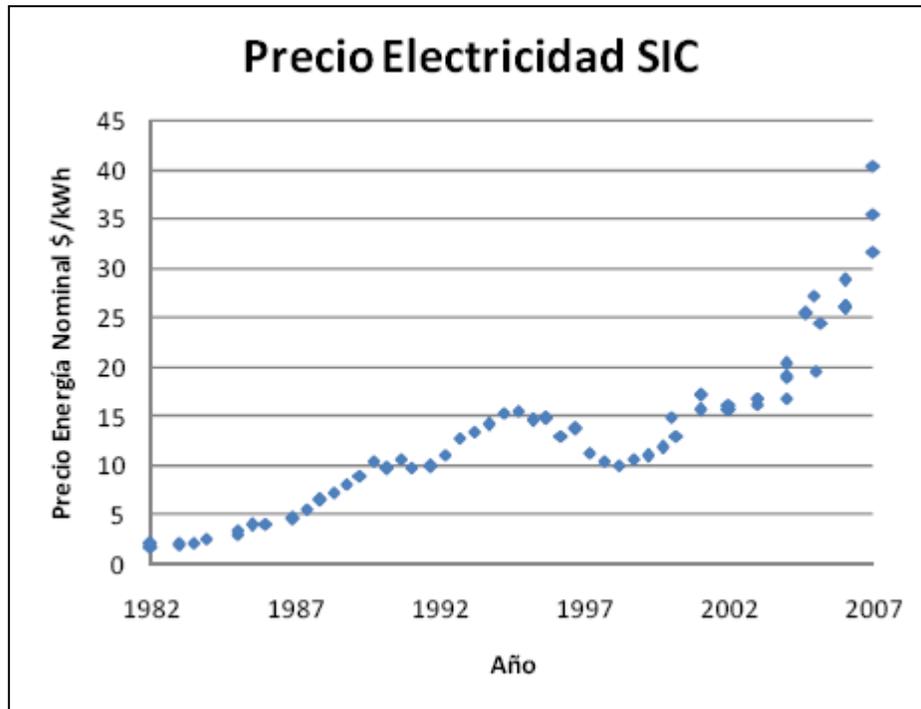
## Anexo 12: Detalle costo de capital

Tabla 38: Detalle costo de capital

	Equipo	Costo de Capital 2009 [US\$ millones]
D0	Lavado	156.629
D1	Molienda	115.933
D2	Impregnar con Acido	8.211.595
D3	Explosión a Vapor	1.659.280
D4	Filtro Solido/Liquido	330.598
D5	SSF	36.892.141
D6	Filtro	84.568
D7	Destilador	615.610
D8	Deshidratador	10.908
D11	Purevision	471.844
D10	Deshidratador	2.517
D9	Filtro Membrana	311.999
D12	Neutr. Y Detox.	832.789
D13	Centrifuga	144.364
D15	Pre Inoculo	3.776
S1	Silo Materia Prima	3.784.061
S3	Silo Agua	71.742
S7	Silo Riles y RISes	78.035
T1	Tanque H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	5.368.029
T2	Tanque Ca(OH) <sub>2</sub>	988.019
T4	Tanque Etanol	80.971
T5	Tanque Xilitol	198.023
T6	Tanque Lignina	3.811.187
T8	Tanque Levadura	133.973
T9	Tanque Levadura I	332.836
T10	Tanque Enzima	999.347
T11	Tanque Nutrientes	258.018
T12	Tanque CO <sub>2</sub>	1.753.123
<b>Total costo equipos no instalados (TCNE)</b>		<b>67.701.917</b>

### Anexo 13: Gráfico del precio de electricidad

Gráfico 18: Precio electricidad SIC



**Anexo 14: Detalle de préstamo y datos de éste**

Tabla 39: Prestamos

<b>PRESTAMOS</b>																				
Periodo																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Amortización	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Interes	5	5	4	4	4	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Saldo</b>	60	55	50	44	38	32	25	17	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40: Datos préstamo

Datos	
<b>Monto Pedido [MM\$]</b>	64
Periodo de Pago [años]	10
Cuota Anual [MM\$]	10
Tasa de Interés [%]	8
Porcentaje de préstamo [%]	40

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 15: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 540 US\$/m<sup>3</sup>, VPN = 0.**

Tabla 41: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. VPN =0

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	540																					
Ingresos por bioetanol		20,19	28,26	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37	40,37
Co- Productos		21,39	29,94	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78
<b>Total Ventas</b>		<b>41,57</b>	<b>58,20</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>	<b>83,15</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
<b>Total Costos</b>		<b>29,48</b>	<b>39,83</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida del Ejercicio Anterior		0	3,17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>-3,17</b>	<b>0,28</b>	<b>13,26</b>	<b>13,67</b>	<b>14,12</b>	<b>14,60</b>	<b>23,48</b>	<b>24,04</b>	<b>26,01</b>	<b>26,01</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>	<b>27,79</b>
Impuestos de 1° Categoría		0,00	0,05	2,25	2,32	2,40	2,48	3,99	4,09	4,42	4,42	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72	4,72
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>-3,17</b>	<b>0,23</b>	<b>11,00</b>	<b>11,35</b>	<b>11,72</b>	<b>12,12</b>	<b>19,49</b>	<b>19,95</b>	<b>21,59</b>	<b>21,59</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3,05	2,53	1,97	1,36	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación Legales		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdida del Ejercicio Anterior		0,00	3,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo Operacional</b>		<b>12,10</b>	<b>18,33</b>	<b>25,54</b>	<b>25,47</b>	<b>25,39</b>	<b>25,31</b>	<b>23,80</b>	<b>23,71</b>	<b>24,74</b>	<b>24,08</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>
Capital de Inversión	160,27																					
Capital de Trabajo	12,74																					
Recuperación de Capital de Trabajo																						12,74
Préstamo	64																					
Amortización		4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo Capital</b>	<b>-108,90</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>-7</b>	<b>-8</b>	<b>-8</b>	<b>-9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,74</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-108,90</b>	<b>7,67</b>	<b>13,55</b>	<b>20,38</b>	<b>19,90</b>	<b>19,37</b>	<b>18,81</b>	<b>16,78</b>	<b>16,12</b>	<b>16,54</b>	<b>15,23</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>23,07</b>	<b>35,81</b>

<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-108,90</b>	<b>-101,24</b>	<b>-87,73</b>	<b>-67,44</b>	<b>-47,66</b>	<b>-28,43</b>	<b>-9,79</b>	<b>6,81</b>	<b>22,74</b>	<b>39,07</b>	<b>54,07</b>	<b>76,76</b>	<b>99,42</b>	<b>122,04</b>	<b>144,63</b>	<b>167,19</b>	<b>189,71</b>	<b>212,20</b>	<b>234,66</b>	<b>257,08</b>	<b>291,83</b>
---------------------	----------------	----------------	---------------	---------------	---------------	---------------	--------------	-------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

Fuente: Elaboración Propia

**Anexo 16: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 680 US\$/m<sup>3</sup>**

Tabla 42: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 680 US\$/m<sup>3</sup>

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	680																					
Ingresos por bioetanol		25,42	35,59	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84	50,84
Co- Productos		21,39	29,94	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78
<b>Total Ventas</b>		<b>46,81</b>	<b>65,53</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>	<b>93,61</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
<b>Total Costos</b>		<b>29,48</b>	<b>39,83</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida del Ejercicio Anterior		0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>2,06</b>	<b>10,78</b>	<b>23,72</b>	<b>24,13</b>	<b>24,58</b>	<b>25,06</b>	<b>33,94</b>	<b>34,50</b>	<b>36,47</b>	<b>36,47</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>	<b>38,26</b>
Impuestos de 1° Categoría		0,35	1,83	4,03	4,10	4,18	4,26	5,77	5,87	6,20	6,20	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50	6,50
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>1,71</b>	<b>8,95</b>	<b>19,69</b>	<b>20,03</b>	<b>20,40</b>	<b>20,80</b>	<b>28,17</b>	<b>28,64</b>	30,27	30,27	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3,05	2,53	1,97	1,36	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación Legales		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdida del Ejercicio Anterior		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo Operacional</b>		<b>16,98</b>	<b>23,87</b>	<b>34,23</b>	<b>34,16</b>	<b>34,08</b>	<b>34,00</b>	<b>32,49</b>	<b>32,39</b>	<b>33,42</b>	<b>32,77</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>
Capital de Inversión	160,27																					
Capital de Trabajo	12,74																					
Recuperación de Capital de Trabajo																						12,74
Préstamo	64																					
Amortización		4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo Capital</b>	<b>-108,90</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>-7</b>	<b>-8</b>	<b>-8</b>	<b>-9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,74</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-108,90</b>	<b>12,56</b>	<b>19,09</b>	<b>29,06</b>	<b>28,58</b>	<b>28,06</b>	<b>27,50</b>	<b>25,47</b>	<b>24,81</b>	<b>25,23</b>	<b>23,92</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>31,75</b>	<b>44,49</b>
<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-108,90</b>	<b>-96,36</b>	<b>-77,33</b>	<b>-48,39</b>	<b>-19,98</b>	<b>7,87</b>	<b>35,12</b>	<b>60,32</b>	<b>84,83</b>	<b>109,72</b>	<b>133,28</b>	<b>164,52</b>	<b>195,71</b>	<b>226,85</b>	<b>257,94</b>	<b>288,99</b>	<b>319,99</b>	<b>350,95</b>	<b>381,86</b>	<b>412,72</b>	<b>455,90</b>	

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 17: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 1.150 US\$/m<sup>3</sup>**

Tabla 43: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 1.150 US\$/m<sup>3</sup>

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	1.150																					
Ingresos por bioetanol		42,99	60,18	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97	85,97
Co- Productos		21,39	29,94	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78
<b>Total Ventas</b>		<b>64,38</b>	<b>90,13</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>	<b>128,75</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
<b>Total Costos</b>		<b>29,48</b>	<b>39,83</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida del Ejercicio Anterior		0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>19,63</b>	<b>35,38</b>	<b>58,86</b>	<b>59,27</b>	<b>59,72</b>	<b>60,20</b>	<b>69,08</b>	<b>69,64</b>	<b>71,61</b>	<b>71,61</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>	<b>73,39</b>
Impuestos de 1° Categoría		3,34	6,01	10,01	10,08	10,15	10,23	11,74	11,84	12,17	12,17	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48	12,48
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>16,29</b>	<b>29,36</b>	<b>48,85</b>	<b>49,19</b>	<b>49,56</b>	<b>49,96</b>	<b>57,33</b>	<b>57,80</b>	59,44	59,44	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92	60,92
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3,05	2,53	1,97	1,36	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación Legales		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdida del Ejercicio Anterior		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo Operacional</b>		<b>31,56</b>	<b>44,28</b>	<b>63,39</b>	<b>63,32</b>	<b>63,24</b>	<b>63,16</b>	<b>61,65</b>	<b>61,56</b>	<b>62,58</b>	<b>61,93</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>
Capital de Inversión	160,27																					
Capital de Trabajo	12,74																					
Recuperación de Capital de Trabajo																						12,74
Préstamo	64																					
Amortización		4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo Capital</b>	<b>-108,90</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>-7</b>	<b>-8</b>	<b>-8</b>	<b>-9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,74</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-108,90</b>	<b>27,14</b>	<b>39,50</b>	<b>58,23</b>	<b>57,74</b>	<b>57,22</b>	<b>56,66</b>	<b>54,63</b>	<b>53,97</b>	<b>54,39</b>	<b>53,08</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>60,92</b>	<b>73,66</b>

<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-108,90</b>	<b>-81,80</b>	<b>-42,41</b>	<b>15,55</b>	<b>72,95</b>	<b>129,75</b>	<b>185,90</b>	<b>239,96</b>	<b>293,29</b>	<b>346,95</b>	<b>399,24</b>	<b>459,16</b>	<b>519,00</b>	<b>578,74</b>	<b>638,39</b>	<b>697,95</b>	<b>757,43</b>	<b>816,81</b>	<b>876,11</b>	<b>935,32</b>	<b>1.006,80</b>
---------------------	----------------	---------------	---------------	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	-----------------

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 18: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 800 US\$/m<sup>3</sup>**

Tabla 44: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 800 US\$/m<sup>3</sup>

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	800																					
Ingresos por bioetanol		29,90	41,86	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81	59,81
Co- Productos		21,39	29,94	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78
<b>Total Ventas</b>		<b>51,29</b>	<b>71,81</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>	<b>102,58</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
<b>Total Costos</b>		<b>29,48</b>	<b>39,83</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida del Ejercicio Anterior		0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>6,54</b>	<b>17,06</b>	<b>32,69</b>	<b>33,10</b>	<b>33,55</b>	<b>34,03</b>	<b>42,91</b>	<b>43,47</b>	<b>45,44</b>	<b>45,44</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>	<b>47,23</b>
Impuestos de 1° Categoría		1,11	2,90	5,56	5,63	5,70	5,79	7,30	7,39	7,73	7,73	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03	8,03
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>5,43</b>	<b>14,16</b>	<b>27,13</b>	<b>27,48</b>	<b>27,85</b>	<b>28,25</b>	<b>35,62</b>	<b>36,08</b>	37,72	37,72	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20	39,20
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3,05	2,53	1,97	1,36	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación Legales		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdida del Ejercicio Anterior		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo Operacional</b>		<b>20,70</b>	<b>29,08</b>	<b>41,67</b>	<b>41,60</b>	<b>41,53</b>	<b>41,44</b>	<b>39,93</b>	<b>39,84</b>	<b>40,87</b>	<b>40,21</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>
Capital de Inversión	160,27																					
Capital de Trabajo	12,74																					
Recuperación de Capital de Trabajo																						12,74
Préstamo	64																					
Amortización		4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo Capital</b>	<b>-108,90</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>-7</b>	<b>-8</b>	<b>-8</b>	<b>-9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,74</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-108,90</b>	<b>16,28</b>	<b>24,30</b>	<b>36,51</b>	<b>36,03</b>	<b>35,51</b>	<b>34,94</b>	<b>32,91</b>	<b>32,25</b>	<b>32,68</b>	<b>31,37</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>39,20</b>	<b>51,94</b>
<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-108,90</b>	<b>-92,64</b>	<b>-68,41</b>	<b>-32,07</b>	<b>3,74</b>	<b>38,98</b>	<b>73,61</b>	<b>106,18</b>	<b>138,05</b>	<b>170,29</b>	<b>201,19</b>	<b>239,75</b>	<b>278,25</b>	<b>316,69</b>	<b>355,08</b>	<b>393,41</b>	<b>431,68</b>	<b>469,89</b>	<b>508,05</b>	<b>546,15</b>	<b>596,56</b>	

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 19: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 600 US\$/m<sup>3</sup>**

Tabla 45: Flujo de caja con préstamo en MMUS\$. Precio bioetanol = 600 US\$/m<sup>3</sup>

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	600																				
Ingresos por bioetanol		22,43	31,40	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86
Co- Productos		21,39	29,94	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78	42,78
<b>Total Ventas</b>		<b>43,82</b>	<b>61,34</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>	<b>87,63</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59	3,59
<b>Total Costos</b>		<b>29,48</b>	<b>39,83</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>	<b>55,36</b>
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida del Ejercicio Anterior		0	0,93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>-0,93</b>	<b>5,66</b>	<b>17,74</b>	<b>18,15</b>	<b>18,60</b>	<b>19,08</b>	<b>27,96</b>	<b>28,52</b>	<b>30,49</b>	<b>30,49</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>	<b>32,28</b>
Impuestos de 1° Categoría		0,00	0,96	3,02	3,09	3,16	3,24	4,75	4,85	5,18	5,18	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49	5,49
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>-0,93</b>	<b>4,70</b>	<b>14,72</b>	<b>15,07</b>	<b>15,44</b>	<b>15,84</b>	<b>23,21</b>	<b>23,67</b>	25,31	25,31	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79	26,79
Gastos Financieros		5,13	4,77	4,39	3,98	3,53	3,05	2,53	1,97	1,36	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación Legales		10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	10,15	1,79	1,79	1,79	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdida del Ejercicio Anterior		0,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Flujo Operacional</b>		<b>14,34</b>	<b>20,55</b>	<b>29,26</b>	<b>29,19</b>	<b>29,12</b>	<b>29,03</b>	<b>27,52</b>	<b>27,43</b>	<b>28,46</b>	<b>27,80</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>
Capital de Inversión	160,27																				
Capital de Trabajo	12,74																				
Recuperación de Capital de Trabajo																					12,74
Préstamo	64																				
Amortización		4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo Capital</b>	<b>-108,90</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>-7</b>	<b>-8</b>	<b>-8</b>	<b>-9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,74</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-108,90</b>	<b>9,92</b>	<b>15,77</b>	<b>24,10</b>	<b>23,62</b>	<b>23,10</b>	<b>22,53</b>	<b>20,50</b>	<b>19,84</b>	<b>20,27</b>	<b>18,96</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>26,79</b>	<b>39,53</b>
<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-108,90</b>	<b>-99,00</b>	<b>-83,27</b>	<b>-59,28</b>	<b>-35,80</b>	<b>-12,88</b>	<b>9,45</b>	<b>29,74</b>	<b>49,35</b>	<b>69,34</b>	<b>88,01</b>	<b>114,37</b>	<b>140,68</b>	<b>166,95</b>	<b>193,19</b>	<b>219,38</b>	<b>245,54</b>	<b>271,65</b>	<b>297,73</b>	<b>323,77</b>	<b>362,13</b>

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 20: Flujo de caja con prestamos en MMUS\$. Sin venta de CO2 y precio bioetanol = 600 US\$/m<sup>3</sup>.**

Tabla 46: Flujo de caja con prestamos en MMUS\$. Sin venta de CO<sub>2</sub> y precio bioetanol = 600 US\$/m<sup>3</sup>.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Precio Bioetanol [USD/m <sup>3</sup> ]	600																				
Ingresos por bioetanol		22,43	31,40	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86	44,86
Co- Productos		3,96	5,55	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92	7,92
<b>Total Ventas</b>		<b>26,39</b>	<b>36,94</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>	<b>52,78</b>
Costos Variables		25,88	36,23	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76	51,76
Costos Fijos		3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54	3,54
<b>Total Costos</b>		<b>29,42</b>	<b>39,77</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>	<b>55,30</b>
Gastos Financieros		5,00	4,65	4,28	3,88	3,44	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Depreciación Legal		9,97	9,97	9,97	9,97	9,97	9,97	1,61	1,61	1,61	1,61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdida del Ejercicio Anterior		0	17,99	35	52	69	85	100	107	113	117	121	123	126	128	131	133	136	139	141	144
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>		<b>-17,99</b>	<b>-35,44</b>	<b>-52,21</b>	<b>-68,58</b>	<b>-84,51</b>	<b>-99,97</b>	<b>-106,57</b>	<b>-112,62</b>	<b>-116,75</b>	<b>-120,88</b>	<b>-123,40</b>	<b>-125,92</b>	<b>-128,44</b>	<b>-130,96</b>	<b>-133,48</b>	<b>-136,00</b>	<b>-138,52</b>	<b>-141,04</b>	<b>-143,56</b>	<b>-146,08</b>
Impuestos de 1ª Categoría		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Utilidad después de los impuestos</b>		<b>-17,99</b>	<b>-35,44</b>	<b>-52,21</b>	<b>-68,58</b>	<b>-84,51</b>	<b>-99,97</b>	<b>-106,57</b>	<b>-112,62</b>	<b>-116,75</b>	<b>-120,88</b>	<b>-123,40</b>	<b>-125,92</b>	<b>-128,44</b>	<b>-130,96</b>	<b>-133,48</b>	<b>-136,00</b>	<b>-138,52</b>	<b>-141,04</b>	<b>-143,56</b>	<b>-146,08</b>
Gastos Financieros		5,00	4,65	4,28	3,88	3,44	2,97	2,47	1,92	1,33	0,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Depreciación Legales		9,97	9,97	9,97	9,97	9,97	9,97	1,61	1,61	1,61	1,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Perdida del Ejercicio Anterior		0,00	17,99	35,44	52,21	68,58	84,51	99,97	106,57	112,62	116,75	120,88	123,40	125,92	128,44	130,96	133,48	136,00	138,52	141,04	143,56
<b>Flujo Operacional</b>		<b>-3,03</b>	<b>-2,83</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-1,19</b>	<b>-1,83</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>
Capital de Inversión	156,12																				
Capital de Trabajo	9,57																				
Recuperación de Capital de Trabajo																					9,57
Préstamo	62																				
Amortización		4	5	5	5	6	6	7	7	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Flujo Capital</b>	<b>-103,24</b>	<b>-4</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-5</b>	<b>-6</b>	<b>-6</b>	<b>-7</b>	<b>-7</b>	<b>-8</b>	<b>-9</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9,57</b>
<b>Flujo de Caja</b>	<b>-103,24</b>	<b>-7,34</b>	<b>-7,48</b>	<b>-7,55</b>	<b>-7,95</b>	<b>-8,39</b>	<b>-8,85</b>	<b>-9,36</b>	<b>-9,91</b>	<b>-9,17</b>	<b>-10,45</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>-2,52</b>	<b>7,05</b>
<b>VAN [MMUS\$]</b>	<b>-103,24</b>	<b>-110,57</b>	<b>-118,03</b>	<b>-125,54</b>	<b>-133,45</b>	<b>-141,77</b>	<b>-150,54</b>	<b>-159,81</b>	<b>-169,60</b>	<b>-178,65</b>	<b>-188,94</b>	<b>-191,42</b>	<b>-193,90</b>	<b>-196,37</b>	<b>-198,84</b>	<b>-201,30</b>	<b>-203,76</b>	<b>-206,22</b>	<b>-208,67</b>	<b>-211,12</b>	<b>-204,28</b>

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 21: CD con planilla de cálculos de balance de masa, dimensionamiento y flujo de caja**