

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**

**ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE
ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

ALEXANDER KINGSWOOD SIDEMAN

**PROFESOR GUÍA:
RODRIGO DONOSO HEDERRA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
GERARDO DIAZ RODENAS
MARCO SCHWARTZ MELGAR**

**SANTIAGO DE CHILE
2010**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL
POR: ALEXANDER KINGSWOOD SIDEMAN
FECHA: 24/3/2010
PROF. GUIA: RODRIGO DONOSO

ESTUDIO EXPLORATORIO DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE JATROPHA CURCAS EN CHILE

La matriz energética chilena se caracteriza por la gran importancia de los combustibles fósiles importados. El presente trabajo de título (TT), cuyo objetivo es estudiar en forma exploratoria la producción de biodiesel a partir del cultivo de jatropha curcas (JC), puede contribuir al reemplazo de éstos mediante el estudio de un tipo de energía renovable no convencional (ERNC). El TT consta de una etapa agronómica, una industrial y una económica. La primera arrojó resultados preliminares, basados en estimaciones tentativas, que deben ser comprobadas experimentalmente. El cultivo de JC en la IV Región produciría 5.000 tn/ha de semilla si se usan las cantidades requeridas de fertilizantes y agua.

El estudio industrial tiene tres fases, correspondiendo la primera a la extracción de aceite a partir de las semillas de JC. Este proceso es similar al de otros cultivos oleaginosos, obteniendo como subproducto una torta de semillas que puede ser utilizada como fertilizante pero no como alimento para ganado por ser venenosa. A partir del aceite se obtiene biodiesel mediante transesterificación con metanol en un reactor continuo, con un catalizador básico. Este es un proceso comercialmente probado, que produce glicerina impura como subproducto, la que en este caso ocasiona una contribución económica pequeña. El diseño conceptual de la planta industrial se basó en el trabajo de Hervé y otros.

La evaluación económica valoró en 14 MM US\$ la inversión en la planta industrial. El precio del biodiesel se estimó en 593 US\$/m³ y el rendimiento de la JC en 1.500 kg/ha de aceite. La plantación de jatropha requirió 72.000 ha en la IV Región. El valor presente neto (VPN) del proyecto correspondió a -718.000 MM\$ Ch, para una tasa de descuento de 15%. La principal causa de este mal resultado fue el elevado valor de la tierra y el costo del riego. Para un VPN igual a 0, el precio del biodiesel debe alcanzar 2.882 US\$/m³ (muy por encima de los niveles históricos) o bien el rendimiento de la JC debe ser de 25,5 tn/ha (5 veces mayor que el actual.) En resumen, el retorno es muy negativo, de acuerdo a las estimaciones de los expertos consultados.

Se introdujeron cambios para estimar mejorías en el cultivo en una zona con mayor pluviosidad. Según expertos el cambio reduciría la inversión por ha en \$4.950.000. Esta alternativa dio un VPN de -244.000 MM\$ CH, apreciablemente mejor que el caso base. Aún considerando un aumento simultáneo de 70% en el precio del biodiesel y 60% en el rendimiento de la JC se obtiene un VPN de -34.000 millones de pesos y una TIR de 11,5%.

Se concluyó que el proyecto es inviable económicamente en la actualidad. Sin embargo, se encontraron factores que deberían ser estudiados en mayor profundidad. Decidir cultivar JC en una zona con un clima apropiado y menores costos de tierra y riego, reducirá la inversión del proyecto agronómico. La viabilidad del uso de la torta de semillas como alimento animal puede agregar valor importante. Aumentar la pureza de la glicerina obtenida posibilita venderla en el mercado de glicerina pura, incrementando los ingresos. Cambios en estos factores pueden mejorar el resultado del proyecto, influenciando la decisión final del mismo.

INDICE

1. Introducción.....	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Descripción del Trabajo de Título.....	1
1.2.1. Comentarios sobre la naturaleza exploratoria del estudio del proyecto.....	2
1.3. Comentarios sobre los Efectos Medioambientales del Proyecto.....	2
2. Objetivos y Metodología.....	4
2.1. Objetivos.....	4
2.1.1. Objetivo general.....	4
2.1.2. Objetivos específicos.....	4
2.2. Metodología.....	4
2.2.1. Investigación de los rendimientos de jatropha curcas.....	5
2.2.1.1. Investigación de la experiencia internacional del cultivo de jatropha curcas ...	5
2.2.1.2. Investigación de la experiencia chilena de la cultivación de jatropha curcas ...	5
2.2.2. Investigación de plantas de biodiesel.....	6
2.2.3. Investigación de los usos de los residuos.....	6
2.2.3.1. Torta de semillas exprimidas.....	6
2.2.3.2. Glicerina.....	7
2.2.3.3. Otros residuos.....	7
2.2.4. Investigación del mercado chileno del biodiesel.....	7
2.2.5. Actualización del análisis de los bonos de carbono.....	7
2.2.6. Análisis de la consideración de generación eléctrica a partir de biodiesel.....	7
2.2.7. Modelos de evaluación económica.....	8
2.2.7.1. Tasa de descuento.....	8
3. Antecedentes Generales.....	9
3.1. Aspectos Generales de Jatropha Curcas.....	9
3.1.1. Historia de jatropha curcas.....	9
3.1.2. Rendimientos históricos de jatropha curcas.....	10
3.1.3. Usos históricos y usos modernos alternativos.....	10
3.2. Antecedentes del Biodiesel.....	11
3.2.1. Antecedentes del petróleo diesel.....	11
3.2.2. Historia del biodiesel.....	11
3.2.3. Composición de biodiesel y estándares de calidad para la comercialización.....	13
3.2.4. Producción de biodiesel.....	14
3.2.5. Perfil de emisiones de la combustión de biodiesel.....	18
3.2.5.1. Gases de efecto local.....	18
3.2.5.2. Gases de efecto global y gases invernaderos.....	19
3.2.6. Antecedentes de la comercialización del biodiesel.....	20
3.3. Antecedentes de los Residuos.....	21
3.3.1. Torta de semillas exprimidas.....	21
3.3.2. Glicerina.....	21

3.3.3.	Otros residuos identificados.....	22
4.	Evaluación Técnica.....	23
4.1.	Aspectos de Jatropha Curcas.....	23
4.1.1.	Rendimientos.....	23
4.1.1.1.	Rendimientos futuros y mejoras del cultivo	24
4.1.2.	Ubicación del cultivo	24
4.1.3.	Manejo agronómico	25
4.1.3.1.	Inversión en terreno.....	25
4.1.3.2.	Establecimiento del cultivo en terreno.....	26
4.1.3.3.	Acciones recurrentes del manejo agronómico	27
4.1.4.	Riesgos locales.....	28
4.2.	Aspectos Técnicos de la Producción de Biodiesel	29
4.2.1.	Ubicación de la planta industrial	29
4.2.2.	Producción de biodiesel	30
4.2.2.1.	Adaptaciones necesarias para considerar aceite de jatropha curcas.....	30
4.2.2.2.	Extracción de aceite	31
4.2.2.3.	Producción de biodiesel	32
4.2.3.	Elección de tecnología.....	33
4.2.3.1.	Justificación del uso de solventes en la extracción.....	33
4.2.4.	Tamaño de planta.....	33
4.3.	Usos y Posibilidades de Reventa de los Residuos.....	34
4.3.1.	Torta de semillas exprimida	34
4.3.2.	Glicerina.....	35
4.4.	Análisis del Mercado de los Derivados del Petróleo	38
4.4.1.	Actualidad del mercado del petróleo diesel y su precio	38
4.4.2.	El futuro del mercado del petróleo diesel y su precio	39
4.5.	El Mercado de Bonos de Carbono	39
4.5.1.	Pasos necesarios para certificar un proyecto que genera bonos de carbono	40
4.5.2.	Factibilidad de vender bonos por el proyecto.....	40
4.6.	Posibilidades de Biodiesel como ERNC en Plantas de Generación Termoeléctricas.....	41
4.6.1.	Factibilidad de contar energía generada a partir de biodiesel como ERNC.....	42
4.6.2.	Influencia del consumo de biodiesel por generadores de electricidad en el precio de venta de biodiesel	42
5.	Evaluación Económica	44
5.1.	Horizonte de evaluación	44
5.2.	Determinación de la Tasa de Descuento	44
5.3.	Escenarios de evaluación del proyecto.....	44
5.4.	Inversión inicial	45
5.5.	Ingresos.....	46
5.6.	Costos.....	47
5.7.	Depreciación y valor residual del proyecto	48
5.8.	Flujos de caja del caso base	48
5.9.	Evaluación económica del caso base.....	52

5.10.	Análisis de sensibilidad a variables	52
5.11.	Comentarios acerca de la posibilidad de disminuir la inversión.....	53
5.11.1.	Requerimiento de capital de trabajo.....	54
5.12.	Comparación con resultados de otros trabajos.....	54
6.	Conclusiones	56
7.	Bibliografía	58
8.	Anexos	67
8.1.	Determinación de una Tasa de Descuento por Metodología CAPM.....	67
8.1.1.	Para cultivos agrícolas	67
8.1.2.	Para empresas relacionadas con la industria de los combustibles	68
8.1.3.	Para este proyecto integrado	68
8.1.4.	Discusión de la validez de la tasa determinada.....	68
8.2.	Adaptación del Balance de Masas para Aceite de Raps a Aceite de Jatropha	70
8.3.	Detalles del proceso de refinación y transesterificación.....	74
8.4.	Detalles de la inversión en implantación del cultivo	75
8.5.	Detalles de los costos del manejo del cultivo.....	77
8.6.	Actualización de la inversión inicial en la planta de biodiesel.....	82
8.7.	Detalle de costos fijos de personal	82

1. Introducción

1.1. Generalidades

El petróleo diesel es irremplazable en Chile como combustible para el transporte y para la calefacción industrial, y hay una inversión significativa en elementos diseñados para su uso. Una reacción simple permite convertir aceites vegetales en un combustible llamado biodiesel, que sirve de reemplazo para el petróleo diesel. Sin embargo, el desarrollo de proyectos que convierten aceites vegetales en biodiesel ha sido limitado en Chile por la falta de materia prima de bajo costo que permitiría que el combustible producido compitiera en precio con el diesel tradicional. *Jatropha curcas*, o *jatropha* es un arbusto oleaginoso rústico difundido por el mundo que ha generado interés por presentar características que lo hacen posiblemente una fuente de materia prima de bajo costo.

1.2. Descripción del Trabajo de Título

El presente trabajo de título consiste en un estudio exploratorio de la producción de biodiesel en una planta industrial a partir del aceite de *jatropha curcas*. El proyecto estudiado aquí contempla el cultivo de *jatropha curcas* en suelos agrícolas apropiados para tal efecto, lo que resulta un elemento importante debido a la baja resistencia de la planta a heladas, tema a ser tratado más adelante. A partir del cultivo de arbustos de *jatropha*, se cosechan frutos maduros que contienen una semilla que porta aceite. Las semillas son llevadas a una planta industrial donde se extrae el aceite en un proceso que utiliza solventes para mejorar el rendimiento. Luego, el aceite se filtra y refina químicamente para formar un producto intermedio libre de impurezas. El aceite refinado es elaborado mediante un proceso continuo que lo convierte en esteres metílicos. El producto elaborado, que debe cumplir con la norma vigente, se certifica como biodiesel y puede ser utilizado directamente en el transporte o calefacción industrial, o bien ser consumido en una mezcla con petróleo diesel.

La rentabilidad del proyecto puede ser mejorada reincorporando algunos de los residuos al proceso productivo o bien comercializándolos, y buscando mercados para los cuales el biodiesel tiene un mayor valor que el petróleo diesel. La necesidad de fertilizantes puede ser mitigada reincorporando los desechos de la extracción de aceite al campo de cultivo. El precio de venta puede ser mejorado buscando clientes con equipamiento diseñado para petróleo diesel, quienes se beneficiarán de incorporar material renovable, como algunos generadores de electricidad. Finalmente, la economía de todo el proyecto tiene potencial de producir bonos de carbono en la medida que el biocombustible producido reemplace el petróleo fósil. La exploración de estos y otros elementos adicionales será un componente que diferencia el desarrollo de este estudio de trabajos previos en esta área.

1.2.1. Comentarios sobre la naturaleza exploratoria del estudio del proyecto

El estudio realizado es de naturaleza exploratoria porque existe muy poca información concreta sobre la productividad del cultivo de jatropha en Chile. El clima chileno y la falta de experiencia con este cultivo hace difícil proyectar con seguridad su rendimiento. Por otra parte, existen posibilidades de mejorar la jatropha a nivel genético en el futuro, por reproducción selectiva o por intervención en el genoma. Junto a mejorías en las técnicas de manejo de la jatropha, por ejemplo, la perfección de una máquina que coseche mecánicamente los frutos, es probable que baje el costo de producir aceite. Estos factores, unidos a la tendencia al aumento del precio de la tierra, los derechos de agua, y la mano de obra, llevan a considerar un rango de rendimientos en la evaluación de la jatropha. La consideración de distintos rendimientos hace cargo del hecho de que varía el costo unitario de cada tonelada de aceite según rendimiento y los precios de los insumos. En un futuro cercano, es probable que un mayor rendimiento sea requerido para proveer semilla y aceite a un mismo costo unitario.

La volatilidad y tendencia al alza de los precios del petróleo también contribuyen a la naturaleza exploratoria del estudio. Bien puede ser el caso que un proyecto inviable a precios del orden de US \$70/barril sea atractivo a US \$170/barril, por lo que la conclusión final sobre la rentabilidad del proyecto debe condicionarse a un rango de precios del petróleo diesel refinado.

Finalmente, no existen estudios de la rentabilidad económica de proyectos de agricultura industrial utilizando jatropha. El cuerpo de investigaciones acerca del impacto económico de la jatropha se concentra en las posibilidades que tiene de mejorar la calidad de vida de personas en zonas rurales que practican agricultura de subsistencia. Por esta razón, este trabajo es necesariamente de tipo exploratorio, pues la revisión bibliográfica exhaustiva no arrojó ninguna metodología apropiada para evaluar proyectos de jatropha de este tipo. Esto es a diferencia de otros cultivos oleaginosos, como el poroto de soya o el raps, donde existe una forma de evaluar la rentabilidad del proyecto aceptada por los inversionistas.

1.3. Comentarios sobre los Efectos Medioambientales del Proyecto

De por sí, el petróleo diesel es un elemento contaminante. Como se ha visto, el reemplazo del gas natural con petróleo después de los cortes de envío del primer combustible desde Argentina provocó un empeoramiento general de la calidad del aire en la Región Metropolitana, lo que apunta al problema de la quema de petróleo diesel.¹

Existe la posibilidad de reemplazar los combustibles fósiles, en especial el petróleo diesel, con biocombustibles. Los biocombustibles son los combustibles sólidos, gaseosos y líquidos producidos a partir de materiales originados en procesos biológicos contemporáneos.² En general, presentan grandes similitudes a los combustibles fósiles en cuanto al

¹ EL MERCURIO, 6 de junio 2009

² COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2009)

comportamiento, pero se derivan de material recientemente vivo, a diferencia de material petrificado que estuvo vivo en una época prehistórica. En el caso del biodiesel, se trata de un reemplazo directo para el petróleo diesel; es decir, se comporta en forma parecida a éste y es miscible en cualquier razón con él. Como se verá adelante, esto favorece la utilización de biodiesel ante otros biocombustibles, pues la distribución de biodiesel aprovecha la infraestructura existente y es utilizable en motores diseñados para petróleo diesel.

2. Objetivos y Metodología

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Evaluar en forma exploratoria la factibilidad técnica-económica la producción de biodiesel a partir de aceite de las semillas de *jatropha curcas*.

2.1.2. Objetivos específicos

1. Estudiar la información disponible para definir la zona de cultivo óptima en Chile y estimar los rendimientos de la *jatropha* en cuanto a cantidad de aceite y atributos de éste.
2. Estudiar la información disponible y consultar con expertos para determinar la inversión y los costos recurrentes de la plantación de *jatropha curcas*.
3. Reunir información técnica acerca de la producción de biodiesel en plantas, empleando tecnología de proceso continuo comercialmente utilizada para evaluar a nivel de pre-factibilidad una planta.
4. Estudiar el marco legal para la comercialización de combustibles de origen biológico.
5. Estimar el precio de venta de biodiesel en el mercado nacional, considerando clientes que podrían tener una preferencia por biodiesel que derivara en un mayor precio de venta.
6. Estudiar las posibilidades de agregar valor al proyecto vendiendo o empleando de otro modo los residuos del cultivo y de la producción de biodiesel.
7. Evaluar económicamente el proyecto integrado utilizando los antecedentes y análisis previos, realizando análisis de la sensibilidad del resultado a las variables relevantes, en particular el rendimiento de *jatropha* por hectárea y el precio de venta del biodiesel.
8. A partir del cuerpo de trabajo previo en esta área, estudiar la factibilidad de agregar valor al proyecto mediante los bonos de carbono generados.
9. Concluir sobre las posibilidades de desarrollo de este proyecto en el país, en particular en un escenario de precios del petróleo altos.

2.2. Metodología

Resumiendo, la metodología comienza con una revisión bibliográfica para conocer antecedentes sobre la *jatropha* y sobre la producción de biodiesel que aportarán datos a la evaluación exploratoria, que se efectuará utilizando técnicas de flujos descontados. Existe una amplia gama de información con respecto a las experiencias de proyectos de cultivo de *jatropha*

en distintos países³, lo que podrá complementar la información que falta sobre las experiencias chilenas actualmente en progreso. Hay un marco técnico-económico completo que respalda la producción de biodiesel a partir de cultivos oleaginosos tradicionales, en especial raps y soya⁴, como por ejemplo los estudios del National Renewable Energies Laboratory de Estados Unidos.

2.2.1. Investigación de los rendimientos de jatropha curcas

Se comenzó revisando la bibliografía acerca de jatropha curcas. Se arribó a un punto en que aunque no son exactamente claros los rendimientos que se producirán en Chile por tratarse de un cultivo novedoso, se tiene una estimación clara de cuánto sería el costo del manejo agronómico del cultivo, valor que se puede sensibilizar a distintos rendimientos. De esta manera, se puede estimar un rango de producciones por hectárea. Se identificaron partes interesadas y principales actores a nivel de la investigación del cultivo para entrevistarlas e integrar su conocimiento. Mediante conversaciones principalmente con José Miguel Carrasco, quien cultiva jatropha y Julio Haberland, un experto en ingeniería agronómica, se pudo integrar conocimiento actualizado y pertinente sobre la estimación de los costos del manejo agronómico de la jatropha en Chile.

2.2.1.1. Investigación de la experiencia internacional del cultivo de jatropha curcas

La investigación del cultivo y los rendimientos de jatropha curcas tomó como fuente principal los informes de distintos organismos, en general sin fines de lucro, que buscan motivar el desarrollo de la jatropha como una manera de proveer oportunidades económicas para los campesinos de las zonas rurales donde este arbusto es fácilmente cultivable. Por lo general, en estos lugares la jatropha ya es conocida como planta medicinal o como cerco viviente usado para restringir los movimientos de animales y demarcar propiedad. Ejemplos de instituciones de esta naturaleza son Centre for Jatropha Promotion (jatrophaworld.org), The Jatropha System (jatropha.de), y Bioversity International (bioversityinternational.org). También se consideraron datos provenientes de promotores comerciales, todos con fines de lucro, como SVM exports (jatrophacurcasindia.com), D1 Oils (d1plc.com), SG Biofuels (sgfuel.com). Se notó una tendencia entre empresas comerciales de exagerar los rendimientos del cultivo, por lo que se filtró estas informaciones para evitar cifras excesivamente optimistas.

2.2.1.2. Investigación de la experiencia chilena de la cultivación de jatropha curcas

A nivel nacional, las Facultades de Agronomía de la Universidad de Chile y de la Universidad de Tarapacá tienen programas de investigación del cultivo de la jatropha curcas. El programa de la Universidad de Chile tiene el objetivo de introducir y desarrollar el cultivo

³ Ver HELLER, HENNING, AKBAR [et al.]

⁴ ver HERVÉ, BETANCOURT, NREL

comercial de la jatropha en Chile, específicamente en la zona centro-norte del país. Con ese fin, maneja varios predios experimentales con cultivos pilotos en sociedad con empresas y escuelas rurales. También tiene como fin la identificación de las zonas más aptas para el crecimiento del arbusto, lo que ha llevado al desarrollo de modelos de los microclimas creados en terrenos en relieve para identificar específicamente los puntos en que se producen heladas. Por otro lado, la Universidad de Tarapacá cultiva jatropha en un predio de 10 hectáreas cerca de Arica, también teniendo como finalidad la investigación y desarrollo comercial del arbusto. Se identificaron ambas universidades como fuentes importantes de conocimiento sobre el tema y se realizaron contactos con académicos de ambas.

Por otro lado, existen varias empresas e instituciones asociadas con los cultivos pilotos de la Universidad de Chile. Se realizaron contactos con Energía Ecológica S.A. para obtener mayor perspectiva e internalizar su experiencia en el manejo de su predio en San José de Melipilla. De especial interés fue su experiencia con las plantaciones en la época invernal.

2.2.2. Investigación de plantas de biodiesel

A través de búsquedas en internet se investigó el proceso de producción del biodiesel, a nivel conceptual, técnico, y comercial. Se prestó especial interés a las adaptaciones requeridas para la sustitución de una materia prima por otra. Se realizó una revisión del trabajo de título de Jérôme Hervé, “Diseño Conceptual De Una Planta De Biodiesel”, que describe la construcción y funcionamiento de una planta industrial de gran tamaño que transforma semillas de raps en biodiesel. Se adaptó después el proceso contemplado en este trabajo para procesar las semillas de jatropha curcas. La adaptación, considerando características químicas del aceite de jatropha, formó la base para la evaluación técnica y económica.

2.2.3. Investigación de los usos de los residuos

Los residuos de jatropha y de la producción de biodiesel pueden aportar valor al proyecto considerado. La metodología de investigación de los residuos contempló la identificación de residuos, la cuantificación de éstos en la cantidad producida y contenidos, y la identificación de los usos posibles, como por ejemplo para fines energéticos.

2.2.3.1. Torta de semillas exprimidas

Torta de semillas es el nombre dado a la masa residual que se desecha después de extraer el aceite de las semillas. Se buscó incorporar esta materia de nuevo al proceso productivo, o bien buscar una forma de comercializarlo. Se investigó el uso de la materia en fertilización, considerando los valores y la posibilidad de reemplazar otros insumos. También se investigó la posibilidad de utilizarlo como alimento animal y como material combustible.

2.2.3.2. Glicerina

El proceso produce una cantidad apreciable de glicerina y jabón que debe ser separada y eliminada del biodiesel final. Se identificaron los usos más promisorios para la glicerina, y se exploraron las implicaciones económicas.

2.2.3.3. Otros residuos

Mientras se investigaban los residuos identificados en la revisión de antecedentes, se buscaron otros residuos de relevancia.

2.2.4. Investigación del mercado chileno del biodiesel

Se efectuó una investigación para determinar una forma adecuada de comercializar el producto principal de la planta de biodiesel.

La ubicación del centro de distribución y la forma en que se retira el biodiesel desde la planta están ligados fuertemente a decisiones sobre la ubicación y tecnología de la planta, la estructura impositiva, los costos de transporte, y los tipos de clientes directos abastecidos con biodiesel, por lo que la investigación de mercado debió identificar variables que influyen en esta decisión.

2.2.5. Actualización del análisis de los bonos de carbono

El análisis de los bonos de carbono se basó en la revisión de recursos bibliográficos relacionados con el Mecanismo de Desarrollo Limpio creado por el Protocolo de Kioto. Para un enfoque orientado al mercado nacional, se estudió el trabajo de título de Felipe Cárcamo, que incluye un análisis interesante de este tema en relación a un proyecto de calefacción solar. Sin embargo, la memoria de Cárcamo data del año 2006, por lo que se hizo un esfuerzo por actualizar su enfoque, buscando desarrollos del mercado local por bonos de carbono posterior a la elaboración de su trabajo de memoria.

2.2.6. Análisis de la consideración de generación eléctrica a partir de biodiesel como una ERNC

Se analizó la posibilidad de utilizar el biodiesel como reemplazo de petróleo diesel y otros derivados del petróleo en plantas de energía eléctrica de tecnología convencional, para lograr el porcentaje de “energía renovable no convencional” (ERNC) requerido por la ley chilena. Se estudió la legislación aplicable y además se realizaron entrevistas a expertos en temas de generación eléctrica. Se buscó específicamente confirmar la hipótesis de que las ventas a generadores eléctricos podrían permitir cobrar un premio por biodiesel por sobre el precio de petróleo diesel.

2.2.7. Modelos de evaluación económica

Se realizó una evaluación económica mediante flujos de caja en base a los parámetros otorgados por las investigaciones previas de los cultivos, procesos y productos. Se consideraron parámetros distintos para distintos escenarios de evaluación, variando el rendimiento del cultivo y el precio de venta del biodiesel producido. Los parámetros fijos de precios y cantidades que influyen en los montos de la inversión inicial, ingresos, costos del proyecto, y el valor residual del proyecto se determinaron durante la investigación previa. En la etapa de la evaluación económica, se eligieron valores apropiados para cada parámetro para el proyecto específico ideado, y se realizaron los cálculos necesarios para construir el flujo de caja.

2.2.7.1. Tasa de descuento

La tasa de descuento se determinó de acuerdo a la máxima tasa utilizada en la evaluación de proyectos relacionados con la jatropha en el mundo.

3. Antecedentes Generales

3.1. Aspectos Generales de *Jatropha Curcas*

Por *Jatropha curcas*, se refiere al arbusto *Jatropha Curcas* L., el miembro más primitivo de la familia de las *Jatrophas*. Otros nombres relevantes en castellano son piñoncillo, piñón, y piñol, entre la variedad de apodosos que recibe en los distintos países latinoamericanos.

La *Jatropha curcas* es una planta de tipo arbustivo, formando pequeños arboles de hasta 5m de altura. Es resistente a la sequía y es capaz de auto-inducir un estado inactivo como mecanismo de defensa, o por cambios en la disponibilidad de luz o temperatura. Se botan hojas como respuesta a condiciones extremas. Las plantas germinadas a partir de semillas producen cuatro raíces auxiliares y una raíz principal, mientras que las plantas reproducidas vegetativamente de material cortado de otra planta no producen la raíz principal. Esto impide el crecimiento de la planta, pues las plantas reproducidas vegetativamente suelen ser susceptibles a sequía debido a la falta de desarrollo del sistema radical.⁵ La propagación por semillas también da una ventaja en resistencia a las heladas.⁶

La polinización de *Jatropha curcas* es por insectos y se teoriza que serían principalmente polillas. Esto implica que los rendimientos estarán afectados por la existencia de insectos adecuados para la polinización, de otra manera la planta no produce frutos. Se ha observado una variedad de insectos involucrados en la polinización de la *Jatropha*, por lo que no existe razón de suponer que en Chile habría déficit de fauna polinizadora. En caso de no existir los animales transportadores adecuados, la polinización debería ser a mano.⁷

Jatropha pertenece a la familia *Euphorbiaceae*, al igual que la higuera (*Ricinus communis*) y desarrolla concentraciones de curcuma, una proteína tóxica similar a la ricina. Algunas variedades menos tóxicas se encuentran en México y Guatemala. Las plantas jóvenes en todas las variedades no desarrollan la toxina hasta una etapa posterior, por lo que los brotes recién germinados pueden ser atacados por ganado.⁸

3.1.1. Historia de *Jatropha curcas*

El probable lugar de origen de la *Jatropha curcas* es Centroamérica, presumiblemente México, aunque existe discrepancia con respecto al lugar exacto. Esta confusión se debe a la falta de evidencia de poblaciones de la planta realmente silvestres, pues siempre las plantas que se han encontrado están asociadas a cultivos intervenidos por el hombre, tratándose de arbustos “escapados” de rejas vivientes presumiblemente por semillas caídas.⁹

⁵ FAQ, *Jatropha World*

⁶ JATROPHA CURCAS PLANTATIONS

⁷ HELLER

⁸ HELLER

⁹ HELLER

La *Jatropha* se encuentra ampliamente difundida por Centroamérica, el Caribe, Sudamérica, Asia y África. Según Heller, fue llevada a las islas Cabo Verde antes de 1800 por marineros portugueses. Se producía en este lugar cantidades significativas de semilla de *Jatropha*, que fue exportada durante la primera mitad del siglo 20. Sin embargo, hoy en día la producción en dicho lugar es prácticamente nula. Se especula que también fueron portugueses quienes difundieron la *Jatropha* por toda la zona tropical del viejo mundo, presumible durante el siglo XVIII. Históricamente, se confunde la *Jatropha* con la higuera. Se hace referencia a la *Jatropha* en la literatura del siglo XIX con el nombre “Castor oil plant”, aunque “Castor oil” sería en estricto rigor el aceite de la higuera (*Ricinus communis*).

3.1.2. Rendimientos históricos de *Jatropha curcas*

El rendimiento histórico de los cultivos de *Jatropha curcas* es muy bajo. Silveira, citado por Heller, estimó que 8.000 hectáreas de las islas Cabo Verde estaban plantadas con *Jatropha* en el año 1934, para una exportación total de entre 5.562 toneladas en 1910 y 4.457 toneladas en 1955, lo que apunta a un rendimiento por hectárea de no más de unos 250 kg de aceite, considerando valores típicos de contenido de aceite. Cabe señalar que son rendimientos típicos de la *Jatropha* en condiciones silvestres, especialmente cuando no recibe agua regularmente.

3.1.3. Usos históricos y usos modernos alternativos

El uso histórico de *Jatropha* en las zonas en que está difundida es como reja viviente. La presencia de curcuma tóxica en las hojas y frutos hace que la planta sea venenosa para los animales por lo que es evitada por ganado y otros herbívoros. La rapidez con que se establece, su carencia de valor alimenticio, y su resistencia a las sequías hace que la *Jatropha* sea ideal para el propósito de crear rejas vivientes. Se propaga tradicionalmente por métodos vegetativos, es decir, por el enraizamiento de una parte cortada de la planta.

En aquellos lugares donde existe *Jatropha* endógena, por plantas silvestres o por uso en rejas vivientes, las semillas son usadas en la medicina tradicional. El aceite produce un efecto purgativo, y es usado para una variedad de curaciones de heridas. En general, el aceite, las hojas, y el látex de la planta parecen tener varios usos médicos que podrían ameritar investigación.

El cultivo histórico señalado en las islas Cabo Verde estaba asociado a la producción de jabón, a partir del aceite de las semillas del arbusto. También existieron plantaciones en países africanos cuya producción fue destinada a la industria del jabón en puertos europeos.

En las últimas dos décadas, se ha señalado la utilidad de la planta en la prevención de la erosión. En Mali, la planta se ha usado en un sistema que busca combinar la meta de control de erosión con provisión de energía rural. El aceite es usado directamente en motores que proveen fuerza motriz para generar luz, bombear agua, y también extraer aceite de las semillas.

3.2. Antecedentes del Biodiesel

3.2.1. Antecedentes del petróleo diesel

Petróleo diesel es el nombre aplicado a cualquier combustible derivado del petróleo utilizable en motores diesel. Inventado por Rudolph Diesel a finales del siglo XIX, el motor diesel es un motor de combustión interna en que el calor de la compresión enciende el combustible en el cilindro, lo que se llama ciclo diesel. El motor diesel contrasta con el motor de ciclo Otto en que la gasolina u otro combustible es encendido por una chispa en el momento de estar comprimido. El combustible diesel más común es un producto de la destilación del petróleo. Esta fracción de la destilación evapora entre 200°C y 350°C, y se compone de una mezcla de cadenas del carbono de entre 8 y 21 átomos de carbono por molécula. Por esto, el petróleo diesel es un aceite combustible destilado liviano (es un líquido a temperatura ambiente) también conocido como “distillate fuel oil N°2”. Es muy similar al keroseno y al combustible de aviación JET-A.

El punto de solidificación sin aditivos es aproximadamente -19°C. El contenido energético por unidad de volumen es mayor que el de la gasolina, aproximadamente 38,6 megajoules¹⁰/litro. El número de cetano o cetanaje¹¹ del petróleo diesel refleja el grado de plenitud y la velocidad de la combustión, cuantificando estos atributos en términos del porcentaje de cetano en la mezcla de hidrocarburos que se comporta de la misma forma. Cetano (C₁₆H₃₄, también llamado hexadecano) es uno de los cientos de moléculas que está presente en el petróleo diesel, y tiene una rápida y completa combustión. Una mezcla de 100% cetano tendría un número cetano de 100; un combustible que se comporta como si tuviera 50% cetano recibe un número cetano de 50. En general los estándares para petróleo diesel exigen valores por sobre 40.¹² El uso de un combustible con número cetano insuficiente resulta en que la combustión no alcanza a terminar antes que se abra la válvula de escape, empeorando las emisiones y reduciendo la fuerza explosiva de la combustión.

3.2.2. Historia del biodiesel

La historia del biodiesel se remonta esencialmente a la creación del motor de combustión interna con ignición por compresión. El primer diseño viable fue exhibido en una muestra en París en el año 1900. Este motor primitivo utilizaba como combustible el aceite de maní. A Rudolph Diesel es atribuida la cita “el uso de aceites vegetales como combustibles en motores hoy puede parecer insignificante, pero con el tiempo puede llegar a desplazar a los derivados del petróleo y el carbón”.¹³

¹⁰ Se usa comúnmente la abreviación MJ para referirse a esta unidad energética.

¹¹ El número de cetano o cetanaje es calculado para el petróleo diesel en forma análoga al más conocido número de octano, o octanaje para la bencina, comparando el comportamiento de un combustible dado al comportamiento de un combustible estandarizado compuesto de solamente cetano o solamente octano respectivamente.

¹² U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2009)

¹³ DIESEL ENGINE MOTOR.COM

Sin embargo, la profecía de Diesel no se ha cumplido. Los diseños de los motores de tipo diesel han sido asociados inseparablemente al uso de aceites derivados del petróleo. Este hecho fue causado por el crecimiento de una infraestructura mundial basada en la extracción, refinación y comercialización del petróleo, lo que presentaba menores costos de extracción, y previno el desarrollo de una infraestructura de combustibles de origen biológico. Sin embargo, se identifica en el año 1937 la primera patente referente a la producción de biodiesel. G. Chavanne, de la Universidad de Bruselas, obtuvo en ese año una patente referente a la transesterificación de aceite de palma. Aunque su método producía esteres etílicos mediante un catalizador ácido, logró por primera vez producir un combustible parecido en viscosidad al petróleo diesel a partir de aceites vegetales más viscosos, eliminando la principal dificultad para reemplazar directamente el combustible fósil. El siguiente año se utilizó un combustible similar derivado también del aceite de la palma aceitera para operar exitosamente buses de transporte de pasajeros en Bélgica.¹⁴

Durante la segunda guerra mundial, hay varias referencias al uso de aceites vegetales como reemplazo de derivados del petróleo. Sin embargo, con el restablecimiento del suministro en los años después de la guerra, pasaron varias décadas de petróleo seguro y barato hasta los cortes de provisión de los años 70. Solamente entonces la comunidad científica volvió a interesarse por los combustibles alternativos. Austria, por ejemplo, después de las crisis del petróleo de los años 70 rápidamente empezó un proceso de investigación y desarrollo del biodiesel, culminando en una planta piloto en el año 1982, y varias plantas industriales durante los años 90.¹⁵

No obstante, en Austria y en muchos otros países el factor más importante que limita el desarrollo de la industria del biodiesel ha sido el precio pagado por el producto. Se comenta en una historia de la industria austriaca que el destino de prácticamente toda la producción del biodiesel ha sido Alemania, donde el impuesto al combustible fósil ha sido más alto, haciendo que el biodiesel (que no pagaba impuesto) tuviese un atractivo margen.

La franquicia tributaria causó una explosión de la industria del biodiesel en Alemania y los países aledaños, a pesar de que las materias primas disponibles son aceites vegetales con altos valores como productos alimenticios, como aceite de palma importada, raps (también llamado colza) y soya. Estos últimos cultivos de clima templado llegaron a cubrir incluso 10% de la superficie cultivable alemana hacia el año 2008.¹⁶ No obstante, el futuro de la industria se encuentra seriamente amenazado por el retiro de los subsidios. Como el biodiesel tendrá que competir en el año 2012 con los combustibles fósiles, sin ninguna exención del impuesto específico en ese país, la predicción inmediata es que la oferta de este combustible en Alemania será cada vez menor.

¹⁴ KNOTHE

¹⁵ AUSTRIAN BIODIESEL INSTITUTE

¹⁶ THEBIOENERGYSITE, "Subsidy loss threatens German bio-fuel industry"

3.2.3. Composición de biodiesel y estándares de calidad para la comercialización

El biodiesel es un líquido inodoro, transparente, de color variando de amarillo claro a café claro, según la materia prima. Se compone de una mezcla homogénea de esteres alquílicos de ácidos grasos (aceites vegetales y animales). Cuando una mezcla de esteres alquílicos cumple con ciertos parámetros que la hace idónea para la combustión por compresión en motores de tipo diesel, recibe el nombre de biodiesel. Es común que el nombre biodiesel se aplique erróneamente a cualquier mezcla de esteres alquílicos aunque pueda estar contaminada o no cumplir la norma por otras razones. “Biodiesel” es más que un nombre comercial para esteres alquílicos: es un estándar con que debe cumplir el producto. Se presenta la norma chilena en la tabla 1.

Tabla 1: Norma Chilena Especificando Características de Biodiesel

Propiedad	Unidad de Valor	medida
Densidad a 15°C	g/cm ³	mín. 0,86 máx. 0,90
Viscosidad a 40°C	mm ² /s (cST=centiStokes)	mín. 3,5 máx. 5,0
Punto de inflamación	°C	mín. 120
Punto de escurrimiento	°C	máx. -1
Azufre total	% masa	máx. 0,005
Residuos de Carbono Conradson (CCR) al 100%	% masa	máx. 0,05
Contenido de ceniza sulfatada	% masa	máx. 0,02
Agua y sedimentos	% volumen	máx. 0,05
Corrosión lámina de cobre (3 horas, 50°C)	grado de corrosión	máx. Nº 2
Valor de neutralización (cantidad de ácido)	mg KOH/g muestra	máx. 0,5
Contenido de éster	% masa	mín. 96,5
Contenido de metanol	% masa	máx. 0,20
Glicerina libre	% masa	máx. 0,02
Glicerina total	% masa	máx. 0,25
Fósforo	mg/kg	máx. 10
Contenido de alcalinos (Na+K)	mg/kg	máx. 5
Contenido de metales (Ca+Mg)	mg/kg	máx. 5
Estabilidad a la oxidación a 110°C	Horas	mín. 6

Fuente: MINISTERIO DE ECONOMÍA

De la norma se rescata que el producto se trata de una mezcla de esteres relativamente pura, sin los principales residuos del proceso de producción como el agua, metanol, y los catalizadores ácidos y básicos. Aparte de la pureza, la norma especifica mínimos para la resistencia del líquido a aumentar su viscosidad a baja temperatura, es decir, su punto de escurrimiento o bien el coeficiente de viscosidad cinemática a 40°C definido por la norma estadounidense.

Como se mencionó antes, la viscosidad del biodiesel es menor que la viscosidad del aceite vegetal, y aproximadamente equivalente a la viscosidad del petróleo diesel, haciéndolo idóneo para ser utilizado en motores diseñados para el combustible fósil. Un punto de diferenciación importante es la relativamente alta temperatura a la que deja de fluir. El

biodiesel deja de fluir libremente y provoca bloqueos en filtros a temperaturas tan altas como -2°C, versus unos -18°C para que ocurra lo mismo con el petróleo diesel. Para el uso en motores de vehículos, el biodiesel puro tendría que ser comercializado en mezcla, pues revisando los resultados de la prueba mostrado en la tabla 2, el comportamiento incluso de una mezcla de 50% biodiesel no presentaría problemas en las regiones de Chile excluyendo las de Aysen, Magallanes y la Antártica Chilena. También es posible utilizar aditivos similares a los que se agrega al petróleo diesel en climas fríos, para bajar el punto de escurrimiento de biodiesel puro.

Tabla 2: Puntos de Escurrimiento en Mezclas de Biodiesel de Distintas Materias Primas

% de biodiesel en mezcla con petróleo diesel	Puntos de escurrimiento para biodiesel producido a partir de soya (°C)	Puntos de escurrimiento para biodiesel producido a partir de raps (°C)
0% (petróleo diesel puro)	-20	-20
0.25%	-20	-20
0.50%	-20	-20
1%	-21	-20
3%	-19	-18
5%	-19	-18
10%	-18	-18
20%	-17	-18
35%	-17	-17
50%	-17	-16
100% (biodiesel puro)	-2	-4

Fuente: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (2006)

El manejo del biodiesel puro no es complicado. Es totalmente no-tóxico y biodegradable. Un derrame del combustible no es un problema grave desde el punto de vista ecológico, más que nada presenta un peligro de deslizarse en caso de pisarlo accidentalmente. Además, el punto de inflamación (combustión de los vapores), la temperatura de ebullición, y la temperatura de humear son mayores para el biodiesel que para el petróleo diesel, lo que apunta a que su manejo es sumamente seguro.¹⁷

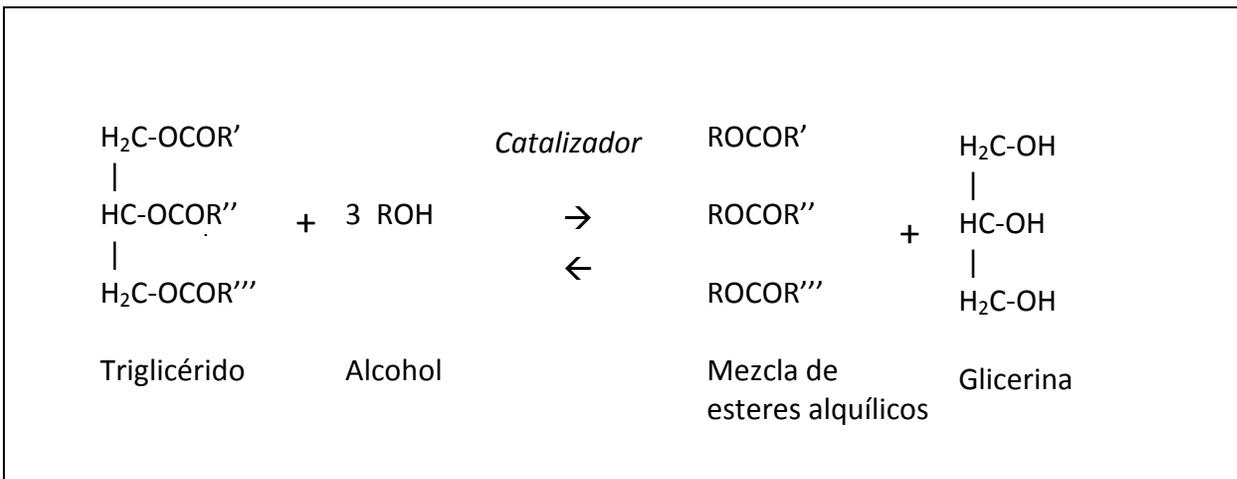
3.2.4. Producción de biodiesel

A partir de aceites vegetales y animales (ácidos grasos) los procesos de producción de biodiesel de primera generación originan un combustible que puede reemplazar al petróleo diesel. Contrastan con procesos de segunda generación, que convierten otras materias primas como la madera en combustibles líquidos similares. El biodiesel de segunda generación aún no está comercialmente disponible. Los medios de elaboración de primera generación buscan acelerar una transformación que ocurre cuando los ácidos grasos están en contacto con alcoholes. Este proceso es conocido como transesterificación. Un éster es transformado en otro mediante el intercambio del grupo alquilo con algún alcohol, lo que produce un éster

¹⁷ NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY

nuevo y un alcohol nuevo. En la producción de biodiesel, el éster original es un triglicérido¹⁸ y el alcohol es etanol o metanol, teniendo la reacción en general el esquema de la ecuación 1.¹⁹

Ecuación 1 : Transesterificación Genérica



Fuente: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY

Se ve que por razón de estequiometría, debe haber 3 moles de alcohol por cada mol de triglicérido, pero en la práctica para acelerar la reacción y garantizar la mayor cantidad de producción de ésteres se suele agregar más alcohol que lo necesario al reactor. En cuanto al catalizador, se ve que la literatura respalda la elección de catalizadores básicos, siendo más rápido el proceder de la reacción en presencia de bases fuertes que en la de ácidos fuertes. También existen otros catalizadores de la reacción de transesterificación, pero en la práctica no hay desarrollo comercial en base a ellos. La línea de investigación actual persigue eliminar el uso del catalizador, mediante procesos que aceleran la reacción entre el alcohol y el aceite, por ejemplo empleando metanol supercrítico.²⁰

Finalmente el biodiesel comercialmente disponible, casi siempre se trata de “metilester”, o ésteres metílicos, en que el grupo alquilo reemplazante ha sido un grupo metilo proveniente de metanol. La razón de esto es principalmente el costo: en general, el metanol es el alcohol más barato disponible, especialmente considerando que el etanol usado en el proceso deberá ser anhídrido, es decir libre de agua. El agua en la solución promueve otra reacción, llamada saponificación, que da lugar a jabones indeseables que tendrán que ser separados. En la ecuación 2, se presenta la reacción específica que tiene la mayor aplicación comercial.

Las cantidades de insumos y productos de la reacción simple dependen de que base o ácido se emplee como catalizador y de la composición química de las materias primas. Aceites animales o aceites usados contienen mayores cantidades de ácidos grasos libres, lo que también promueve la formación de jabones,²¹ y pueden requerir mayor cantidad de catalizador y de

¹⁸ Triglicérido: Es el éster de glicerina (glicerol) con tres ácidos grasos, el elemento principal de las grasas animales y vegetales.

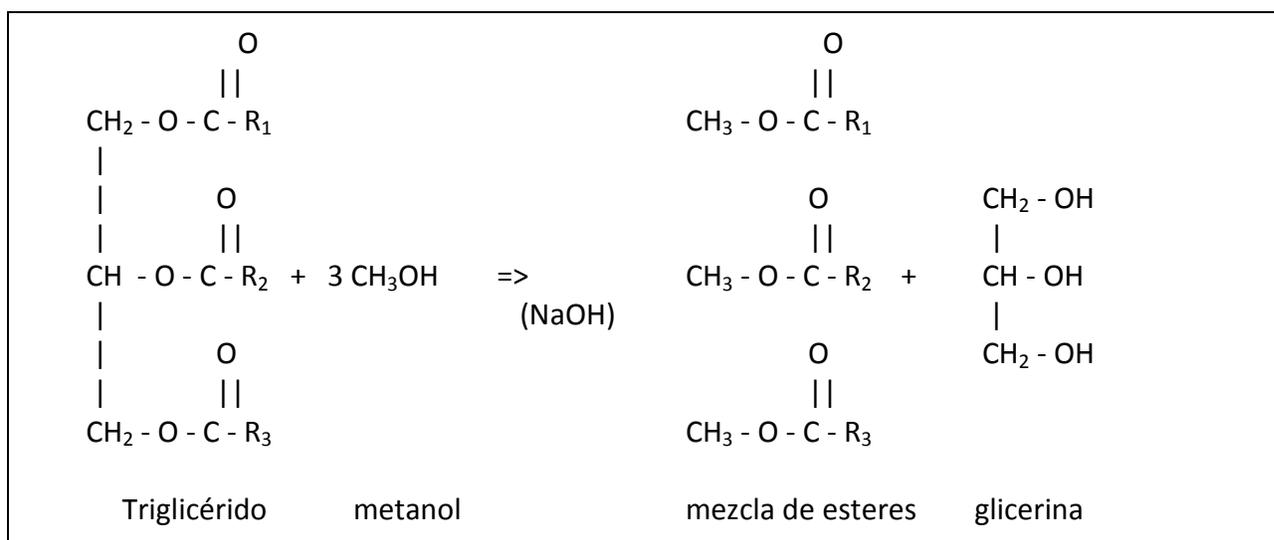
¹⁹ SCHUCHARDT, SERCHELI, Y MATHEUS VARGAS

²⁰ EBERT

²¹ GERPEN

metanol. La tabla 3 enumera los flujos de ingreso y egreso típicos para un proceso de transesterificación con metanol con un catalizador básico.

Ecuación 2: Transesterificación con metanol, catalizado por hidróxido de sodio.



Fuente: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY

La producción de biodiesel por transesterificación sigue el próximo esquema, ejemplificado en la ilustración 1, siendo cada paso esencialmente equivalente para procesos por lotes o continuos²²

Tabla 3: Flujos típicos de ingreso y egreso de la producción de biodiesel.

Ingresos		Egresos	
Aceite	1000 kg	Biodiesel	1000 kg
Metanol	107 kg	Glicerina cruda	125 kg
Catalizador básico (NaOH)	10 kg	Jabón y otros residuos	23 kg
Ácido	8 kg		
Agua	17 kg		

Fuente: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY

Mezcla de Alcohol y Catalizador: Se disuelve en el metanol la soda cáustica.

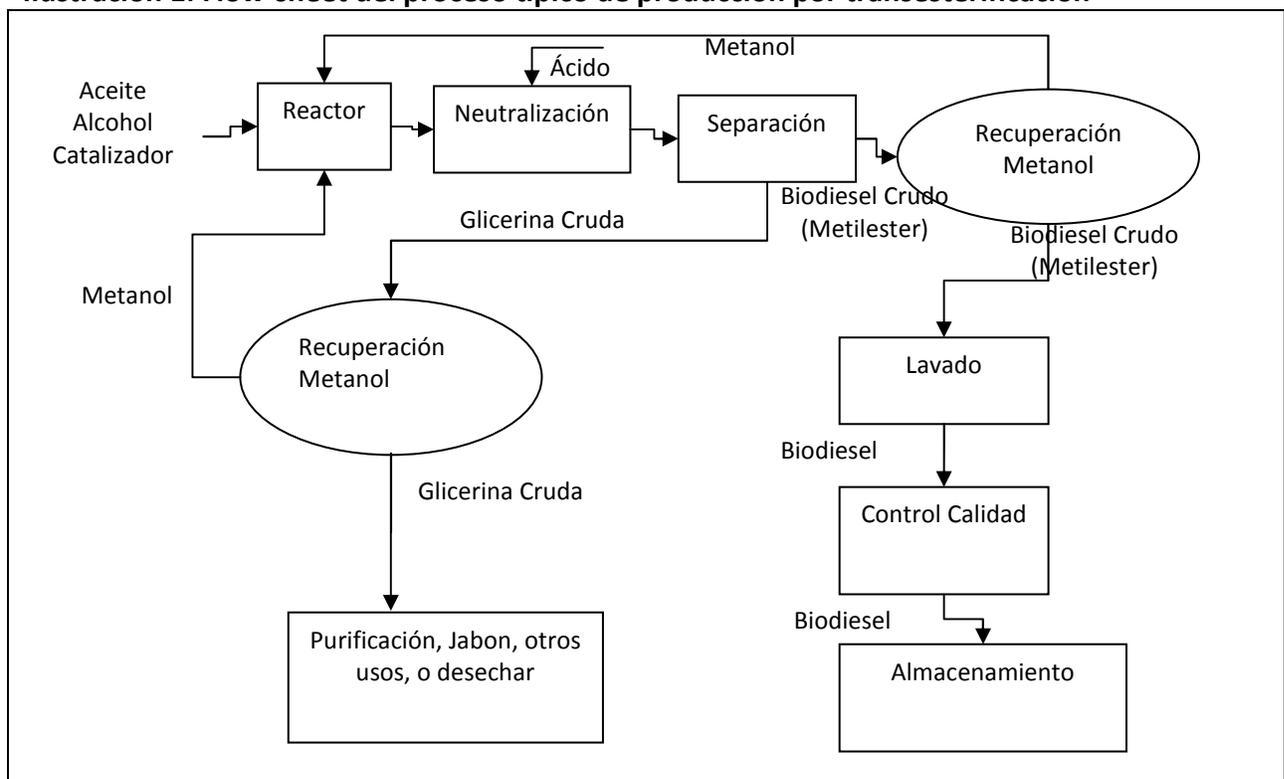
Reacción: La mezcla de alcohol y catalizador se introduce en el aceite, en un recipiente cerrado para prevenir pérdidas de alcohol. La temperatura de la reacción debe ser moderada, ya que altas temperaturas pueden producir más jabón, pero bajas temperaturas pueden hacer

²² NATIONAL BIODIESEL BOARD, "Biodiesel Production and Quality"

excesivamente lenta la reacción. El flujo de ingreso al reactor debe ser controlado periódicamente para evitar la excesiva presencia de agua y altas concentraciones de ácidos grasos libres. Sin embargo, en caso de procesar solamente un tipo de aceite vegetal nuevo, no varían mucho estas propiedades. En caso de usar aceites usados de diferentes fuentes, podría haber diferencias significativas en la composición de estos que haría variar las características del flujo ingresando al reactor. Un exceso de metanol asegura una reacción completa y rápida.

Separación: La reacción tiene como productos glicerina y ésteres metílicos. Mezclado con ambos hay restos del exceso de metanol por sobre la razón estequiométrica. La glicerina es significativamente más densa que el biodiesel, por lo que se separan por gravedad o usando una centrífuga. En algunos casos el catalizador básico puede ser neutralizado en esta etapa, agregando un ácido.

Ilustración 1: Flow-sheet del proceso típico de producción por transesterificación



Fuente: Elaboración propia

Recuperación de Metanol: Una vez separada, el alcohol se remueve por destilación o por evaporación. En todo caso, también es posible remover el alcohol, metanol en este caso, antes de la separación.

Neutralización de la Glicerina: Se remueve el alcohol y el agua de la glicerina para dejar una glicerina cruda sin restos de metanol. Se utiliza un ácido para neutralizar los restos del catalizador, produciendo una sal que en general se elimina con la glicerina. Esta glicerina, aproximadamente 80-88% pura, puede ser almacenada y comercializada. Un paso opcional

antes de comercializar la glicerina sería purificarla mediante destilación, logrando un producto 99% puro que tiene un valor mayor para la industria cosmética y farmacéutica.

Lavado del Biodiesel: Para producir biodiesel que cumple con el estándar, en general es necesario efectuar un lavado, por ejemplo pasando burbujas de aire húmedo o vapor de agua por el biodiesel, para lograr retirar jabones y otras impurezas solubles en agua. El agua, que lleva las impurezas, es separada del biodiesel puro restante.

En cuanto a procesos comercialmente utilizados, lo más común hoy es una planta utilizando este mismo proceso de transesterificación por metóxido de sodio (la solución de soda caustica disuelta en metanol) seguido por neutralización con solución de ácido clorhídrico. El proceso preferido es continuo, teniendo ventajas en la retención de más energía de proceso versus sistemas trabajados por lotes.²³ Este tipo de sistema es utilizado en Argentina, donde está disponible en plantas “llave en mano” comercializados por New Fuel S.A. y otros constructores.²⁴

3.2.5. Perfil de emisiones de la combustión de biodiesel comparado con petróleo diesel

3.2.5.1. Gases de efecto local

El problema de los gases invernaderos, de efecto global, toma segundo lugar frente a la discusión sobre emisiones de efecto local. Las partículas (o material particulado) y óxidos de nitrógeno (NOx) producidas por la combustión de petróleo diesel son nocivas directamente para la salud humana. Los gases NOx contribuyen directamente a la formación de smog fotoquímico, además de irritar los pulmones y las membranas mucosas.²⁵ Respirar material particulado impregna el cuerpo con corpúsculos microscópicos de hollín (el negro de carbón). Mientras las partículas más grandes de 10 μm (micrómetros, o micrones) en general causan solamente problemas respiratorios, los elementos más pequeños de 2,5 μm incluso penetran en el cerebro, con efectos desconocidos.²⁶ Además, los combustibles fósiles tienen algún porcentaje de azufre, lo que produce SO₂, contribuyendo a la lluvia ácida, además de trastornos de la salud humana. En general, estas emisiones de dióxido de azufre son eliminadas por la sustitución con biocombustibles. El azufre, que proviene de las formaciones geográficas en que yacen los combustibles fósiles, simplemente no está presente en la materia orgánica viviente a partir de la cual se elabora el biodiesel.

El biodiesel tiene la posibilidad de mejorar significativamente los perfiles de emisiones (ver ilustración 2). Una ventaja subjetiva pero no menos importante es que reduce significativamente la formación del “humo” diesel, típica de vehículos mal ajustados en

²³ ANDERSON et al.

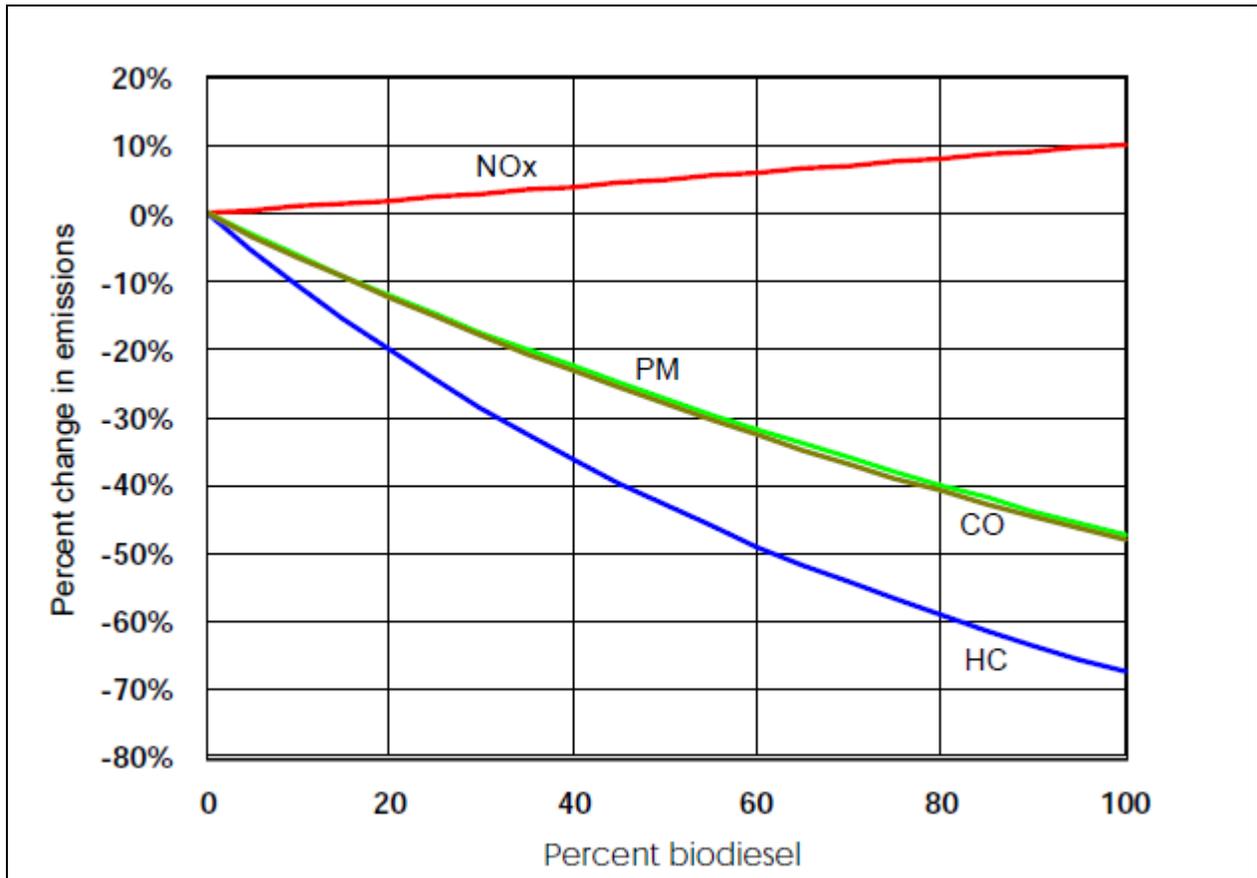
²⁴ NEW FUEL, BIO COMBUSTIBLES MG, BIODYS AMERICA

²⁵ AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY

²⁶ POPE [et al.]

aceleración. Otra ventaja subjetiva es que el biodiesel mejora subjetivamente el olor de la emisión. Mientras la emisión típica de petróleo diesel tiene un olor desagradable, la de biodiesel es parecido al olor de la fritura, lo que a algunos les pueda agradar.²⁷ La implementación de buses alimentados con biodiesel puede ayudar a que la gente tenga mejor percepción del transporte público. Por ambas mejoras reales y las subjetivas, la comercialización de este producto es deseable especialmente en la Región Metropolitana.

Ilustración 2: Cambios en las Emisiones de Distintas Mezclas de Biodiesel con Petróleo Diesel



Fuente: U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY

3.2.5.2. Gases de efecto global y gases invernaderos

El uso de combustibles fósiles produce dióxido de carbono (CO₂). La combustión convierte energía solar antediluviana en energía calorífica, soltando carbono prehistórico que estaba hace millones de años captado en reservas de petróleo crudo, carbón, y gas natural. El resultado es desequilibrar la balanza de carbono – se emite CO₂ proveniente de plantas y animales muertos hace miles de millones de años. Parte del exceso de dióxido de carbono permanece en la atmósfera, ya que las plantas vivientes contemporáneas no son capaces de absorberlo mediante la fotosíntesis. El resultado es que en nuestro medioambiente, año tras año, se concentra más y más dióxido de carbono. Lo que no permanece en el aire se acumula

²⁷ U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, "Biodiesel Handling and Use Guidelines"

en el océano, provocando la acidificación de éste.²⁸ El saldo de una mayor concentración de dióxido de carbono atmosférico es el cambio climático, lo que tiene el potencial de desatar grandes sequías y desastres naturales.²⁹

La ventaja del combustible de origen biológico en materia de generación de gases de invernadero radica en que su combustión devuelve dióxido de carbono al aire que fue captado anteriormente cuando crecía el organismo vivo, por lo que este ciclo no tiene un efecto neto sobre los niveles de dióxido de carbono. Esto contrasta con la combustión del petróleo diesel de origen fósil, que libera dióxido de carbono prehistórico, provocando un aumento neto en los niveles de gas invernadero. Luego, si se logra reemplazar alguna porción del material de origen fósil quemado, se logra una reducción pareja del aumento neto de dióxido de carbono en la biosfera.

3.2.6. Antecedentes de la comercialización del biodiesel

El biodiesel ofrece beneficios en la lubricación del motor, reduciendo más la fricción entre las piezas del motor comparado con petróleo diesel. Además de reducir el desgaste del motor, esta reducción de fricción aumenta la eficiencia del motor, en parte compensando el ligeramente menor contenido energético del biodiesel. Entre el aumento de eficiencia y la menor energía específica, una unidad volumétrica de biodiesel es prácticamente igual a una unidad de petróleo diesel. Esto se traduce en que el rendimiento de un motor, en términos de kilómetros por litro, es muy similar cuando opera con biodiesel o con petróleo diesel. Los índices de cetano de biodiesel son altos, superando fácilmente los mínimos para el petróleo diesel, lo que asegura una combustión adecuada. Existen normas legales en Chile para la comercialización de un biodiesel estándar³⁰, lo que agiliza la venta del producto. En resumen, no hay desventajas para el usuario final el consumir biodiesel en vez de petróleo diesel, por lo que dado el mismo precio, tendría que ser indiferente. En total, parece ser muy asequible una sustitución parcial del petróleo diesel por biodiesel.

En algunos países de Europa, especialmente en Alemania, se desarrolló durante los años noventa una industria de biodiesel (ver sección 3.2.3 del informe.) También existe intercambio internacional de biodiesel, entre distintos países de Europa, y entre Malasia y Argentina y Europa.³¹ En Europa, este biodiesel se destina al consumo por transporte, en muchos casos mezclado con 80% de petróleo diesel por los distribuidores tradicionales de petróleo diesel.³² El aceite utilizado en la producción de biodiesel varía en sus fuentes, tales como aceite de palma en climas tropicales (Malasia), el aceite de raps en climas templados (Alemania, Austria), y el aceite de soya (Argentina y EEUU).

En Arancibia (et al.) se propone un sistema de comercialización a través de tambores de 228 litros, que serían retirados llenos por los clientes y devueltos vacíos en el momento de adquirir más combustible. Pablo Schoennenbeck, un consultor en la industria energética,

²⁸ KOLBERT

²⁹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

³⁰ SUPERINTENDENCIA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES

³¹ CENTER FOR AGRICULTURAL AND RURAL DEVELOPMENT, ISU

³² CÁMARA ARGENTINA DE ENERGÍAS RENOVABLES

comentó en contacto personal que en un plan de negocios³³ que confeccionó, los clientes retiran el biodiesel en camiones desde la planta productiva. En este plan conceptual, se ubicó la planta cerca de los distribuidores de combustibles en la vecindad de la refinería de Concón quienes retiraban el combustible en camiones estancos. No se hace mención a las ventajas de ubicar la planta cerca de las fuentes de materia prima en el documento.

3.3. Antecedentes de los Residuos

3.3.1. Torta de semillas exprimidas

La torta de semillas es la parte de la semilla y la cáscara que resta después del prensado de aceite. Dependiendo de la manera de prensar, puede contener aceite residual. En la medida que contiene aceite residual, puede tener propiedades insecticidas, lo que puede ser beneficioso en la medida que disminuye plagas³⁴. Por otro lado, también puede disminuir la fauna simbiótica por lo que en ese sentido tiene un efecto neutro. La torta tiene propiedades similares a fertilizantes orgánicos. Los contenidos de NPK (nitrógeno, fósforo, y potasio) son 6%, 2,75%, and 0,94%, lo que lo hace parecido al guano de aves y un fertilizante apto para la aplicación al cultivo.³⁵

3.3.2. Glicerina

Como una parte importante del balance de masa y al menos 7,9% del flujo de productos que egresa del proceso³⁶, no se puede ignorar la glicerina (también llamado glicerol). La glicerina producida está lejos de ser un producto perfectamente comercializable, por estar contaminado con jabones, agua, trazas de metanol dependiendo de la eficiencia de la recuperación, y sales del catalizador utilizado después de neutralizar. El valor comercial de glicerina pura es alto, alcanzando más de \$800 USD/tonelada para un producto 99% puro, y más de \$1400 USD/tonelada para un producto de calidad farmacéutica, es decir 99,9% puro³⁷. Por otro lado, los precios de la glicerina cruda han colapsado debido a la gran disponibilidad de este material como residuo de la producción de biodiesel. Sin embargo, destilar la glicerina para obtenerla en su estado puro puede que no siempre sea económico, pues el punto de ebullición de la glicerina es 290° C y el proceso es intensivo en el uso de energía. La búsqueda de los investigadores por alguna alternativa que agregue valor a la glicerina cruda sigue. Hasta el momento, la comunidad científica ha investigado algunas alternativas en nutrición animal y producción química, opciones que aún son dependientes de purificar en algún grado la glicerina.³⁸

³³ SCHOENNENBECK [et al.]

³⁴ JATROPHA WORLD, *Planting Science*

³⁵ SVM EXPORTS, *Cultivation Aspects*

³⁶ JOURNEY TO FOREVER

³⁷ ICIS PRICING

³⁸ NILLE, Dave "Combating the Glycerine Glut"

Existe evidencia en la forma de anécdotas de una variedad de usos de la glicerina en la producción de energía.³⁹ La combustión directa de glicerina es difícil debido a que la combustión incompleta produce residuos en forma de lodos espesos en los mecheros o inyectores de quemadores, incluso los de diseño específico para la glicerina. Una opción que promete mucho es la formación de una masa sólida mezclando glicerina con aserrín u otra biomasa, lo que puede reemplazar una cantidad significativa de leña debido a su alto contenido energético.

Otra forma de producir energía utilizando la glicerina cruda es alimentar un digestor anaeróbico con el residuo, lo que se ha demostrado aumenta significativamente la producción de biogás. De manera similar, la producción de tierra de compost es favorecida por agregar glicerina a la mezcla de residuos orgánicos. Evidencia anecdótica del uso de glicerina en digestores anaeróbicos y en la producción de compost sugiere que hay especies de bacteria favorecidas por la presencia de glicerina, lo que eleva la temperatura de la mezcla de residuos y acelera los procesos de descomposición.⁴⁰

Finalmente, se pueden producir jabones de glicerina y desengrasantes industriales a partir de la glicerina, agregando agua y catalizador adicional para promover la saponificación.

3.3.3. Otros residuos identificados

La revisión de la bibliografía y de los antecedentes del biodiesel no revela importantes residuos aparte de la torta de semillas y la glicerina. El cultivo produce cantidades insignificantes de residuos orgánicos en la forma de hojas caídas de las plantas. También se comenta la posibilidad de recuperar la sal producida por la neutralización del catalizador en caso de haber usado hidróxido de potasio. Sin embargo, el cloruro de potasio producido no representa un peso grande, siendo menos del 2% del peso total del flujo de productos egresados del proceso. Es una pequeña cantidad de fertilizante sin un valor comercial que justificaría los costos de separarla de la glicerina.

³⁹ JOURNEY TO FOREVER

⁴⁰ JOURNEY TO FOREVER

4. Evaluación Técnica

4.1. Aspectos de *Jatropha Curcas*

4.1.1. Rendimientos

Mucho del actual interés por la *jatropha* ha sido provocado por un excesivo optimismo en cuanto a los rendimientos posibles sin riego en suelos marginales. Este optimismo es infundado. La experiencia histórica demuestra que sin agua y sin fertilización, los rendimientos esperables son extremadamente bajos. Los pocos proyectos en que *jatropha* efectivamente rinde varias toneladas de semilla por hectárea son irrigados y fertilizados para lograr una alta producción.⁴¹ Es decir que la *jatropha* es como cualquier otro cultivo: no produce una gran cosecha sin una intervención humana y un manejo agronómico adecuado.

En plantaciones regadas y fertilizadas, existe evidencia de un amplio rango del peso de la cosecha de semillas por hectárea, entre menos de 1000 kg por hectárea para plantas jóvenes y hasta 8.000 kg/ha en plantas maduras. En las zonas tropicales, la *jatropha* puede producir varias cosechas al año, lo que influye positivamente en su rendimiento. Las diferencias entre los ciclos de producción en las zonas sin estaciones y zonas con las estaciones marcadas contribuyen a la variedad de rendimientos observados en la documentación. Existen estimaciones extremadamente optimistas. Algunos reivindican una producción de hasta 10.000 kg/ha como logable. Sin embargo, el consenso de la conferencia de expertos del año 2007 es que debe ser bastante menor, no más de 5.000 kg/ha en plantas completamente maduras.⁴²

También hay cuantificaciones en varios documentos del contenido de aceite de las semillas, estimado en aproximadamente 35% del peso con una varianza amplia.⁴³ Sin embargo, para todos efectos se puede confiar en una extracción de aceite equivalente a un 25% del peso de la semilla con prensas mecánicas sencillas en condiciones rurales, o un 30% utilizando solventes para aumentar la extracción.⁴⁴

En cuanto a cifras equilibradas para la producción de aceite, SG Biofuels estima que producción entre 200 y 300 galones por hectárea, o 758 a 1137 litros/ha es fácilmente logable hoy. En 2007, se produjo un acuerdo entre científicos en una conferencia de que el rendimiento de una plantación madura, es decir, con 5 años de edad, sería alrededor de 5 toneladas de semillas al año. Se refiere a un acuerdo porque hay grandes discrepancias. Considerando un proceso de extracción con hexano, que debe extraer un 100% del aceite disponible, y asumiendo un contenido de aceite de 30% del peso de la semilla, el rendimiento esperable después de 5 años de crecimiento sería 1.500 kilogramos de aceite por hectárea. Por supuesto, esto ocurrirá siempre y cuando se trate de un cultivo fertilizado, cuyas necesidades de agua hayan sido satisfechas, y que se encuentre en una zona libre de fuertes heladas.⁴⁵

⁴¹ EULER

⁴² HENNING

⁴³ HELLER

⁴⁴ SAYYAR [et. al]

⁴⁵ ACHTEN [et. al]

4.1.1.1. Rendimientos futuros y mejorías del cultivo

A pesar de que *Jatropha* haya sido difundida por el hombre en todo el mundo, no existen variedades de *Jatropha* estandarizadas y estabilizadas genéticamente. El resultado es que en un campo plantado con *Jatropha* hay variedad significativa entre un arbusto y otro. Por supuesto la variabilidad genética afecta el fenotipo en la producción de semillas y en la producción de aceite. Se identifica en la documentación y en el desarrollo de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile un potencial para la mejoría de las cosechas de aceite.⁴⁶

Un ejemplo fehaciente de las posibilidades de mejoría de la *Jatropha* es el progreso del tomate. El tomate silvestre, el origen del tomate cultivado, es una planta "auto incompatible"⁴⁷ oriunda del norte de Chile y del Perú. Requiere de polinización entre plantas mediante insectos, al igual que *Jatropha*, y produce una fruta pequeña, redonda, y arrugada, como un arándano con la piel rugosa. Existen variedades rojas, amarillas, y verdes. Debido a la domesticación, manejo genético y selección, hoy el tomate cultivado es auto-compatible y tiene una tendencia fuerte a auto-fertilizarse. Una planta de tomate se reproducirá siempre consigo mismo, produciendo generaciones sucesivas de plantas prácticamente idénticas. El tomate domesticado produce frutas de todas las formas y tamaños posibles, es uniformemente rojo, amarillo, púrpura, o cualquier mezcla de colores que se pueda desear. La piel es lisa. La *Jatropha* está hoy en un estado similar al tomate hace 200 años, y aunque no presente todas las características que favorecieron el mejoramiento genético del tomate, es probable que los avances genéticos puedan producir mejorías significativas en su productividad.⁴⁸

En el contexto de una entrevista, José Miguel Carrasco, gerente general de ENECO, una empresa socia de la Universidad de Chile en el proyecto de investigación de la *Jatropha curcas*, comentó que según sus evaluaciones internas, el proyecto empieza a ser atractivo en Chile para rendimientos de alrededor de 2.000 kilogramos de aceite por hectárea. Según estimaciones de SG Biofuels, las mejorías genéticas pueden producir aumentos de hasta 100% del rendimiento. Según Henning, en una plantación típica de *Jatropha* pueden fácilmente existir plantas que rindan hasta un 20% más de peso de semilla y otras que rindan hasta un 20% menos. Mediante la propagación vegetativa de un ejemplar de alto rendimiento sería factible lograr una mejoría del rendimiento, aún con esta técnica rudimentaria de selección. Estas posibilidades de mejoría requieren que se evalúen distintos escenarios de rendimiento, ya que es probable que en el corto plazo se provoque al menos un aumento del orden de 25% por simplemente reproducir la planta por semillas recogidas de los arbustos más productivos.

4.1.2. Ubicación del cultivo

Por la baja resistencia de *Jatropha curcas* a heladas, el cultivo puede ubicarse al norte de la Región Metropolitana sin problemas. Por ejemplo, los valles al interior de la cuarta región de

⁴⁶ PROGRAMA JATROPHA CHILE y PANEQUE (2008)

⁴⁷ La auto-incompatibilidad refiere a la inhabilidad de una planta de fertilizarse a sí misma y producir frutos. Es el caso que una sola planta con esta característica no produce frutos, y para lograr una cosecha deben haber dos.

⁴⁸ BAI y LINDHOUT

Coquimbo presentan temperaturas mínimas ambientales que permiten el cultivo de jatropha sin preocupaciones de heladas.⁴⁹ Sin embargo, revisando la información de temperaturas mínimas medias anuales para las regiones V, VI, Metropolitana, y VII en la tabla 4, surgen como opciones interesantes los sectores costeros. Las temperaturas mínimas de los meses invernales en los valles centrales se acercan a cero, por lo que eventualmente en lugares puntuales podría provocar heladas. Por otro lado, sectores como Los Vilos o Constitución registran temperaturas mínimas más altas, por lo que con una mejor verificación de los rendimientos en lugares de bajas temperaturas se podrían considerar.

Tabla 4: Caracterización de los parámetros térmicos, al interior de la macrozona central, temperatura(°C)

Sector Agroclimático	Media anual (TMa)	Máxima mes más cálido (TXE)	Mínima mes más frío (TXJ)	Acumulación térmica (días/grado)
Los Vilos	13,9	21,2	7,6	1.415
Alicahue	8,6	21,8	-3,2	300
Valparaíso	14,8	22,5	8,3	1.700
Pumanque	14,9	27,7	5,8	1.800
Quillota	15,3	27	5,5	1.900
Santiago	13,9	29	2,8	1.528
Rengo	13,7	28,1	2,9	1.450
El Teniente	10	20	0,4	680
Constitución	14	24	6	1.500
Hidango	13,6	24,7	5,4	1.328
Cauquenes	15,2	31,3	4,6	1.900
Talca	14,9	30,8	7	1.854

Fuente: SERVICIO AGRICOLA Y GANADERO

4.1.3. Manejo agronómico

4.1.3.1. Inversión en terreno

La inversión en terreno es uno de los mayores costos del establecimiento del cultivo, ya que el terreno contemplado debe contar con derechos de agua, o al menos acceso al agua. En el trabajo de David Arancibia, se contempla comprar un suelo agrícola de tipo IV y se estima para tal inversión un precio de \$1.000.000 la hectárea.

Como se ha definido que el cultivo debe ser regado, las opciones se limitan a suelos de mayor costo. En contacto personal con Julio Haberland, un profesor experto en riego de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Chile, se estableció que el precio actual del suelo en la IV región con posibilidades de riego estaría en torno a \$4.000.000. Por otro lado, él estima

⁴⁹ COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE

que el precio de una acción de agua en la zona sería aproximadamente \$4.500.000 por 5000 m³-año de agua. Las plantas requieren de riego por goteo, aproximadamente 10 litros por planta en intervalos de 15 días durante 8 meses del año.⁵⁰ Haberland estima el costo de la instalación de un sistema de riego en aproximadamente \$1.500.000 por ha, incluyendo las obras de electrificación, con una vida útil de 10 años.

Hay una diferencia significativa de los montos considerados en este trabajo y los considerados por Arancibia. El bajo monto de la estimación se debe a que él contempla utilizar suelos de bajo precio, la mayoría de los cuales están en pendiente⁵¹, o bien se encuentran en lugares para los cuales no hay acceso al agua de riego. En ambos casos, no hay posibilidades de riego. Arancibia no consideró el riego de la *Jatropha*, presumiblemente porque en mucha literatura se presenta la planta como resistente a la sequía sin considerar el bajo rendimiento en situaciones de falta de agua.

Según la conversación con José Miguel Carrasco (de ENECO), se estima conveniente plantar los arbustos a distancia de 1 metro en filas separadas por espacios de 3 metros, para eventualmente poder realizar una cosecha mecanizada. Este esquema de implantación rinde una densidad de 3000 plantas por hectárea. Son 500 arbustos más por cada hectárea comparada con la densidad que comúnmente se menciona en la literatura⁵² debido a que los arbustos en Chile alcanzarán un menor porte. Con el esquema de riego mencionado⁵³, la alta eficiencia se traduce en que cada acción de agua de embalse de 5000 m³ aportará agua suficiente para aproximadamente 10 ha.

4.1.3.2. Establecimiento del cultivo en terreno

Para el establecimiento del cultivo, se ha acogido el manejo sugerido por Arancibia [et al.]. El primer paso es la germinación de semillas de *jatropha* en un invernadero, lo que busca maximizar la tasa de germinación y permitir la sobrevivencia de la pequeña planta, que puede ser vulnerable a depredación animal o extremas condiciones climáticas. Una segunda etapa transfiere las plantas a un sombreado, donde reciben más estrés de viento y se establece un desarrollo radicular de una forma más definitiva. Finalmente, son trasladados al campo de cultivo, donde se instalan en sus posiciones definitivas. Allí pasarán los próximos 50 años como un cultivo productivo.

El proceso de germinación contempla la siembra en bandejas de plástico llenadas con un sustrato de tierra tratado con fungicidas para evitar la “caída de almácigo”, un síntoma de la presencia de ciertos hongos de suelo. Las bandejas se mantienen en un invernadero temporario sin calefacción, en que se asegura una temperatura alta, especialmente en las noches. El diseño de este invernadero es de bajo costo, siendo utilizado solamente una vez para instalar el cultivo y después desechado. También se controla cuidadosamente el riego de las bandejas, para mantener una alta humedad de suelo. Contemplando aproximadamente 3000

⁵⁰ JATROPHA WORLD,

⁵¹ SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS

⁵² HELLER, HENNIG, JATROPHA WORLD,

⁵³ SERVICIO AGRICOLA GANADERO, “Métodos de Riego”

arbustos por hectárea y una tasa de germinación de 80%, cada hectárea requiere de 3750 semillas, y con un peso de aproximadamente 700 gr por 1000 semillas, se necesita 2,63 kg de semillas por hectárea.

En la etapa del sombreado, la planta es preparada para el trasplante definitivo. Se remueve de las bandejas, trasladando las plantas a bolsas de plástico, y se instala debajo de una malla raschel, permitiendo una menor insolación del cultivo. Se riega con menos frecuencia y sin fertilización para madurar la planta y engrosar la talla. En aproximadamente 2 meses, las plantas podrán ser trasplantadas definitivamente.

Antes del trasplante definitivo, se debe preparar el terreno. Las malezas presentes en la tierra deben ser controladas antes de la instalación de las plantas para evitar la competencia de vegetación indeseada. Una vez que el terreno esté preparado, las plantas deben ser trasplantadas desde las bolsas a la tierra, con cuidado de no dañar los sistemas radiculares.

4.1.3.3. Acciones recurrentes del manejo agronómico

Tabla 5: Requerimientos macro-nutrientes, Kg/Ha-año, con 50% del requerimiento suplido por la tierra

Año	1	2	3	4
N	23	34	69	103
P	7	11	21	32
K	34	50	101	151

Fuente: FACT

Tabla 6: Contenidos macro-nutrientes % peso para fertilizantes comunes

	N	P	K
Urea	45	0	0
Nitrato de Potasio	13	0	44
Superfosfato Triple	0	45	0

Fuente: CHEMICALLAND21.COM, ODEPA

Tabla 7: Cantidades de fertilizante aplicadas, en Kg/ha-año

Año	1	2	3	4
Urea	47	68	140	208
Nitrato de Potasio	16	25	48	73
Superfosfato Triple	76	111	224	336

FUENTE: FACT

Los costos recurrentes del cultivo se asocian a la mantención del predio, contemplando acciones de poda y de fertilización, el control de malezas, y la cosecha anual de semillas de jatropha. Las plantas se podan una vez al año, durante la estación de invierno, por ejemplo, en julio. Se aplica Podexal, un producto que previene la entrada de enfermedades a través de la

superficie de corte de la poda.⁵⁴ La fertilización es una vez al año en octubre, con urea, ácido fosfórico, y nitrato de potasio, productos genéricos que aportan los 3 macro-nutrientes esenciales: nitrógeno, fósforo, y potasio (NPK). Considerando los requerimientos de la jatropha en la tabla 5, y los valores de macro-nutrientes (en porcentaje de peso) en la tabla 6, se determina la cantidad de fertilizante a utilizar en los primeros 4 años en la tabla 7. A partir del cuarto año se presume madura la plantación, repitiendo para cada año posterior al cuarto el mismo esquema de fertilización.

También se debe devolver una cantidad importante de los residuos de las semillas exprimidas al campo. Después de la extracción del aceite, se deben devolver al menos 3.000 kilogramos por hectárea de la materia restante o torta de semilla a la tierra.

La aplicación de herbicida anual tiene como fin prevenir el crecimiento de malezas que compiten con la jatropha en el uso de nutrientes y agua de riego. Se aplica Rango 480 SL, un herbicida no selectivo, directamente a las malezas en octubre, con cuidado de no rociar los arbustos de jatropha.⁵⁵

Hay una cosecha anual de los frutos maduros de la jatropha durante diciembre y enero. Una empresa, BEI International, ha aplicada tecnología utilizada en la cosecha de arándanos y uvas para cosechar jatropha mecánicamente, siendo la cosecha de jatropha más fácil que otras frutas ya que no importa la calidad estética de la fruta cosechada. La maquinaria de BEI tiene un costo de US \$ 180.000. Una maquinaria podrá cosechar una hectárea por hora, entonces para completar la cosecha en un tiempo razonable, debe haber una cosechadora por cada 500 ha.⁵⁶

En la estimación de Julio Haberland y de José Miguel Carrasco, es probable que se inventen otros procesos mecanizados que cosechan por aspiración de los frutos. Ambos estiman probable que los procesos hoy utilizados en la cosecha de olivas o almendras pueden ser adaptados a la cosecha de jatropha curcas. A la medida que se desarrolle este cultivo, surgirán nuevas tecnologías que competirán con la de BEI, reduciendo los costos de la cosecha.

4.1.4. Riesgos locales

En conversaciones con el gerente general de ENECO, se comentó que no han experimentado problemas con plagas. Aunque no se descarta la posibilidad de que ocurra, las plantas no parecen ser depredadas por insectos ni animales chilenos. Por otro lado, especialmente en los primeros años antes de que las plantas tapen más área con sombra, habrá un crecimiento importante de maleza en la primavera, lo que deberá ser controlado con herbicida, una acción que fue anticipada por Arancibia [et al.] en su descripción del manejo fitosanitario.

Con respecto a las dudas por la adaptación de las plantas al clima chileno, José Miguel Carrasco y Manuel Paneque señalan que la falta de luz y las bajas temperaturas en los meses invernales reducen el tamaño de las plantas, produciendo arbustos relativamente más compactos que los que se producen en climas sin tanta variación del largo de día. También se ha

⁵⁴ BASF

⁵⁵ ANASAC

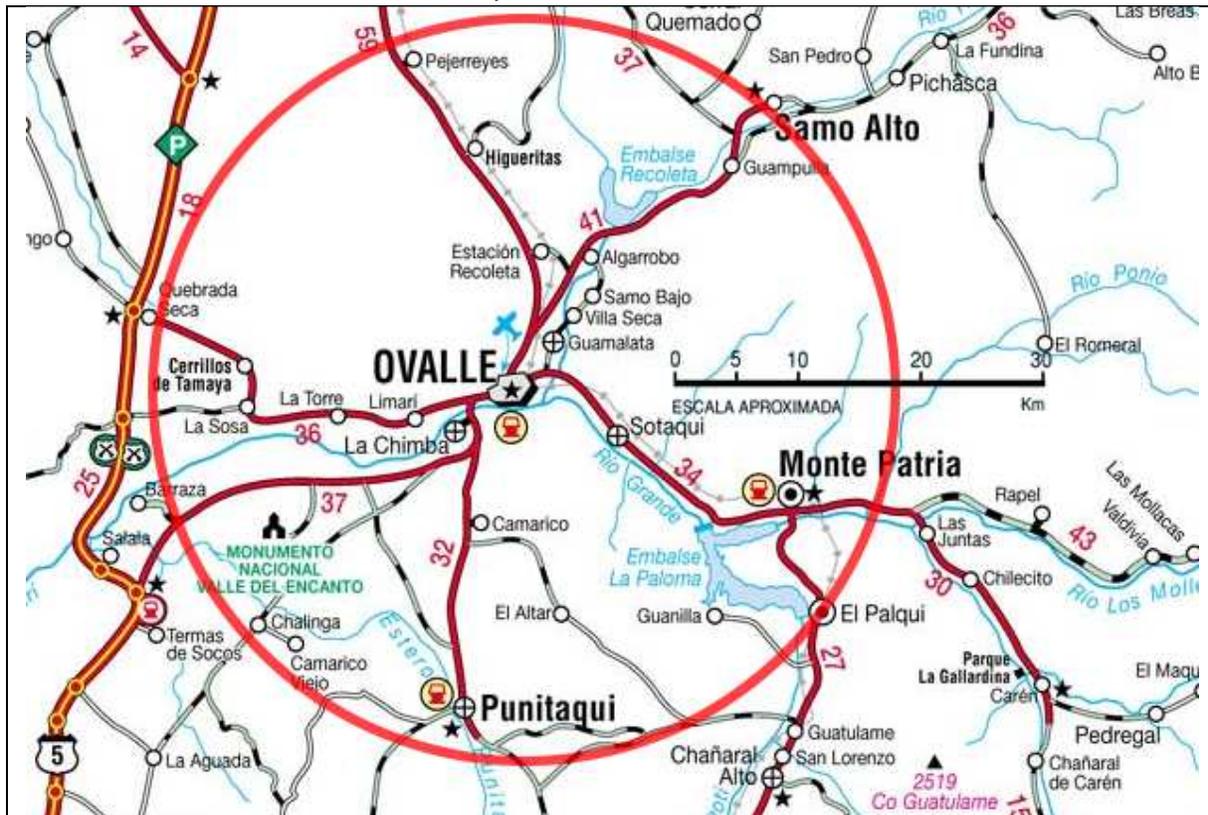
⁵⁶ BEI INTERNATIONAL

visto que las hojas se caen durante los meses de invierno, lo que es en toda probabilidad una respuesta a la falta de luz solar descrita en otros documentos. Las plantas han sobrevivido bien, y sin descartar una baja de rendimiento, el clima de la Región Metropolitana parece no impedir el desarrollo relativamente normal de la planta. Considerando que el clima de la IV región es más cálido, con muy bajos riesgos de heladas, y con días relativamente más largos, debería también favorecer un desarrollo normal del cultivo.

4.2. Aspectos Técnicos de la Producción de Biodiesel

4.2.1. Ubicación de la planta industrial

Ilustración 3: Alrededores de Ovalle; Radio de 30 Km



Fuente: Elaboración propia a partir de mapa de VALLE DEL ELQUI

Se elige un proceso de extracción industrial que aprovecha el uso de solventes para recuperar una mayor cantidad de aceite. La extracción ocurre en el mismo recinto que la planta de producción, necesitando que las semillas enteras cosechadas sean transportadas hasta la planta. También se contempla la devolución de parte de la biomasa exprimida a los terrenos del cultivo.

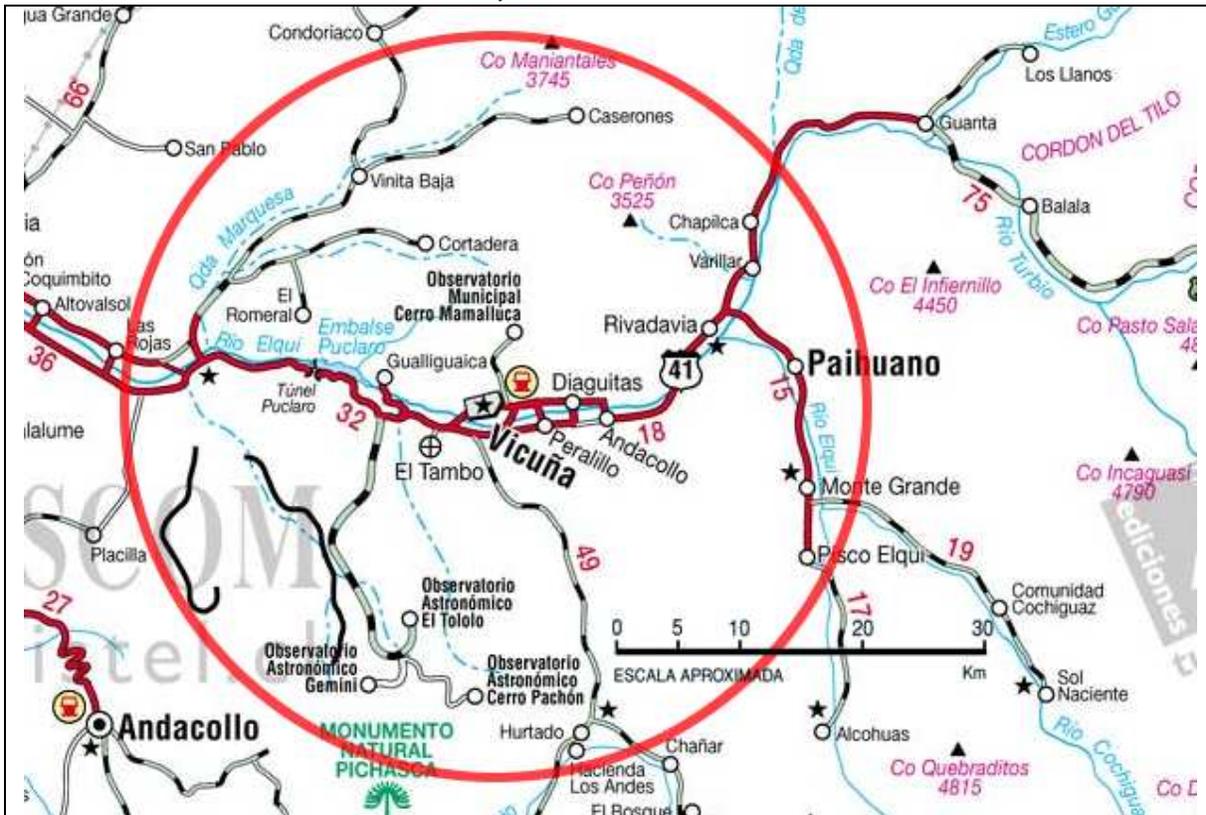
Esto implica que se aprovechan viajes de ida y vuelta, por lo que la planta debe estar lo más cerca posible a los terrenos. La planta considerada está dimensionada para producir 100.000 toneladas de biodiesel al año, por lo que considerando el escenario base de

rendimiento de la jatropha, requeriría hasta 72.403 ha de cultivo ubicado en un radio de 30 km alrededor de Vicuña o Ovalle.

Puesto que es improbable encontrar paños de tierra tan grandes en la zona donde se ha estimado conveniente instalar el cultivo, el total de superficie cultivada se divide en predios de 500 ha para rentabilizar la inversión en una máquina cosechadora en cada uno. La ubicación ideal de la planta es a distancias cortas e iguales de los campos en que se cultivará la jatropha, para minimizar los costos de transporte involucrado.

Estudiando las ilustraciones 3 y 4, se visualiza el acceso a recursos hídricos como ríos y embalses y a infraestructura vial otorgado por ubicar la planta en Ovalle o Vicuña y los cultivos adentro de los perímetros circulares.

Ilustración 4: Alrededores de Vicuña; Radio de 30 Km



Fuente: Elaboración propia a partir de mapa de VALLE DEL ELQUI

4.2.2. Producción de biodiesel

4.2.2.1. Adaptaciones necesarias para considerar aceite de jatropha curcas

Se eligió adaptar una planta diseñada por Hervé, cambiando los parámetros del aceite de entrada y considerando adaptaciones de la tecnología de procesamiento del aceite. La composición del aceite de jatropha es ligeramente distinta a la de raps. El aceite de jatropha

tiene 2,23% ácidos grasos libres (AGL)⁵⁷, comparado con la estimación de 0,87% (AGL) del aceite de raps para el cual fue diseñado originalmente la planta.

El contenido de fósforo del aceite de jatropha es menor que el del aceite de raps, 290 mg/kg o 0,03% del peso, valor representativo del margen superior en los casos experimentales revisados.⁵⁸ El contraste con el contenido de 1,11% por peso de fósforo en el aceite de raps considerado por el autor, indica que posiblemente el proceso de “degumming” no sería necesario, aunque se estima conveniente preservarlo para garantizar un producto final de calidad. Ambas diferencias de composición implican algunas diferencias en el balance de masas propuesto por el autor original. El balance de masas para el aceite de jatropha está disponible en el anexo 8.2, junto a una descripción de su elaboración.

Comparando los volúmenes de los flujos, hay diferencias por lo general insignificantes, excepto en los flujos relacionados con la refinación del aceite. El flujo de gomas fosfáticas removidas⁵⁹ es 62% menor debido al menor contenido de estas sustancias en aceite de jatropha comparado con aceite de raps. Por otro lado, el flujo de soda cáustica utilizado⁶⁰ para neutralizar los ácidos grasos libres es 67% mayor, debido al mayor contenido de ácidos grasos libres en la materia prima comparado con la materia prima originalmente contemplada. Desde el punto de vista de los costos, estas diferencias en los volúmenes no implican una importante variación del total. El volumen del flujo de soda caustica es muy pequeña comparado con el volumen de metanol o de aceite, y el costo del insumo bajo también. Una vez que el aceite está refinado, no hay diferencias en la composición del aceite, y por lo tanto todos los flujos son idénticos y no hay cambios en los tamaños de los equipos de reacción principales.

Se optó por utilizar la torta de semillas exprimidas para el suministro energético. Hervé originalmente considera la calefacción con leña en todo el proceso, debido a la disponibilidad de esta materia en la novena región donde se localiza el proyecto diseñado. Este punto es tratado en mayor detalle en la sección 4.3.1.

A continuación se resume el proceso productivo utilizado por Hervé. Se encuentra el diagrama del proceso en el anexo 8.3.

4.2.2.2. Extracción de aceite

- 1) Lavado del grano: Al entrar el cargamento de semillas a la planta, debe ser limpiado para eliminar restos de cáscara, polvo y residuos de la fruta. Se realizan tres tipos de limpieza contenidos en un solo equipo. Este equipo aspira los polvos y residuos livianos, filtra y separa la arena y pequeñas piedras, y usa un imán para eliminar partículas metálicas.
- 2) Chancado de la semilla: La semillas son chancadas por rodillos con un pequeño espacio entremedio para romper la capa exterior y obtener escamas pequeñas de material.

⁵⁷ AKBAR [et al.]

⁵⁸ DE JONGH y ADRIAANS

⁵⁹ Ver flujo 7 en el anexo.

⁶⁰ Ver flujo 10 en el anexo.

- 3) Cocción de las semillas: Mediante una serie de hornos calentados con vapor, se eleva la temperatura de las semillas para provocar el rompimiento de las células aceitosas, sin exponer a demasiado calor para no transformar los triglicéridos en ácidos grasos libres.
- 4) Prensado de las semillas: Se prensan las semillas, en un tornillo que empuja la masa de semillas por un tubo perforado para permitir el escurrimiento del aceite. En esta etapa se recupera aproximadamente un 25% del peso de la semilla en aceite.
- 5) Extracción con solvente: La torta de semillas, que aún contiene una cantidad de aceite equivalente al 5% del peso original de las semillas, entra por una cinta transportadora a una cámara donde es desplazada en sentido contrario a un flujo de hexano. La mezcla de hexano con el aceite escurre libremente y es recuperada. Se destila el hexano del flujo para poder recuperarlo.
- 6) Tratamiento de la torta: Se recupera el hexano de la torta mediante un equipo llamado “*desolventizer-toaster-dryer-cooler*”, dejando finalmente la torta igual a 70% del peso original de las semillas, con menos de un 1% de aceite. El equipo consiste en una torre en altura. Mientras la torta baja por gravedad es sometida a cuatro etapas. Primero, se aplica vapor directamente a la torta, vaporizando la mayor parte del hexano. Luego, se tuesta en un horno, evaporando el hexano restante. Finalmente, es secado al vacío para remover humedad, y es enfriado, dejando una torta sólida con 10% contenido de agua. Este producto es compactado a presión para su posterior transporte.

4.2.2.3. Producción de biodiesel

- 1) Refinación del aceite (“*degumming*”): El aceite es tratado para remover sustancias fosfáticas llamadas “gomas” mediante la neutralización con ácido fosfórico, un proceso llamado “*degumming*” que traduce literalmente a “desgomamiento”. Para reducir el porcentaje de ácidos grasos libres, son neutralizados con la adición de hidróxido de sodio. Los productos reaccionados son separados mediante centrifugación, y el aceite es secado para eliminar restos de agua.
- 2) Reacción de transesterificación: El aceite refinado entra en un reactor continuamente, donde es mezclado con una solución de hidróxido de sodio en metanol. Se agrega metanol en exceso de lo requerido para asegurar una reacción rápida.
- 3) Reacción de Transesterificación II: Una vez completada la primera reacción de transesterificación, se separan las dos fases por decantación. La primera, compuesta de ésteres metílicos, aceite sin reaccionar, metanol y jabones, pasa a un segundo reactor del mismo tipo que el primero, en que se vuelve a agregar metanol y catalizador. La segunda fase, que contiene glicerina con restos de metanol, jabones y catalizador, es unida a los otros flujos de glicerina para ser tratados en el paso 5.
- 4) Lavado: Después de una segunda separación por decantación, los ésteres metílicos son lavados por una corriente continua de agua. Tras el lavado y una decantación, el flujo de agua lleva las impurezas, mientras el otro flujo es de ésteres metílicos y agua residual. El flujo de ésteres es secado en un secador al vacío, y filtrado para remover partículas sólidas.

- 5) Los flujos de glicerina decantadas después de ambas etapas de transesterificación (pasos 2 y 3) son unidos al flujo del lavado de agua (paso 4), donde se inyecta una solución de ácido clorhídrico. Esto transforma los jabones en ácidos grasos libres (AGL) y neutraliza el NaOH sobrante, produciendo NaCl. La glicerina se separa de los AGL por densidad en un decantador.
- 6) La glicerina todavía tiene una cantidad significativa de metanol disuelta, la que será removida por destilación con vapor de agua. La glicerina en este momento tiene una pureza de aproximadamente 90%, ya que aún contiene agua y residuos de sal producidos por la neutralización.

4.2.3. Elección de tecnología

La elección de la tecnología de proceso continuo, catalizado por hidróxido de sodio (NaOH) corresponde a dos motivos principales. El proceso continuo tiene grandes ventajas en el uso de la energía⁶¹, permitiendo un menor uso de combustible en la reacción. El hidróxido de sodio tiene la ventaja de ser un catalizador probado y de bajo costo. Las desventajas de este catalizador son que es corrosivo y tóxico, por lo que debe ser manejado cuidadosamente para mitigar sus riesgos inherentes.

4.2.3.1. Justificación del uso de solventes en la extracción

Los mayores costos de la producción de biodiesel surgen en el suministro de aceite. Utilizando la extracción con solventes, se puede aumentar el rendimiento de aceite por una cantidad dada de semilla en 20%, por rendir 30% del peso de las semillas en aceite comparado con 25% con extracción solamente por medios mecánicos. Para una planta de este tamaño, el costo y complejidad de usar solventes es justificado por el aumento de 20% en la cantidad de aceite obtenido a partir de las semillas.⁶² Como la producción de semillas es la mayor fuente de costos, es más costo efectivo utilizar solventes que producir 20% más de semilla.

4.2.4. Tamaño de planta

La planta esta dimensionada para producir de 100.000 toneladas de biodiesel, operando 330 días al año.⁶³ Esta cantidad no es arbitraria, pues corresponde a aproximadamente 2,9% del petróleo diesel consumido por el transporte en Chile, y alrededor de 1,8% del petróleo diesel consumido en total⁶⁴, menos el consumo de la generación de electricidad. Se presentará un análisis más adelante de que los generadores a partir de diesel son un mercado en declive cuya generación a futuro será solamente competitiva en situaciones de emergencia energética. Una planta de biodiesel de 100.000 toneladas al año podría suministrar B2, un combustible

⁶¹ HERVÉ

⁶² ADRIAANS

⁶³ HERVÉ

⁶⁴ COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA, "HIDROCARBUROS: Consumo por tipo usuario"

compuesto de 2% biodiesel y 98% petróleo diesel a la totalidad del transporte en Chile, o B5 al transporte en la zona central.

Hay economías de escala significativas asociadas a plantas grandes⁶⁵. Es usual encontrar también que el aumento del tamaño de la planta se asocia a aumentos en los costos de obtener materia prima, ya que una planta más grande debe reunir una mayor cantidad de materia⁶⁶. En este caso, se controla el aumento de los costos de obtención de materia prima, ya que se propone ubicar los cultivos en una distancia acotada de la planta. La existencia de una planta grande también genera barreras de entrada para competidores más pequeños que producirán con costos mayores, por lo que tiene una ventaja estratégica construir una planta de este tamaño.

Para una producción anual de 100.000 toneladas de biodiesel, se requiere de 108.587 toneladas anuales de aceite, o 361.957 toneladas de semilla con un contenido de aceite del 30% del peso de la semilla. Dependiendo de la productividad del cultivo, se necesitará más o menos extensión de terreno para satisfacer las necesidades de la planta. Esto se refleja en los cálculos de la superficie necesaria en la tabla 8.

Tabla 8: Productividad por hectárea en toneladas y requerimiento de superficie, según escenario de rendimiento.

	Escenario de rendimiento de la jatropha		
	Base	mejoría 25%	mejoría 60%
Año 1	0,75	1,25	2,5
Año 2	1	1,5	3
Año 3	4,25	5	5
Año 4	5	6,25	8
Ha necesarios	72.403	57.922	45.252

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de FACT y JATROPHA WORLD

4.3. Usos y Posibilidades de Reventa de los Residuos

4.3.1. Torta de semillas exprimida

Después de la extracción del aceite, la torta de semilla restante no es utilizable como alimento animal debido a su toxicidad, pero sí existen pruebas muy favorables indicando que este residuo promete mucho como fertilizante orgánico debido a su contenido de nitrógeno. Es recomendable devolver alguna cantidad de la torta de semilla al cultivo, para restaurar nitrógeno y micronutrientes que son removidos del terreno en el momento de la cosecha.⁶⁷

Otro uso factible es en la producción de energía, como se mencionó en el punto 3.3.1, en que la torta de semillas puede reemplazar parcialmente la leña contemplada en el diseño

⁶⁵ HERVÉ

⁶⁶ CIRAS

⁶⁷ FACT

conceptual de la planta de biodiesel. El contenido energético de la torta de semillas es de 11,1 Mj/Kg⁶⁸ o 20 Mj/Kg⁶⁹ dependiendo de la fuente consultada. Considerando el consumo de energía de la planta, de 6,16 me⁷⁰/hr de leña con poder calorífico de 1.500 Kwh/me, se calcula un requerimiento de calefacción de 33.264 MJ por hora. Si fuera abastecido con torta de semillas, requeriría de 2.996 kg/hora considerando el valor calorífico inferior, o 1.663 kg/hr considerando el valor superior. En ambos casos, la cantidad de torta de semillas producida en el proceso de extracción de aceite bastaría. El consumo de la planta de aceite crudo es de 12.854 kg por hora. La extracción de esa cantidad de aceite produce 29.992 kg de torta de semillas, lo que permite suplir los requerimientos de energía y elimina los costos de leña de la evaluación económica. La torta de semilla que sobra será devuelta a los cultivos para abonar la tierra. Los esteres de forbol y la curcina que causan la toxicidad en animales no afectan a su uso como abono.⁷¹

Eventualmente, la torta de semilla de una variedad no-tóxica de jatropha podría tener un alto valor como forraje animal proteico. Sin embargo, existen solamente anécdotas de una variedad no-tóxica de la jatropha, y no está validada la no toxicidad de ninguna planta conocida. De poder encontrar o crear por intervención genética una variedad no-tóxica, o bien desarrollar una tecnología para remover las toxinas a bajo costo, las ventas de la torta de semilla para propósitos alimenticios podrían superar las ventas de aceite y biodiesel, similar a la soya, en que el aceite es un producto secundario a la proteína. La demanda por la proteína de la soya ha aumentado, gatillada por la demanda de este insumo en la producción de carne animal para consumo humano en el mundo en vías de desarrollo. La fuerte demanda por la proteína ha provocado la situación actual en que el precio de la proteína supera el precio del aceite.⁷² Procesar el poroto de soya produce 18% aceite y aproximadamente 80% de la masa como proteína⁷³. Luego, considerando un precio de aceite de soya de US \$808/tn⁷⁴ y de proteína de soya de US \$408/tn en Argentina⁷⁵, el valor económico de una tonelada de soya procesada es aproximadamente US \$472 o la suma de US \$145 de aceite obtenido más US \$326 de proteína. Así, 69% del valor de procesar los porotos de soya deriva de la proteína. Sería probable que ocurriera algo similar en caso que la proteína de jatropha fuese utilizable como alimento.

4.3.2. Glicerina

La glicerina se podría utilizar para proveer energía a la planta. El flujo de salida de la glicerina es de 2.396 kilogramos por hora, que podría ser mezclado con torta de semilla para quemar. La combustión de glicerina produce 19 Mj/kg⁷⁶, por lo que se podría suplir la totalidad de la energía requerida solamente con el flujo de glicerina, si fuese necesario. Sin embargo, la

⁶⁸ SOTOLONGO [et al.]

⁶⁹ FACT

⁷⁰ Me: "Metro estero", el nombre de una medida común de volumen de leña.

⁷¹ HELLER

⁷² SOY INFO CENTER

⁷³ MAIER

⁷⁴ ODEPA

⁷⁵ USDA FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE

⁷⁶ MACLEAN

combustión requiere de un diseño distinto del quemador, para poder lograr muy altas temperaturas y una combustión completa. Por lo tanto, utilizar la glicerina para suministrar energía sería complicado por la dificultad de implementar la tecnología. Dado que el suministro energético entregado por la torta de semillas satisface los requerimientos de energía de la planta, se descarta la opción de utilizar la glicerina con este fin.

Tabla 9: Importaciones de Glicerina Cruda en Dólares(CIF)

Nombre Pais	Cantidad (Kg.)	Valor(US\$)	Valor US\$/tn.
	Ene-Oct/2009	Ene-Oct/2009	
ARGENTINA	55.420	9.270	167
ESTADOS UNIDOS	64	6.763	105.672
MALASIA	40.000	26.676	667
ITALIA	50	1.538	30.760
ALEMANIA	12	234	19.500
Total	95.546	44.481	

Fuente: SERVICIO NACIONAL DE ADUANAS

Tabla 10: Importaciones de Glicerina Pura en Dólares(CIF)

Nombre Pais	Cantidad (Kg.)	Valor(US\$)	Valor US\$/tn.
	Ene-Oct/2009	Ene-Oct/2009	
EGIPTO	20.000	16.700	835
COLOMBIA	20.250	18.448	911
COSTA RICA	5	170	34.000
HONDURAS REPUBLICA	40.000	22.850	571
MEXICO	15	125	8.333
BRASIL	42.001	27.115	646
ARGENTINA	75.000	69.382	925
ESTADOS UNIDOS	158	2.271	14.373
INDIA	20.000	16.505	825
MALASIA	453.000	336.437	743
JAPON	50	930	18.600
SINGAPUR	20.000	14.824	741
CHINA REP POPULAR	1	83	83.000
ITALIA	19.200	10.415	542
INGLATERRA	80.545	58.170	722
BELGICA	253.060	153.960	608
HOLANDA	60.000	49.578	826
ALEMANIA	370.243	340.657	920
Total	1.473.528	1.138.620	

Fuente: SERVICIO NACIONAL DE ADUANAS

Queda la opción de vender la glicerina cruda en el mercado o desecharla. Existe una paradoja en cuanto a la contribución de la glicerina a las ganancias de los productores de biodiesel: en general, cuando la rentabilidad de producir biodiesel es buena, es decir, cuando un alto precio del petróleo diesel coincide con un bajo precio del aceite vegetal, el precio de la glicerina cruda colapsa totalmente debido a que es necesariamente producido junto al biodiesel. Por otro lado, los bajos precios del petróleo durante la crisis financiera tuvieron un

efecto positivo sobre el precio de la glicerina cruda, ya que la oferta se contrajo debido a la menor producción de biodiesel. También es importante reconocer que en circunstancias normales, el mercado de glicerina cruda es totalmente distinto al mercado de glicerina refinada. Sin embargo, en un año como el 2008, el caso económico por refinar glicerina cruda es tan fuerte (debido a glicerina cruda barata por un lado y demanda fuerte por bienes de consumo masivo que contienen glicerina refinada) que se empieza a transferir la sobreoferta de glicerina cruda al mercado de glicerina refinada, deprimiendo los precios en ambos mercados.⁷⁷

A la larga, el precio del petróleo será más alto que bajo, tratándose de un recurso limitado frente a una demanda creciente. Desde este punto de vista, la rentabilidad de producir biodiesel debe ser positiva, pues siempre y cuando no se invente una nueva fuerza motriz que permite sustituir el gran parque de equipos para diesel siempre habrá demanda. Se puede producir mucho más aceite vegetal que lo producido hoy, mientras que aumentar la producción del petróleo requiere la exploración de nuevos yacimientos que serán cada vez más difíciles de explotar. El resultado es que la oferta de aceite vegetal sigue la demanda, ejerciendo menos presión sobre el precio de aceite que en el caso del petróleo, donde la oferta sigue a la demanda solamente a costos marginales cada vez mayores.

En este escenario de largo plazo, el precio internacional de la glicerina cruda se mantendrá a niveles bajos, menores a los USD \$100/tn.⁷⁸ En la tabla 9, se aprecian algunas importaciones de pequeñas cantidades y altos precios, que podrían tratarse de muestras industriales u otro producto indebidamente clasificada. Las importaciones de Argentina y de Malasia seguramente se tratan de glicerina cruda producto de la transesterificación de aceite vegetal. En la tabla 10, también se aprecian algunos valores disparado para cantidades pequeñas de Glicerina importada, pero en general se aprecia el alto valor que tiene la glicerina pura comparada con la glicerina cruda. Dependiendo de la capacidad local para refinar la glicerina para uso en la industria de productos de consumo masivo, es posible que las ventas fuesen a productores de alimento animal locales o al mercado internacional. El destino final de la glicerina de la producción de biodiesel en Chile dependerá de las particularidades del mercado químico chileno y los precios de los bienes sustitutos de la glicerina. Para el propósito de la evaluación, se considera la venta de la glicerina en USD \$50/tn con retiro en la planta, ya que deja un margen de al menos USD \$1.080 por carga (recibe un pago de \$2.880 por una carga que costó \$1.800, dado un precio FOB de USD \$80/tn) para cada carga de 36 toneladas, capacidad de carga correspondiente a un camión estanque típico de aproximadamente 30 m3, dada la densidad de la glicerina. Se justifican estas cifras basándose en las tablas 9 y 10, en que se aprecia que el precio promedio pagado por lotes grandes de glicerina pura es aproximadamente US \$755/tn, mientras que el precio promedio pagado por glicerina cruda de Argentina es de US \$167/tn. Esta planta introduciría una gran cantidad de glicerina cruda en un mercado que principalmente consume glicerina pura, por lo que sería posible que surgiera una industria de refinación de glicerina entorno a la industria de biodiesel. Esta glicerina pura podría satisfacer los múltiples usos del químico puro en las industrias cosméticas, alimenticias y farmaceuticas chilenas además de ser un producto valioso de exportación al mundo, con un mercado mundial de aproximadamente 2.000.000 toneladas/año.

⁷⁷ VOEGELE

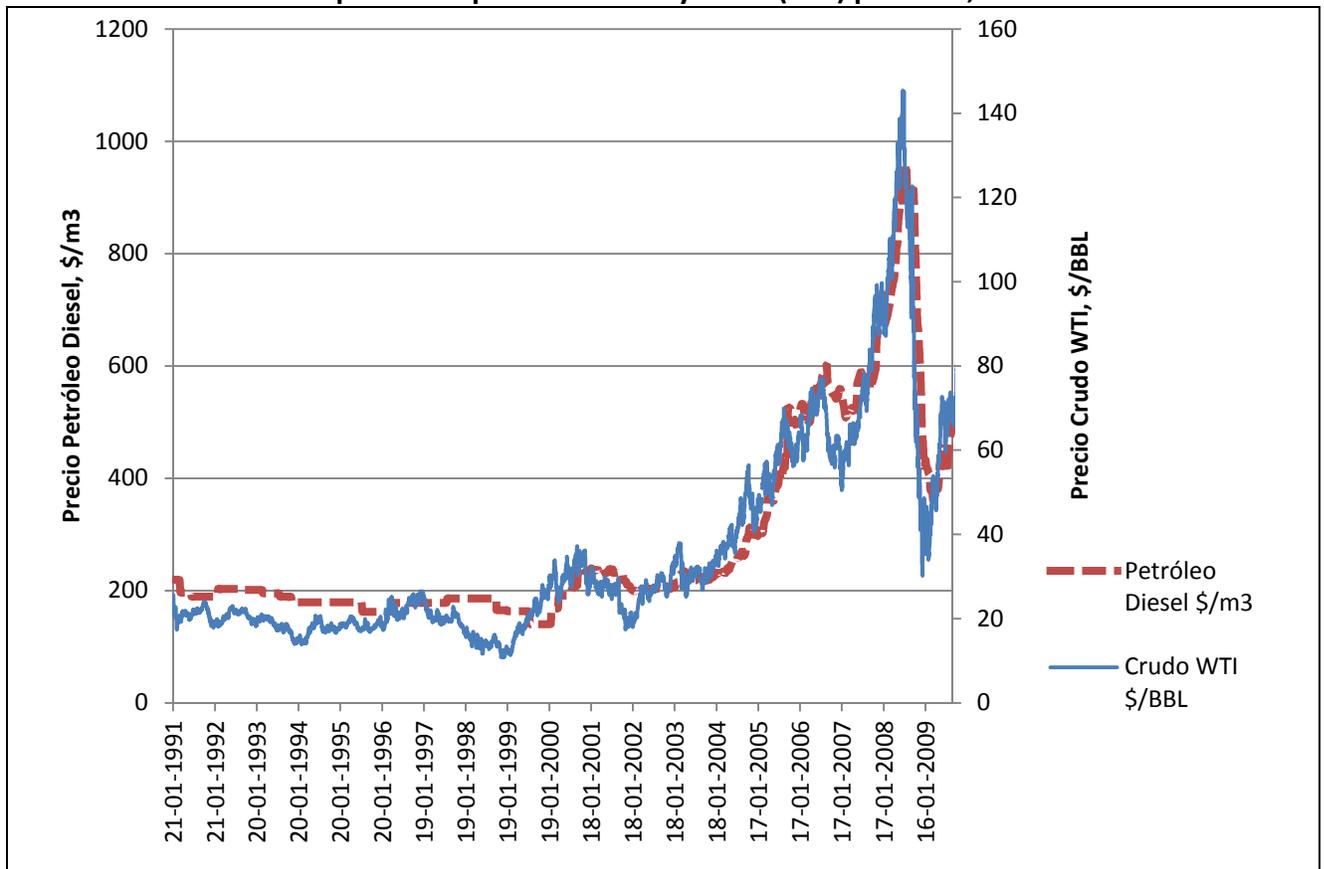
⁷⁸ ICIS PRICING

4.4. Análisis del Mercado de los Derivados del Petróleo

4.4.1. Actualidad del mercado del petróleo diesel y su precio

A modo de prefacio, el precio del petróleo diesel está fuertemente ligado al precio de petróleo crudo en el mundo, siendo éste el insumo de mayor importancia en su elaboración. Se visualiza claramente el vínculo entre sus precios en la ilustración 5. El petróleo crudo es un recurso escaso y sus derivadas contribuyen en forma importante a la matriz energética de todos los países del mundo. El surgimiento del mundo en vías de desarrollo ha agregado cada vez más demanda por este insumo, mientras su producción ha aumentado a una tasa significativamente menor. El efecto ha sido un aumento progresivo en su precio, con alzas notables provocadas directamente por elevadas tasas de crecimiento del PIB mundial en los años 2002-2008. El precio directamente relevante para el proyecto estudiado es el del petróleo diesel, pero es importante entender que la tendencia al alza del petróleo diesel responde a un fenómeno irreversible ocasionado por el crecimiento mundial y el agotamiento del petróleo crudo.

Ilustración 5: Evolución precio M³ petróleo diesel y barril (BBL) petróleo, 1991-2009



Fuente: CNE (2009), ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2009)

Revisando la ilustración 5, se observan dos tendencias claves aparentes en el precio del petróleo diesel. La primera es una planicie, un precio relativamente estable que rige durante la década de los '90, en que el precio medio del petróleo rara vez excede un nivel de 200 USD\$/m³. La segunda tendencia es a alzarse, después del año 2000. Se exhibe cierto nivel de piso durante el periodo 2005-2007, donde las alzas no se alejan mucho de los 500 USD\$/m³. Sin embargo, se aleja de ese piso a finales del 2007, llegando a su apogeo a finales de julio del año 2008 con 959,10 USD\$/m³. Después de esa fecha, se inicia un rápido descenso, para tocar fondo en los meses de mayor incertidumbre producto de la crisis 2008-2009. En los meses inmediatamente anteriores a la fecha de elaboración de este trabajo (segundo semestre 2009), se ha iniciado una tendencia al alza consistente con la tendencia anterior a la crisis financiera, por lo que se puede suponer que en el corto plazo el precio alcanzará nuevamente niveles similares al periodo 2005-2007, y en el largo plazo niveles aún más altos.

4.4.2. El futuro del mercado del petróleo diesel y su precio

En conversaciones con consultores de S.W. Business, expertos en la industria de generación eléctrica, se comentó que un precio de 593,10 USD\$/m³ es la cifra actualmente utilizada en sus evaluaciones y predicciones, por lo menos para el periodo 2009-2020. Sin embargo, todos los consultores califican esa cifra comentando que es probable volver a ver precios similares a los del año 2008, en que el precio promedio anual fue de 780 USD\$/m³. Consultando los datos de la CNE, también es interesante el promedio hasta el día 15 de septiembre⁷⁹: 811.1 USD\$/m³. De todas maneras, la tendencia del petróleo es al alza. Conviene contemplar un rango de precios entre los 500 USD\$/m³ y los 1000 USD\$/m³.

4.5. El Mercado de Bonos de Carbono

Mediante el CDM (Clean Development Mechanism), los países desarrollados pueden compensar sus emisiones de gases invernaderos financiando la ejecución de proyectos en países en vías de desarrollo que reducen las emisiones a menor costo que en su territorio nacional.⁸⁰

Hay dos conceptos importantes en el desarrollo de un proyecto para captar financiamiento del CDM. Estos son la línea base, que es la cantidad de gases de efecto invernadero que se habría producido sin realizar el proyecto, y la adicionalidad, que implica demostrar que el proyecto en sí no es parte de la línea base, y que no se habría producido la reducción sin el financiamiento del CDM. Por ejemplo, si en la ausencia del mecanismo de desarrollo limpio se hubiese construido una termoeléctrica a carbón, la generación en base a este combustible representa la línea base. Si gracias a la disponibilidad del financiamiento en forma de CDM se construye una termoeléctrica de ciclo combinado que usa gas natural, la diferencia entre la línea base y la situación, incluyendo el aporte del CDM, representa la

⁷⁹ El día lunes, 15 de septiembre, 2008, poco antes de las 1 de la mañana, el banco de inversión Lehman Brothers se declaró en quiebra, gatillando la caída de bolsas en todo el mundo y marcando el principio de la crisis financiera 2008-2009.

⁸⁰ CDM EXECUTIVE BOARD

adicionalidad: una reducción neta en las emisiones de gases invernaderos.⁸¹ Si ya existía un incentivo financiero para desarrollar la central a gas natural, no hay adicionalidad.

4.5.1. Pasos necesarios para certificar un proyecto que genera bonos de carbono

- 1) Identificación del proyecto: Se idea un proyecto que reduce emisiones de gases invernaderos, por ejemplo, recambio de artefactos por artículos renovados más eficientes. Deben poderse cuantificar las reducciones posibles por el proyecto.
- 2) Aprobación local: Una vez que se haya determinado a nivel de prefactibilidad la reducción correspondiente a la realización del proyecto, la idea debe ser aprobada por la agencia gubernamental local. En el caso de Chile, el proyecto debe ser certificado por la CONAMA. Solamente después de contar con el apoyo del país en que se realiza puede buscar aprobación internacional.
- 3) Desarrollo y cálculos: Se establece la línea base y la adicionalidad del proyecto, convirtiendo todas las emisiones (sean CH₄, NO₂, u otros) en toneladas de CO₂ equivalente. Los cálculos de la línea base y la adicionalidad se deben hacer de acuerdo a las normas establecidas en el Protocolo de Kioto y los Acuerdos de Marrakech.
- 4) Validación: Los estudios del proyecto y de la reducción de gases son enviados a una agencia independiente de la Dirección de Desarrollo Limpio de la ONU para informar al directorio del CDM si la reducción está correctamente cuantificada y si el proyecto es viable.
- 5) Inscripción: Una vez que se encuentra formalmente aceptada por la dirección, el proyecto se registra y empieza a generar bonos llamados CERs (certified emissions reduction).
- 6) Monitoreo: Una vez registrado, los operadores del proyecto se hacen responsables por el monitoreo y contabilidad de las reducciones. Periódicamente puede ser sometido a monitoreo externo.
- 7) Certificación: Después de un periodo, la reducción acumulada es certificada por el monitor externo y los dueños del proyecto, lo que será informado a la dirección del CDM para que emita los CER en forma transable.⁸²

4.5.2. Factibilidad de vender bonos por el proyecto

Surgen dificultades con la definición de la adicionalidad del proyecto contemplado en este trabajo, pues la intención es que genere ingresos por sí sólo – los bonos serían una forma de mejorar el valor del proyecto. El poder introducir bonos de carbono no vuelve viable el proyecto, por lo que los bonos de reducción de carbono no representan una reducción adicional en el sentido del CDM. Además, hay problemas con cuantificar exactamente la reducción: al producir el biodiesel, en rigor el proyecto no disminuye la emisión, pues la reducción ocurre en

⁸¹ ATKINSON

⁸² CDM EXECUTIVE BOARD

el momento en que el biodiesel es quemado para sustituir petróleo diesel. Pero, ¿quién toma el crédito por haber reemplazado la quema de petróleo diesel? Por un lado, podría ser la empresa que comercializa la mezcla, que al momento de producir la mezcla de B2 o B5 está logrando que el consumidor final reduzca su consumo de combustible fósil en ese porcentaje. Por otro lado, podría ser el consumidor que elige B2 o B5, reemplazando así su emisión de dióxido de carbono. La postulación al CDM debe hacerse cargo de que el monitoreo controle quién “gana” el crédito, para evitar situaciones en que la reducción de emisiones es contada dos veces.

Otro tema importante es lo que se ha denominado “*leakage*”, que se traduce literalmente a pérdida en castellano, el aumento de producción de gases de efecto invernadero provocado por la supuesta reducción buscada por el proyecto. En el caso del proyecto contemplado, incluiría todas las emisiones aguas arriba de la planta de biodiesel. Por ejemplo, la emisión de los equipos que transportan las semillas y torta entre la planta y los campos de cultivo, las emisiones de la producción de fertilizantes, herbicidas y metanol, y las emisiones de la implantación del cultivo y la construcción de la planta. Además, es importante considerar si la instalación del cultivo ha desplazado otra actividad agrícola, que emitiría gases invernaderos al establecerse en otro lugar. Revisando algunas propuestas para proyectos que postularon a la condición de CDM, está claro que hay falencias en la metodología utilizada para calcular la reducción de esos proyectos, que impiden el éxito de las postulaciones.⁸³

Por otra parte, hay evidencia que el reemplazo de combustible fósil con biodiesel en sí puede constituir una reducción en la emisión. Existe una metodología aprobada por el CDM para evaluar y monitorear los créditos de reducción generados por la producción, comercialización y combustión de biodiesel elaborado a partir de aceites usados.⁸⁴ Esto al menos implica que hay un marco teórico para regir el monitoreo de la combustión del producto final. Sin embargo, no hay metodologías aprobadas para cultivos energéticos de ningún tipo, por lo que no hay una metodología base sobre la cual se podría garantizar la aceptación de este proyecto para la venta de bonos.

Para concluir, es probable que a futuro se logre crear una metodología aceptable para el cálculo del impacto aguas arriba del cultivo de biocombustibles. En ese momento, se podría ser más definitivo sobre las posibilidades que tendría un proyecto de este tipo de poder financiarse con bonos de carbono. En la actualidad, ello parece un camino largo.

4.6. Posibilidades de Biodiesel como ERNC en Plantas de Generación Termoeléctricas

La ley de fomento de energía renovable no convencional (ERNC) establece que para el año 2024, cada generador con capacidad instalada mayor a 200 MW debe producir 10% de la energía eléctrica generada anualmente a partir de ERNC. La ley permite que las empresas eléctricas compren y vendan capacidad renovable para cumplir con la cuota establecida e impone una multa de 0,4 UTM por MWh de déficit. Si una empresa reincide en condición

⁸³ CO2HANDEL.DE

⁸⁴ CDM EXECUTIVE BOARD

deficitaria dentro de tres años, la multa es aumentada a 0,6 UTM por MWh.⁸⁵ Esto se traduce en multas de aproximadamente USD \$27 por MWh de déficit y USD \$40 por MWh de déficit para los generadores reincidentes en déficit. En comparación con el precio promedio en el SIC a la fecha (USD \$95/MWh), es una multa significativa por lo que las empresas probablemente buscarán alternativas, pagando hasta el precio de la multa por sobre su costo de desarrollo usual para incorporar ERNC en su matriz.

4.6.1. Factibilidad de contar energía generada a partir de biodiesel como ERNC

La energía generada a partir de biodiesel cuenta como ERNC. La ley 20.257 define los “medios de generación renovables no convencionales” como “los que presentan cualquiera de las siguientes características: 1) Aquellos cuya fuente de energía primaria sea la energía de la biomasa, correspondiente a la obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Se entenderá incluida la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios.”⁸⁶

Esto resulta útil en la medida que permite el uso de instalaciones generadoras diseñadas para funcionar con combustible diesel sin cambios en su diseño. Posibilita de esta forma que una entidad generadora con capacidad de generación a base de diesel cambie de combustible por el biodiesel para cumplir con el requisito de ERNC sin realizar nuevas inversiones.

4.6.2. Influencia del consumo de biodiesel por generadores de electricidad en el precio de venta de biodiesel

Revisando las últimas licitaciones de energía de la CGE para clientes regulados en el SIC, se revelan precios de adjudicación para las dos empresas generadoras 100% eólicas. Eólica Monte Redondo ofertó energía en USD \$110,50/MWh y fue adjudicada a ese precio, mientras Norvind S.A. ofertó a un precio no adjudicado de USD \$114,94/MWh⁸⁷. Una empresa que no pudiera producir energía renovable por menos de USD \$110,50/MWh, o que tuviera costos de generación marginal propia encima de USD \$83,50/MWh (precio de mercado de energía eólica de Monte Redondo menos costo de la multa) podría recurrir a comprar energía eólica a precios de mercado.

Por otro lado, están las centrales de biomasa mencionadas en la tabla 11. La propiedad de las centrales asociadas a Energía Verde S.A. corresponde a AES Gener, por lo que habría que suponer que irán a formar parte de la cuota de ERNC de esa empresa. Las otras centrales a licor negro van en general a suplir las necesidades propias de las plantas de celulosa, pero bien podría vender el excedente de ERNC en el mercado. Se estima el costo medio de la energía a

⁸⁵ SALDÍAS y ULLOA

⁸⁶ CNE, Ley 20257

⁸⁷ CNE “Licitación 2008-1”

partir de biomasa en USD \$76,55/MWh⁸⁸, por lo que, considerando la multa, los precios de venta serían inferiores a USD \$76,55/MWh más la multa, o aproximadamente USD \$104/MWh.

Tabla 11: Unidades de Generación ERNC a partir de biomasa en el SIC

Propietario	Ubicación	Tipo	Combustible	Potencia Bruta (MW)
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	Valdivia	Térmica	Licor Negro - Biomasa - Petroleo Diesel	70,00
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	Arauco	Térmica	Licor Negro	36,30
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	Celco	Térmica	Licor Negro	21,10
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	Licantén	Térmica	Licor Negro	27,00
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	Nueva Aldea	Térmica	Licor Negro	29,30
CELULOSA ARAUCO Y CONSTITUCION S.A.	Nueva Aldea III	Térmica	Licor Negro	65,00
ENERGIA VERDE	Constitución	Térmica	Desecho Forestal	8,50
ENERGIA VERDE	Constitución	Térmica	Desecho Forestal	2,36
ENERGIA VERDE	Laja	Térmica	Desecho Forestal	8,50
ENERGIA VERDE	Laja	Térmica	Desecho Forestal	4,00
PANELES ARAUCO S.A.	Cholguán	Térmica	Biomasa	30,00

Fuente: Elaboración propia a partir de datos CDEC-SIC

Este análisis lleva a considerar el uso de biodiesel en generadores diesel del tipo con pistones, caracterizados por tener un muy bajo costo de inversión y altos costos operacionales. Consultando con fuentes expertas de la consultora S.W. Business, se determinó que el costo operacional no-combustible en general es tomado como USD \$8,9/MWh, mientras que se genera aproximadamente 3,66 MWh por cada metro cúbico de combustible⁸⁹. Al precio del diesel considerado anteriormente para el periodo 2009-2020 (USD \$593,10 /m3), se calcula un costo de combustible de aproximadamente USD \$162/MWh. Luego, el total del costo por MWh sería la suma de el costo no-combustible y el costo combustible, USD \$170,9.

Debido al alto precio del combustible, es improbable que estas unidades de generación diesel tipo pistón produzcan electricidad utilizando petróleo diesel o biodiesel, excepto para casos de emergencia en que el resto del sistema interconectado no es capaz de generar electricidad suficiente, por ejemplo en una situación de sequía. La generación a partir de fuentes renovables como el viento y la biomasa, con precios de mercado estimados en US \$110,5 /MWh y USD \$104 /MWh respectivamente, ya tiene un menor nivel de precio por MWh que los motores a diesel. Estos motores, con un costo estimado de generación de \$USD 170,9 /MWh usando petróleo diesel no serían elegidas por empresas para cumplir con su requisito de ERNC si el biodiesel tuviera el mismo precio que el diesel convencional. Para que la generación a partir de biodiesel fuese competitiva, éste se tendría que vender a estos consumidores a un precio menor al de petróleo diesel. Por otra parte, el mercado del transporte pagará al menos el precio de petróleo diesel por el biodiesel, ya que es un sustituto casi idéntico. Por esta razón, la posibilidad de utilizar biodiesel en la generación eléctrica queda descartada, por la existencia de alternativas de menor costo. El biodiesel producido será comercializado exclusivamente para uso en transporte.

⁸⁸ SALDÍAS Y ULLOA

⁸⁹ Representa una eficiencia de generación de alrededor del 33%.

5. Evaluación Económica

5.1. Horizonte de evaluación

Se elige un horizonte de evaluación de 24 años. Si bien existe evidencia de arbustos de jatropha de hasta 50 años⁹⁰, se comenta que a medida que envejece el arbusto, se reduce la producción de frutas y semillas. Se considera en la evaluación que la totalidad de los activos estarían depreciados al final de los 24 años. En los próximos veinte años es probable que haya cambios tecnológicos que lleven a procesos más eficientes para elaborar biodiesel y cosechar jatropha, por lo que la planta y los cosechadores estarán obsoletos al final del horizonte. No se consideran valores residuales aparte de los de la tierra y los derechos de agua. Estos activos no se deprecian con el tiempo y se considera una reventa al mismo precio de compra al final del año 24.

5.2. Determinación de la Tasa de Descuento

Las tasas de descuento en otras monedas utilizadas en la evaluación de proyectos integrados de Jatropha varían desde valores de 10,5% anual hasta 15% anual.^{91,92,93} La alternativa elegida es adoptar una tasa estándar de 15%, siendo la justificación que ésta refleja la incertidumbre elevada de los flujos.

También se calculó una tasa de descuento utilizando un modelo de tipo CAPM⁹⁴ estándar y una tasa libre de riesgo pertinente. Estos cálculos están disponibles en el anexo 8.1 y son representativos de la tasa de descuento que podría aplicarse al proyecto una vez que la tecnología fuese validada. Se identificó el riesgo sistemático ejemplificado por empresas con rubros relevantes, y se calculó un premio por riesgo de mercado de acuerdo a metodología propuesta por Aswath Damodaran en su *paper* "Equity Risk Premiums" (2008).

5.3. Escenarios de evaluación del proyecto

Se consideran tres probables escenarios de rendimiento de Jatropha. Corresponden a un escenario básico con rendimientos lograble bajo buenas condiciones hoy, una mejoría de 25% por reproducción selectiva de ejemplares de jatropha disponibles hoy, y una mejoría de 60% lograda por intervenciones a nivel genético (ver sección 4.1.1 y 4.1.1.1). Se considerará un

⁹⁰ HELLER

⁹¹ CATHAY FOREST PRODUCTS

⁹² HERATH [et al.]

⁹³ BIONEPAL

⁹⁴ CAPM es una sigla por capital asset pricing model, un modelo comúnmente utilizado para determinar una tasa de retorno apropiado para un activo, dado su riesgo. Se basa en el riesgo sistemático (o no diversificable), el retorno de mercado, y el retorno de un activo libre de riesgo.

precio de petróleo diesel base de 593 USD\$/m³, con variaciones desde 500 USD\$/m³ hasta un incremento de 70% en el precio base, o 1008 USD\$/m³ (ver sección 4.4).

5.4. Inversión inicial

Tabla 12: Costos de montaje del cultivo, \$/ha

Insumos Invernadero	329.413
Mano de Obra Invernadero	285.000
Insumos Sombreado	529.760
Mano de Obra Sombreadero	135.000
Costos de la implantación por hectarea	1.474.057
Total	2.753.230

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones expertas, en base a Arrancibia [et al.]

Tabla 13: Inversión en Terreno, Derechos de Agua, y Instalaciones de Riego en \$ / ha

Terreno	4.000.000
Derecho de agua	450.000
Instalación de riego	1.500.000
Total por ha (\$/ha)	5.950.000

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones expertas.

Tabla 14: Resumen Inversión según Escenario Rendimiento, en millones de pesos chilenos (\$MM CLP)

	Escenario Rendimiento		
	Base	mejoría 25%	mejoría 60%
Ha Necesarios	72.391	57.913	45.245
Costos Implantación (\$ MM CLP)	199.310	159.448	124.569
Costos Terreno y Riego (\$ MM CLP)	430.729	344.583	269.205
Compras Cosechadoras (\$ MM CLP)	14.355	11.484	9.009
Total	644.394	515.515	402.783

Fuente: Elaboración Propia

Para la inversión inicial, se considera en el año 0 la compra del terreno, los derechos de agua, la instalación del sistema de riego y la plantación. Para un mayor detalle de los costos del proceso de germinación e implantación, ver el anexo. En el año 4, se compra una máquina cosechadora en USD \$180.000 por cada 500 ha. La inversión total en el montaje del cultivo depende del escenario de rendimiento de la jatropha en que se evalúa el proyecto. Mientras más rinde por hectárea, menos superficie bajo cultivo se necesita. Hay reinversión en las cosechadoras en el año 14, y reinversión en los equipos de riego en los año 10 y 20.

La tabla 14 resume las inversiones, considerando los costos por hectárea de las tablas 12 y 13, y la inversión en máquinas cosechadoras. Muestra montos de inversión por ítem y totales para los tres escenarios de rendimiento considerados para el cultivo. El desarrollo de estas tablas se encuentra en el anexo 8.4.

En la tabla 15 (desarrollo en el anexo 8.4), se considera la inversión en la construcción de la planta de producción y los elementos relacionados como oficinas y estanques de

almacenamiento, actualizando la estimación de costo de Hervé mediante un índice de costo de planta. Una explicación detallada de la actualización está disponible en el anexo 8.6.

Tabla 15: Inversión Inicial en la Planta Industrial

	Actualizado (2009)	
1. Desarrollo Preliminar		
Compra terreno (2ha)	9.000.000	CLP
Permisos y licencias básicas	145.147	USD
Subtotal	160.981	USD
2. Obras civiles	1.787.991	USD
3. Equipamiento	8.559.097	USD
Subtotal 1 + 2 + 3	10.508.068	USD
Adicionales		
Otros e imprevistos	1.576.210	USD
Gestión construcción	525.403	USD
Ingeniería y diseño	1.050.807	USD
Puesta en marcha planta	525.403	USD
Subtotal adicionales	3.677.824	USD
Costo total planta	14.185.892	USD

Fuente: Elaboración propia a partir de Hervé e índices de CHEMICAL ENGINEERING. Desarrollo en anexo 8.6.

La inversión en el establecimiento del cultivo se realiza en el momento inicial, o año 1. La inversión en la planta productiva es realizada a principios del tercer año, ya que el cultivo no tiene el rendimiento necesario para suministrar el total de aceite requerido hasta alcanzar la madurez.

5.5. Ingresos

Los ingresos del proyecto son de la venta de biodiesel y de glicerina en la planta, empezando en el cuarto año con la finalización de la construcción de la planta y la madurez del cultivo. Debido a que se trata de un periodo de prueba y de puesta en marcha, en el cuarto año se venden 50.000 toneladas de biodiesel y 5.750 toneladas de glicerina. Después, se venden 100.000 toneladas de biodiesel al año, equivalente a aproximadamente 113.900 m³ y 11.500 toneladas de glicerina cruda al año, constante desde el año 5 hasta el año 24. El ingreso anual del biodiesel depende del escenario de precio elegido. Se considera que no hay beneficios significativos para ningún consumidor que darían pie para suponer una mayor disposición a pagar por biodiesel que por petróleo diesel, por lo que se presumirá que el biodiesel se vende al precio de mercado de petróleo diesel. Según las consideraciones de la sección 4.4.2, la tendencia del precio de petróleo diesel y luego de biodiesel es al alza, con altas probabilidades de aumentar en hasta un 70% con respecto al nivel de hoy. Reparando en esto, se evalúa el proyecto para precios de venta de biodiesel en todo el rango. En la tabla 16, se muestra el ingreso anual de la venta de biodiesel para los años 5 a 24, de acuerdo con los niveles de precio

según el escenario. El ingreso anual por las ventas de glicerina se considera en USD \$50/tn según las determinaciones del punto 4.3.2, para un ingreso de USD \$575.900 al año.

Tabla 16: Ingresos Anuales del Proyecto en Distintos Escenarios de Precio

Escenario	Bajo	Base	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
Precio Biodiesel USD/m3	500	593	652	712	771	830	890	949	1.008
Ing. Annual Biodiesel \$MM CLP	31.323	37.148	40.863	44.578	48.293	52.008	55.723	59.438	63.152
Ing. Annual Glicerina \$MM CLP	316	316	316	316	316	316	316	316	316
Ing. Annual Total	31.639	37.465	41.180	44.894	48.609	52.324	56.039	59.754	63.469

Fuente: Elaboración propia

5.6. Costos

Tabla 17: Costos Anuales de Manejo Agronómico y Cosecha

Año	1	2	3	4 en adelante
Costo por hectarea (\$CLP)	411.680	441.932	536.066	649.239

Fuente: Elaboración propia a partir de Arancibia [et al.] Desarrollo en el anexo 8.5.

Los costos operacionales se separan en tres categorías: los costos propios de la producción agrícola, los costos de la producción de biodiesel, y los costos de transporte entre los campos de cultivo y la planta. El detalle del cálculo de los costos de manejo agronómico está disponible en el anexo 8.5.

Tabla 18: Costos anuales de producción industrial

Precio unitario	unidad	cantidad	unidad	valor	unidad
Costos Fijos					
Personal				906.545	USD
Gastos Generales				20.000	USD
Arriendo Oficinas				40.000	USD
Mantenimiento planta	5%	%/equipos		427.955	USD
Seguros y tasas	0,20%	%/total		28.372	USD
Otros costos	5%	%/costos fijos		71.144	USD
total			total	1.494.016	USD
Costos variables					
metanol con flete	316	\$US/tn	10.114,69	ton	3.196.241 USD
Acido fosforico (85%)	880,00	\$US/tn	92,30	ton	81.223 USD
Acido clorhidrico (35%)	600,00	\$US/tn	801,77	ton	481.062 USD
Soda caustica (escamas)	650,00	\$US/tn	1.868,95	ton	1.214.815 USD
Electricidad (Energia)	46,43	\$/kWh	1.542.078	kWh	71.598.682 \$
Electricidad (Potencia)	9.510,84	\$/kW/mes	193	kW	1.835.592 \$
total			total	5.106.858	USD
total costos anuales				6.600.874	USD

Fuente: Elaboración Propia a partir de Hervé, Shoennenbeck, Cotizaciones de Oxiquim, y precios referenciales de Methanex y ICIS.

Los costos variables de operación de la planta se aplican en un 50% para el año 4 debido a una menor producción, y después en un 100% para los años 5-24.

El costo de transporte contempla el traslado de las semillas de jatropha cosechadas hacia la planta, y la devolución de parte de la torta de semillas usada a los campos de cultivo. Se utilizará un valor referencial para transporte terrestre de \$ US 1,00 por tonelada-kilometro.⁹⁵ También se asumirá que la distancia de recorrido promedio es de 15 kilómetros, lo que abarca la gran mayoría de los valles interiores del norte. Se requiere el traslado de 361.957 toneladas de semillas hacia la planta, a un costo anual de USD \$5.429.351. Luego, se trasladan de vuelta al cultivo las 229.641 toneladas de torta que restan después de extraer el aceite y suplir la necesidad energética de la planta para ser utilizado como fertilizante en los campos, con un costo de USD \$3.444.621 anualmente.

5.7. Depreciación y valor residual del proyecto

Se utilizará depreciación lineal a 20 años de la inversión en la planta, y depreciación lineal a 10 años de la instalación del cultivo, las máquinas cosechadoras, y la instalación de riego, de acuerdo a estimaciones de las vidas útiles.⁹⁶

En el año 24, se liquidan los terrenos y los derechos de agua en el valor de compra, dependiendo el monto recuperado por este concepto de la superficie necesaria según el rendimiento de la jatropha evaluado. Se presume que la tecnología de la planta de biodiesel estará obsoleta, y que otro proceso productivo será más vigente. Luego, el único valor de liquidación de la planta será el terreno y la venta de las instalaciones como chatarra, lo que no se considera para efectos del valor de liquidación por tener un valor presente insignificante cuando sujeto al descuento por el valor del dinero en el tiempo. La tabla 19 refleja los valores residuales, según la cantidad de hectáreas de jatropha que se haya plantado.

Tabla 19 : Valores Residuales de Terreno y Derechos de Agua en el Año 24

	Escenario de rendimiento		
	Base	mejoría 25%	mejoría 60%
Ha	72.391	57.913	45.245
Valor Terreno (\$ MM CLP)	289.565	231.652	180.978
Valor Derechos de Agua (\$ MM CLP)	32.576	26.061	20.360
Total valor residual en Año 24	322.142	257.713	201.338

Fuente: Elaboración Propia

5.8. Flujos de caja del caso base

A continuación se presenta, a modo de ejemplo, el flujo de caja en millones de pesos (excepto donde se indica toneladas o años) para un caso base, es decir un precio de biodiesel de USD \$593 /m3 y un rendimiento la jatropha de 5 toneladas/ha a partir del año 4.

⁹⁵ CHILE TRANSPORTE

⁹⁶ BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS, "Depreciation Estimates"

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Precio TN BD	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715
Ventas TN BD	0	0	0	0	50.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Ingresos BD MM\$	0	0	0	0	18.573	37.147	37.147	37.147	37.147
Ingresos Glicerina MM\$	0	0	0	0	159	318	318	318	318
Costos Agrícolas MM\$	0	-29.802	-31.992	-38.807	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869
Costos Planta MM\$	0	0	0	0	-2.226	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630
Costos Transporte MM\$	0	0	0	0	-2.440	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881
Margen MM\$	0	-29.802	-31.992	-38.807	-32.803	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916
Depreciación Implantación MM\$	0	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429
Depreciación Riego MM\$	0	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859
Depreciación Cosechadoras MM\$	0	0	0	0	0	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433
Depreciación Industrial MM\$	0	0	0	0	-390	-390	-390	-390	-390
Depreciación Total MM\$	0	-16.288	-16.288	-16.288	-16.678	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112
Resultado antes Impuestos MM\$	0	-46.090	-48.280	-55.095	-49.481	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027
Impuestos 17% MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultado después de Impuestos MM\$	0	-46.090	-48.280	-55.095	-49.481	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027
+ Depreciación MM\$	0	16.288	16.288	16.288	16.678	18.112	18.112	18.112	18.112
Inversión Terreno&Derechos agua MM\$	-322.142	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Sist. Riego MM\$	-108.587	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Implantación MM\$	-199.310	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Cosechadoras MM\$	0	0	0	0	-14.333	0	0	0	0
Inversión Planta MM\$	0	0	0	-7.802	0	0	0	0	0
Rescate Terreno&Derechos agua MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Neto MM\$	-630.039	-29.802	-31.992	-46.609	-47.137	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916

Año	9	10	11	12	13	14	15	16
Precio TN BD	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715
Ventas TN BD	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Ingresos BD MM\$	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147
Ingresos Glicerina MM\$	318	318	318	318	318	318	318	318
Costos Agrícolas MM\$	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869
Costos Planta MM\$	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630
Costos Transporte MM\$	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881
Margen MM\$	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916
Depreciación Implantación MM\$	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429
Depreciación Riego MM\$	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859
Depreciación Cosechadoras MM\$	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433
Depreciación Industrial MM\$	-390	-390	-390	-390	-390	-390	-390	-390
Depreciación Total MM\$	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112
Resultado antes Impuestos MM\$	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027
Impuestos 17% MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultado después de Impuestos MM\$	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027
+ Depreciación MM\$	18.112	18.112	18.112	18.112	18.112	18.112	18.112	18.112
Inversión Terreno&Derechos agua MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Sist. Riego MM\$	0	-108.587	0	0	0	0	0	0
Inversión Implantación MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Cosechadoras MM\$	0	0	0	0	0	-14.333	0	0
Inversión Planta MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Rescate Terreno&Derechos agua MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Flujo Neto MM\$	-17.916	-126.503	-17.916	-17.916	-17.916	-32.249	-17.916	-17.916

Año	17	18	19	20	21	22	23	24
Precio TN BD	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715	0,3715
Ventas TN BD	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Ingresos BD MM\$	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147	37.147
Ingresos Glicerina MM\$	318	318	318	318	318	318	318	318
Costos Agrícolas MM\$	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869	-46.869
Costos Planta MM\$	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630	-3.630
Costos Transporte MM\$	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881	-4.881
Margen MM\$	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916	-17.916
Depreciación Implantación MM\$	-5.429	-5.429	-5.429	-5.429	0	0	0	0
Depreciación Riego MM\$	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859	-10.859
Depreciación Cosechadoras MM\$	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433	-1.433
Depreciación Industrial MM\$	-390	-390	-390	-390	-390	-390	-390	-390
Depreciación Total MM\$	-18.112	-18.112	-18.112	-18.112	-12.682	-12.682	-12.682	-12.682
Resultado antes Impuestos MM\$	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-30.598	-30.598	-30.598	-30.598
Impuestos 17% MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Resultado después de Impuestos MM\$	-36.027	-36.027	-36.027	-36.027	-30.598	-30.598	-30.598	-30.598
+ Depreciación MM\$	18.112	18.112	18.112	18.112	12.682	12.682	12.682	12.682
Inversión Terreno&Derechos agua MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Sist. Riego MM\$	0	0	0	-108.587	0	0	0	0
Inversión Implantación MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Cosechadoras MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión Planta MM\$	0	0	0	0	0	0	0	0
Rescate Terreno&Derechos agua MM\$	0	0	0	0	0	0	0	322.142
Flujo Neto MM\$	-17.916	-17.916	-17.916	-126.503	-17.916	-17.916	-17.916	304.226

5.9. Evaluación económica del caso base

Para el caso base desarrollado en la sección 5.8 y utilizando la tasa de descuento decidida de 15%, el proyecto genera un valor actual neto (VAN) de \$ -718.352 millones. De acuerdo a la evaluación del escenario base, no conviene realizar el proyecto ya que destruye valor. Cabe señalar que el margen de las ventas es negativo todos los años, por lo que aún reduciendo el monto de la inversión, no es posible generar valor con un nivel de costos tan elevado. Se analizará más a fondo este fenómeno en el siguiente punto.

5.10. Análisis de sensibilidad a variables

La tabla 20 revela que el valor actual negativo es más sensible al rendimiento de la jatropha que al precio de venta. Partiendo del escenario base en precio de venta y rendimiento, una mejoría en el precio de venta de 60% produce un aumento del VPN de \$74.499 MM, mientras un aumento en el rendimiento de 60% produce un aumento del VPN de \$304.121

Tabla 20: VPN en \$MM, según precio de biodiesel y rendimiento por hectárea de jatropha

				Escenario Rendimiento		
				Base	mejoría 25%	mejoría 60%
				Ha Necesarios		
				72.403	57.922	45.252
Escenario Precio (% mejoría precio venta)	Bajo	Precio Venta Biodiesel (\$/m3)	\$500	-737.824	-575.648	-433.744
	Base		\$593	-718.352	-556.154	-414.231
	10%		\$652,3	-705.935	-543.724	-401.790
	20%		\$711,6	-693.519	-531.295	-389.348
	30%		\$770,9	-681.102	-518.865	-376.907
	40%		\$830,2	-668.686	-506.435	-364.465
	50%		\$889,5	-656.270	-494.005	-352.263
	60%		\$948,8	-643.853	-481.575	-340.688
	70%		\$1008,1	-631.437	-469.145	-329.525

Fuente: Elaboración propia

El VPN es 0 para un precio de venta del biodiesel de USD \$ 2.882 /m3 en el escenario de una mejoría de 60% en el rendimiento de la jatropha. Por otro lado, a nivel de USD \$ 1008,1 / m3, el valor actual se hace 0 cuando el rendimiento de la jatropha madura es de 25,5 tn/ha. Mientras no se descarte que el precio del petróleo llegue algún día a ese nivel, o que el rendimiento de la jatropha eventualmente sea de 25,5 tn/ha, no son situaciones fácilmente previsibles.

El margen es 0 para un precio de venta del biodiesel de USD \$598,4 /m3, en el escenario de un aumento en 60% por sobre el rendimiento actual de la jatropha. Aumentando el valor de venta del biodiesel a USD \$782,1 /m3, produce un margen positivo y un resultado antes de impuestos de 0, lo que nos muestra que es factible cubrir los costos y gastos no operacionales del proyecto, una vez lograda una variedad de alto rendimiento de la jatropha. La dificultad

para que el proyecto genere valor reside principalmente en la inversión inicial en los terrenos, equipos de riego y la implantación del cultivo.

5.11. Comentarios acerca de la posibilidad de disminuir la inversión

Revisando la inversión inicial en terrenos, instalaciones de riego y la implantación del cultivo, se revelan 3 distintas direcciones para mejorar la rentabilidad del proyecto. Primero, de ser factible cultivar jatropha en un lugar que no requiriera riego, sería posible implantar el cultivo ahorrando \$108.000 millones de inversión en la instalación de riego y \$38.551 en derechos de agua. Segundo, de poder abaratar el costo del terreno, se podría hacer una menor inversión en el terreno, lo que ayudaría significativamente ya que constituye el 44% de la inversión inicial. Estos dos comentarios apuntan hacia un hecho específico. Si fuese posible validar el cultivo de jatropha sin riego en zonas de secano, con abundantes lluvias en el invierno y una estación estival seca, podría eliminar la inversión en riego, los costos de riego y accedería a menores precios de los terrenos. Por otro lado, en las zonas de secano la mano de obra agrícola tiende a ser más barata que lo contemplado aquí.

El tercer punto de interés radica en la posibilidad de reducir dramáticamente los costos de implantación centralizando los procesos de germinación y maduración de las plantas para reducir los costos.

Tabla 21: VPN descontado al 15% en \$MM, según precio de biodiesel y rendimiento por hectárea de jatropha utilizando supuestos modificados

				Escenario Rendimiento		
				Base	mejoría 25%	mejoría 60%
				Ha Necesarios		
				72.403	57.922	45.252
Escenario Precio (% mejoría precio venta)	Bajo	Precio Venta Biodiesel (\$/m3)	\$500	-244.495	-180.985	-125.413
	Base		\$593	-225.023	-161.491	-107.445
	10%		\$652,3	-212.606	-149.471	-96.745
	20%		\$711,6	-200.190	-138.363	-86.205
	30%		\$770,9	-188.115	-127.614	-75.728
	40%		\$830,2	-176.879	-117.026	-65.317
	50%		\$889,5	-166.023	-106.531	-54.917
	60%		\$948,8	-155.349	-96.064	-44.517
	70%		\$1008,1	-144.800	-85.661	-34.141

Fuente: Elaboración Propia

En el caso hipotético de que se pudiera realizar el cultivo sin irrigación en Constitución o Cauquenes, se cambiarían los supuestos de la evaluación en los siguientes puntos principales: primero, el valor de la tierra se consideraría como \$1.000.000 por hectárea. Segundo, no se realizaría ninguna inversión en instalación de riego, ni se contemplaría la mano de obra requerida para tal efecto. Luego, el valor de la mano de obra se reduciría a \$8.000 por jornada-hombre. Finalmente, se considera un ahorro de 25% de los costos de implantación por mayor

eficiencia utilizando un proceso centralizado. Para estos supuestos modificados se realizó el mismo análisis de sensibilidad del valor presente cuyos resultados se presentan en la tabla 21.

Para este escenario supuesto, hay un cambio importante en las posibilidades del proyecto de generar flujos que compensan la inversión inicial. Cuando se descuenta a bajas tasas, es posible que el proyecto genere valor. Esto se puede apreciar considerando la sensibilidad de la tasa interna de retorno presentada en la tabla 22. Las tasas en negrita que están en la región achurada son tasas positivas, lo que implica que para inversionistas con tasas de descuento menores a esos números, el proyecto evaluado bajo los supuestos modificados en ese escenario de precio y rendimiento generará valor.

Tabla 22: TIR, según precio y rendimiento utilizando supuestos modificados

				Escenario Rendimiento		
				Base	mejoría 25%	mejoría 60%
				Ha Necesarios		
				72.403	57.922	45.252
Escenario Precio (% mejoría precio venta)	Bajo	Precio Venta (\$/m3)	\$500	N/A	N/A	N/A
	Base		\$593	N/A	N/A	0,7%
	10%		\$652,3	N/A	N/A	2,8%
	20%		\$711,6	N/A	0,4%	4,6%
	30%		\$770,9	N/A	2,1%	6,2%
	40%		\$830,2	N/A	3,6%	7,7%
	50%		\$889,5	1,2%	5,0%	9,1%
	60%		\$948,8	2,5%	6,3%	10,3%
	70%		\$1008,1	3,7%	7,4%	11,5%

Fuente: Elaboración Propia

5.11.1. Requerimiento de capital de trabajo

El requerimiento de capital de trabajo en esta situación varía según el escenario. Considerando el escenario de un precio de venta de \$1008,1 /m3 y una mejoría de rendimiento de 60%, el proyecto no genera flujos positivos hasta el quinto año, por lo que se requiere \$30.360 millones de pesos de capital de trabajo en adición a la inversión de los primeros cinco años sumando \$128.279.

5.12. Comparación con resultados de otros trabajos

Los resultados económicos arrojados por Hervé y Arancibia [et al.] son de distinto tipo que los que surgen del presente trabajo. Hervé en particular no comenta acerca de la rentabilidad de construir y operar la planta de biodiesel que propone, ya que el objetivo de ese trabajo es preparar un diseño conceptual de la planta. Simplemente comenta que a un costo de 840 USD\$/ton para el aceite de raps, se puede producir biodiesel a un costo de 476,2. La fecha de elaboración del trabajo es anterior a las fuertes alzas en los precios de los alimentos, por lo que no comenta qué podría pasar en caso de aumentar significativamente el precio del aceite de

raps. Se calcula el costo del aceite en 85% de los costos anuales por lo que se puede sacar la conclusión de que a un alto precio de aceite de raps, el costo del biodiesel producido sería alto también. En este sentido, las tendencias de sus resultados son similares las tendencias reveladas en el presente trabajo. Los costos de manejo de la *jatropha* forman la mayor parte de los costos del proyecto considerado en este trabajo y esto es conceptualmente equivalente a los costos incurridos por adquirir aceite en el mercado como se considera en el trabajo de Hervé. En ambos casos, se puede interpretar que la viabilidad económica depende sobre todo del acceso a aceite de bajo costo. Se explota directamente el diferencial entre el precio de aceite y el precio del biodiesel.

Por otro lado, el alcance del trabajo de Arancibia [et al.] no considera la producción de biodiesel desde un punto de vista económico. La evaluación económica considera ingresos por la venta de las semillas a un precio fijo por kilogramo, lo que no refleja un factor económico importante: el volumen de semillas transadas para establecer cultivos es pequeño y su tráfico internacional requiere de permisos fitosanitarios. Esta evaluación no produce un resultado favorable. Los autores realizan un análisis de sensibilidad que tiene un valor presente positivo, incluyendo casos de mayor rendimiento de semillas por hectárea y precios muy altos para el peso de semillas producidas. En todos los casos evaluados los precios pagados por las semillas del proyecto son excesivamente optimistas, por lo que la conclusión debe ser que con precios reales, el cultivo de *jatropha* no es rentable por los excesivos costos del manejo del cultivo. Comparando los costos estimados por Arancibia y los costos actualizados detallados en el presente trabajo (ver anexo 8.5), se puede apreciar que mientras hay una subestimación importante del costo de la mano de obra por Arancibia, los precios de otros insumos no han variado significativamente.

6. Conclusiones

Este estudio exploratorio indica que un proyecto integrado de producción de biodiesel ubicado en la cuarta región bajo condiciones actuales no sería un proyecto económicamente rentable por requerir una inversión excesiva en suelo agrícola de alto costo y en riego. Sin embargo, sustenta posibilidades de obtener retornos positivos al poder realizar el proyecto en otras zonas del país con menores costos de inversión. Por otro lado, el estudio técnico muestra que la producción de biodiesel a partir de la *jatropha* es capaz de suministrar un combustible alternativo al petróleo diesel.

Los resultados finales de la investigación en ejecución acerca de la *jatropha* en Chile permitirán definir mejor las ventajas y debilidades de este cultivo frente a otros cultivos oleaginosos. Se sabe que es capaz de producir cosechas de aceite, pero al menos en la cuarta región el costo hace que su conversión en biodiesel no sea rentable. El cultivo puede no ser idóneo para Chile por requerir de condiciones climáticas que también son propicias para cultivos con altos precios de venta. El precio del terreno es alto en el proyecto explorado debido al costo de oportunidad relacionado con la posibilidad de realizar proyectos frutícolas en la misma región. Debido a la alta inversión, el proyecto de cultivar *jatropha* en la cuarta región es poco atractivo, produciendo un valor presente neto de -\$718.352 millones de pesos utilizando los supuestos del escenario básico. Aun utilizando los supuestos del mejor escenario considerado, una mejoría de 60% en el rendimiento de la *jatropha* y un precio de venta de biodiesel de 1008,1 USD\$/m³, el valor presente neto aun es de -\$329.525 millones de pesos.

Se identificaron dos posibilidades para mejorar drásticamente la rentabilidad de la *jatropha*. La primera es el uso alimenticio de la torta de la semilla si a futuro se desarrollan variedades de *jatropha* no tóxicas. Como forraje animal ésta podría generar un mayor valor que el aceite, que pasaría a ser incluso un producto secundario, como el caso del aceite de soya. La segunda es desarrollar una variedad de *jatropha* que tolere mejor las temperaturas mínimas invernales de las regiones centro-sur del país. Aprovechando los menores precios de la tierra y sin la necesidad de regar, se podría disminuir significativamente la inversión. El efecto de esto es que la tasa interna de retorno es 11,5% para el escenario de una mejoría de 60% en el rendimiento de la *jatropha* y un precio de venta de biodiesel de 1008,1 USD\$/m³. En el evento de que la investigación compruebe esta posibilidad y mitiga los riesgos del cultivo, este retorno sería atractivo para inversionistas que tradicionalmente inviertan en proyectos energéticos de fuentes fósiles.

La investigación acerca del biodiesel muestra que es un combustible con claras ventajas por sobre el petróleo diesel en cuanto a emisiones y que puede ser efectivamente comercializado en mezcla con el combustible fósil. Su producción es a través de procesos probados y sencillos, a costos razonables que sin embargo probablemente serán mejorados a futuro. La glicerina formada por la producción de biodiesel también tiene potencial para generar mayor valor. Si se mejora el proceso de refinamiento de la glicerina o se invente usos novedosos para la glicerina cruda, puede convertirse en un producto de gran importancia y mejorar significativamente el margen de la planta industrial.

Habiendo considerado mercados especiales relacionados con legislación internacional medioambiental, se descartó la posibilidad de vender bonos de gases invernaderos por ser un proyecto que no necesariamente representa una reducción directa ni identificable de las emisiones. Se descartó también la posibilidad de lograr un mayor precio de venta a los generadores eléctricos que requieren producir electricidad de fuentes renovables no convencionales. Estos productores tendrán alternativas más baratas que producir su cuota de energía renovable con biodiesel.

El mercado del petróleo en sí presenta una gran volatilidad y tendencia al alza, que puede proveer oportunidades a futuro para que este proyecto se haga rentable aún en zonas de alto costo como la ubicación en la cuarta región considerada en este trabajo. Sin embargo, la rentabilidad se alcanza más fácilmente logrando bajar los costos de inversión en terreno y establecimiento del cultivo. Sumada a la probabilidad de mejorías importantes del rendimiento de jatropha en un futuro cercano, se vislumbran interesantes oportunidades para estudiar un proyecto de este tipo con una jatropha más resistente a heladas, en zonas como Constitución o Cauquenes, donde existe una competencia por terrenos menos intensa y por consecuencia menores precios. Por esto, se recomienda volver a estudiar el proyecto en la eventualidad que se compruebe la viabilidad de la jatropha en lugares con clima más frío y menos seco.

7. Bibliografía

ACHTEN, W.M.J. [et. al] **“Jatropha bio-diesel production and use”** [fecha de consulta: sábado, 24 de octubre de 2009] Biomass and Bioenergy, Volumen 32, Número 12, Diciembre 2008, paginas 1063-1084

ADDISON, Keith. (2001) **“Vegetable oil yields”** [fecha de consulta: lunes, 29 de junio de 2009] <http://journeytoforever.org/biodiesel_yield.html>

ADRIAANS, Thijs (2006) **“Suitability of solvent extraction for jatropha curcas”** [fecha de consulta: sábado, 14 de noviembre de 2009] <[http://www.fact-foundation.com/media_en/FACT_\(2006\)_-_Suitability_of_solvent_extraction_for_jatropha_curcas](http://www.fact-foundation.com/media_en/FACT_(2006)_-_Suitability_of_solvent_extraction_for_jatropha_curcas)>

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (2002) **“Óxidos de nitrógeno (monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, etc.) (Nitrogen Oxides)”** [fecha de consulta: lunes 29 de junio de 2009] <http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html>

AKBAR, Emil [et al.] (2009) **“Characteristic and Composition of Jatropha Curcas Oil Seed from Malaysia and its Potential as Biodiesel Feedstock”** European Journal of Scientific Research [fecha de consulta: sábado, 29 de agosto de 2009] <http://www.eurojournals.com/ejsr_29_3_11.pdf >

ANASAC **“Ficha de Producto: Rango 480 SL”** [fecha de consulta: viernes, 11 de septiembre de 2009] <http://www.anasac.cl/app/Catalogo/Frontend/producto.asp?cod_doc=75&volver=2>

ANDERSON, Dan [et al.] **“Industrial Biodiesel Plant Design and Engineering: Practical Experience”**, CROWN IRON WORKS [fecha de consulta: domingo, 23 de agosto de 2009] <<http://www.crowniron.com/userImages/Biodiesel.pdf> >

ARANCIBIA, David [et al.] (2007) **“Análisis económico del cultivo de Jatropha curcas para la producción de biodiesel en la localidad de Cerrillos de Tamaya, Cuarta Región”** Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas

AUSTRIAN BIODIESEL INSTITUTE (2002) **“The Development of Biodiesel”**, REACT (Renewable Energy Action), [fecha de consulta: domingo, 16 de agosto de 2009] <http://www.senternovem.nl/mmfiles/The%20Development%20of%20Biodiesel_tcm24-117024.pdf >

ATKINSON, Ben **“The CDM, Kyoto protocol and the sugar, ethanol and bio-fuels industry”** [fecha de consulta: miércoles, 16 de septiembre de 2009] <<http://agrinergergy.com/atkinson.pdf> >

BAI, Yuling y LINDHOUT, Pim. **“Domestication and Breeding of Tomatoes: What have We Gained and What Can We Gain in the Future?”** Laboratory of Plant Breeding, Wageningen University [fecha de consulta: domingo, 23 de agosto de 2009] <<http://aob.oxfordjournals.org/cgi/content/full/100/5/1085>>

BASF **“Ficha de Producto: PODEXAL® ULTRA”** [fecha de consulta: viernes, 11 de septiembre de 2009] <http://www.basf.cl/asp-local/agro_prod_fichaweb.asp?prod_id=114>

BANCO CENTRAL DE CHILE **“Licitación Pagarés Descontables Banco Central - 30 días”** [fecha de consulta: sábado, 03 de octubre de 2009] <http://www.bcentral.cl/estadisticas-economicas/series-indicadores/xls/financiero/licitacion_PDDBC_30.xls>

BEI International **“Mechanically Harvesting Jatropha”** [fecha de consulta: viernes, 11 de septiembre de 2009] <<http://www.beiintl.com/Mechanically%20Harvesting%20Jatropha.pdf>>

BETANCOURT, Róbinson. **“Estudio Teorico Experimental de la Utilización de Esteres Metilicos de Brassica Napus como Combustible”** [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009] <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/SemBiocombustibles/31_Biocombustibles-UFrontera.pdf>

BIO COMBUSTIBLES MG (2009) **“Plantas de Biodiesel”** [fecha de consulta: domingo, 03 de enero de 2010] <http://www.mging.com.ar/plantas_biodiesel.htm>

BIODYS AMERICA (2009) **“Reactores y Equipos para producción de Biodiesel”** [fecha de consulta: domingo, 03 de enero de 2010] <<http://biodiesel.parque4x4.com.ar/>>

BIONEPAL (2009) **“Economics of Jatropha”** [fecha de consulta: sábado, 10 de octubre de 2009] <<http://www.bionepal.org/economics.htm>>

BUREAU OF ECONOMIC ANALYSIS (2004) **“Depreciation Estimates”** [fecha de consulta: domingo, 01 de noviembre de 2009] <<http://www.bea.gov/national/FA2004/Tablecandtext.pdf>>

CÁMARA ARGENTINA DE ENERGÍAS RENOVABLES (2009) **“THE STATE OF THE ARGENTINE BIODIESEL INDUSTRY First Quarter 2009 report”** [fecha de consulta: domingo, 03 de enero de 2010] <<http://www.argentinarenovables.org/archivos/ArgentineBiodieselMarket09.pdf>>

CÁRCAMO, Felipe (2006) **“Plan De Negocio Para Una Empresa Distribuidora Energética De Incorporar Energía Solar Térmica Para Proveer Agua Caliente”**, *Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Industrial*, Universidad De Chile, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Ingeniería Industrial

CATHAY FOREST PRODUCTS (2009) "**CATHAY FOREST'S JATROPHA INVESTMENT RECEIVES VALUATION REPORT FROM POYRY**", [fecha de consulta: sábado, 10 de octubre de 2009]
<<http://www.cathayforest.com/Release/2009/Sept%2018%20b,%202009.pdf>>

CDM EXECUTIVE BOARD (2007) "**AM0047: Production of biodiesel based on waste oils and/or waste fats from biogenic origin for use as fuel**", Approved baseline and monitoring methodology [fecha de consulta: miércoles, 16 de septiembre de 2009]
<http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/CDMWF_AM_LSP8N2AV76VN489R6IU72YJGTSJL9>

CENTER FOR AGRICULTURAL AND RURAL DEVELOPMENT (2008) "**Splashing and Dashing Biodiesel**" [fecha de consulta: domingo, 03 de enero de 2010]
<http://www.card.iastate.edu/iowa_ag_review/fall_08/article3.aspx>

CHEMICAL ENGINEERING (2009) "**Chemical Engineering Plant Cost Index**" [fecha de consulta: domingo, 22 de noviembre de 2009] <http://tekim.undip.ac.id/download/pci_20012008.pdf>

CHEMICALLAND21.COM (2008) "**NPK, FERTILIZER**" [fecha de consulta: domingo, 13 de septiembre de 2009] <<http://chemicalland21.com/industrialchem/inorganic/NPK.htm>>

CHILE TRANSPORTE "**Crisis Reduce Negocio de Carga en 12%**", [fecha de consulta: lunes, 12 de octubre de 2009]
<http://chiletransporte.cl/portal/index.php?option=com_content&task=view&id=93&Itemid=159>

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2007) "**HIDROCARBUROS: Consumo por Tipo de Usuario**" [fecha de consulta: domingo, 27 de septiembre de 2009] <
http://www.cne.cl/cnewww/export/sites/default/06_Estadisticas/Documentos/hidrocarburos/consumo_por_tipo_de_usuario.zip>

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2008a) "**LEY NÚM. 20.257 INTRODUCE MODIFICACIONES A LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS RESPECTO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES**" [fecha de consulta: domingo, 20 de septiembre de 2009]
<http://www.cne.cl/cnewww/export/sites/default/08_Normativas/02_energias/descargable_renovables/20_257_1_xDoc_1_-_1x.pdf>

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2008b) "**Venta de Combustibles Derivados del Petróleo**" [fecha de consulta: lunes 29 de junio de 2009]
<http://www.cne.cl/cnewww/opencms/06_Estadisticas/energia/Hidrocarburos.html>

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2009a) “**Tipos de Energía**” [fecha de consulta: jueves, 03 de septiembre de 2009] <
http://www.cne.cl/cnewww/opencms/03_Energias/Biocombustibles/tipos_energia.html>

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (2009b) “**Licitación 2008-1**” [fecha de consulta: domingo, 20 de septiembre de 2009] <
http://www.cne.cl/cnewww/opencms/12_Utiles/licitacion/licitaciones/licitacion20081.html>

COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIOAMBIENTE (2009) “**El clima • Cuarta Región de Coquimbo**” [fecha de consulta: miércoles, 09 de septiembre de 2009] <
http://www.conama.cl/educacionambiental/1142/articles-29099_recurso_7.pdf >

CO2HANDEL.DE (2007) “**CDM Board rejects Indian methodology for bio-diesel from palm, jatropha oil**” [fecha de consulta: miércoles, 16 de septiembre de 2009] <
http://www.co2-handel.de/article160_7049.html >

DAMODARAN, Aswath (2009) “**Country Default Spreads and Risk Premiums**” [fecha de consulta: jueves, 08 de octubre de 2009] <
http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html>

DAMODARAN, Aswath (2008) “**Equity Risk Premiums (ERP): Determinants, Estimation and Implications**” [fecha de consulta: domingo, 11 de octubre de 2009] <
<http://www.stern.nyu.edu/~adamodar/pdfiles/papers/ERPfull.pdf>>

DAMODARAN, Aswath (2000) “**The Dark Side of Valuation**” [fecha de consulta: domingo, 11 de octubre de 2009] <
<http://www.stern.nyu.edu/~adamodar/pdfiles/papers/HighGrow.pdf>>

DE JONGH, Jan y ADRIAANS, Thijs (2007) “**Jatropha oil quality related to use in diesel engines and refining methods**” Ingenia [fecha de consulta: domingo, 30 de agosto de 2009] <
http://www.fact-foundation.com/media_en/Jatropha_oil_quality_related_to_use_in_diesel_engines_and_refining_methods_-_Technical_Note >

DUKE, James A. (1983) “**Handbook of Energy Crops**” [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009] <
http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html>

DIESELENGINEMOTOR.COM, “**Diesel Engine History**” [fecha de consulta: domingo, 16 de agosto de 2009] <
http://www.dieselenginemotor.com/diesel_engine_history.html>

EBERT, Jessica, “**Supercritical Methanol for Biodiesel Production**”, *Biodiesel Magazine* April 2008, [fecha de consulta: viernes, 04 de septiembre de 2009] <
http://www.biodieselmagazine.com/article.jsp?article_id=2212 >

EL MERCURIO, “**Gobierno: Zarpe de buque con GNL cierra un periodo crítico**” p. B9, 6 de junio 2009

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, “**Spot Prices, Historical Series**” [fecha de consulta: sábado, 14 de noviembre de 2009] <http://tonto.eia.doe.gov/dnav/pet/xls/PET_PRI_SPT_S1_D.xls>

EULER, Hartlieb (2004) “**Case Study: Jatropha Curcas**” Global Facilitation Unit for Underutilized Species [fecha de consulta: domingo, 23 de agosto de 2009] <http://www.underutilized-species.org/Documents/PUBLICATIONS/jatropha_curcas_india.pdf>

FACT: Fuels from Agriculture in Comunal Technology (2008) “**Jatropha Handbook Vol. 1-6**” [fecha de consulta: Sunday, September 13, 2009] <<http://www.fact-foundation.com/en/Publications/Handbooks>>

GERPEN, John Van (2004) “**Biodiesel Production Technologies**” University of Idaho, Department of Biological and Agricultural Engineering [fecha de consulta: viernes, 21 de agosto de 2009] <<http://www.cisat.jmu.edu/biodiesel/presentations/Biodiesel%20Production%20Technologies-VanGerpen%20p%20presentation.ppt>>

HELLER, Joachim (1996) “**Physic nut. Jatropha curcas L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops**” [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009] <<http://www.biodiversityinternational.org/Publications/Pdf/161.pdf>>

HENNING, Reinhard K. (2009) “**The Jatropha Book**” [fecha de consulta: sábado, 15 de agosto de 2009] <<http://www.jatropha.de/documents/The%20Jatropha%20Book-2009.pdf>>

HERATH, Menaka [et al.] (2008) “**Financial Feasibility of Growing Jatropha for Bio-diesel Production in Sri Lanka**” [fecha de consulta: sábado, 10 de octubre de 2009] <<http://www.pgia.ac.lk/socs/saea/program2008/poster/menaka.pdf>>

HERVÉ, Jérôme (2007) “**Diseño Conceptual de Una Planta de Biodiesel**”, *Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Mecánico*, Universidad De Chile, Facultad De Ciencias Físicas Y Matemáticas, Departamento De Ingeniería Mecánica

ICIS PRICING (2009) “**Sample Report: Glycerine US Gulf Market, 4rth March 2009**” [fecha de consulta: miércoles, 30 de septiembre de 2009] <http://www.icispricing.com/il_shared/Samples/SubPage170.asp>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007) “**Climate Change 2007: The Physical Science Basis**” [fecha de consulta: viernes, 23 de octubre de 2009] <<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>>

CIRAS (Iowa State University) "**Strategic Biodiesel Decisions**" [fecha de consulta: sábado, 14 de noviembre de 2009]
<<http://www.ciras.iastate.edu/bioindustry/info/StrategicBiodieselDecisionsNovember2006.pdf>>
>

JATROPHA CURCAS PLANTATIONS (2009) "**Jatropha Curcas Seeds**" [fecha de consulta: sábado, 15 de agosto de 2009] < <http://www.jatrophacurcasplantations.com/jatropha-curcas-seeds.htm>>
>

JATROPHA WORLD (2009a) "**FAQ**" [fecha de consulta: sábado, 15 de agosto de 2009] < <http://www.jatrophabiodiesel.org/faq.php>>

JATROPHA WORLD (2009b) "**Planting Science**" [fecha de consulta: sábado, 15 de agosto de 2009] <<http://www.jatrophabiodiesel.org/planting-science.php>>

JOURNEY TO FOREVER (2009) "**Glycerine**" [fecha de consulta: sábado, 15 de agosto de 2009]
<http://www.journeytoforever.org/biodiesel_glycerin.html >

KNOTHE, Gerard (2001) "**Historical perspectives on vegetable oil-based diesel fuels**" [fecha de consulta: sábado, 15 de agosto de 2009]
<http://www.biodiesel.org/resources/reportsdatabase/reports/gen/20011101_gen-346.pdf>

KOLBERT, Elizabeth (2006) "**The Darkening Sea**", The New Yorker, [fecha de consulta: lunes 29 de junio de 2009] < http://www.newyorker.com/archive/2006/11/20/061120fa_fact_kolbert>

MACLEAN, Craig (2007) "**Poder Calorífico**" [fecha de consulta: lunes, 14 de septiembre de 2009]
< http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/06-07/Biodiesel/experiments.htm>

MAIER, Dirk E. (1998) "**High Value Soybean Composition**" [fecha de consulta: domingo, 15 de noviembre de 2009] < <http://www.ces.purdue.edu/extmedia/GQ/GQ-39.html>>

MINISTERIO DE ECONOMÍA, Fomento y Reconstrucción (2008) "**Aprueba Definiciones Y Especificaciones De Calidad Para La Producción, Importación, Transporte, Almacenamiento, Distribución Y Comercialización De Bioetanol Y Biodiesel**" [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009] < [http://revistavirtual.redesma.org/vol4/pdf/legislacion/Chile-Biocombustibles%20\(Decreto%20nro11\).pdf](http://revistavirtual.redesma.org/vol4/pdf/legislacion/Chile-Biocombustibles%20(Decreto%20nro11).pdf) >

NATIONAL BIODIESEL BOARD (2007) "**Biodiesel Production and Quality**" [fecha de consulta: sábado, 22 de agosto de 2009]
<http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/prod_quality.pdf>

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (2006) **“Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and Properties of Biodiesels and Biodiesel/Diesel Blends”** [fecha de consulta: miércoles, 19 de agosto de 2009] <<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/31460.pdf>>

NEW FUEL (2009) **“Diagrama de Proceso de las Unidades de Producción de Biodiesel”**, [fecha de consulta: domingo, 03 de enero de 2010] <http://www.biodieselplants.com.ar/flow_chart1.htm>

NILLES, Dave (2006) **“Combating the Glycerin Glut”**, *Biodiesel Magazine* [fecha de consulta: domingo, 23 de agosto de 2009] <http://www.biodieselmagazine.com/article.jsp?article_id=1123&q=&page=all>

ODEPA (2009) **“Estadísticas y precios / Series de precios / Avance mensual”** [fecha de consulta: domingo, 13 de septiembre de 2009] <<http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/jsp/precios/precios.jsp> >

PANEQUE, Manuel (2008) **“Desarrollo y validación del cultivo de Jatropha curcas”** [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009] <http://www.cne.cl/archivos_bajar/jatropha/Manuel_Paneque.pdf>

POPE, C. Arden [et al.] (2002) **“Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution”**, *Journal of the American Medical Association*, [fecha de consulta: lunes 29 de junio de 2009] <<http://jama.ama-assn.org/cgi/reprint/287/9/1132>>

PROGRAMA JATROPHA CHILE **“Jatropha”** [fecha de consulta: sábado, 24 de octubre de 2009] <<http://www.jatropha.cl/contenido.asp?Id=3&Titulo=Programa Jatropha Chile> >

RENEWABLE ENERGY WORLD.COM (2007) **“Imperium Renewables Opens Largest Biodiesel Facility in U.S.”** [fecha de consulta: lunes, 29 de junio de 2009] <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2007/08/imperium-renewables-opens-largest-biodiesel-facility-in-u-s-49663>>

SALDÍAS, Hernaldo y ULLOA, Hernán **“Evaluación comparativa de centrales de generación de energías renovables mediante la aplicación de la nueva ley de energías renovables recientemente aprobada en Chile”** [fecha de consulta: domingo, 20 de septiembre de 2009] <http://www2.ing.puc.cl/~power/alumno08/renewables/EXTRAS/The_Chilean_renewables_law.pdf>

SAYYAR, Sepidar [et al.] **“Extraction of Oil from Jatropha Seeds-Optimization and Kinetics”** [fecha de consulta: sábado, 24 de octubre de 2009] <<http://www.scipub.org/fulltext/ajas/ajas671390-1395.pdf>>

SERVICIO AGRICOLA Y GANADERO (2009) “**Condiciones Básicas para la Aplicación de Riles Vitivinícolas en Riego, Anexo F: Criterios de Oferta/Demanda Hídrica Para el Uso de los Riles Tratados**” [fecha de consulta: martes, 08 de septiembre de 2009]
<http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/guia_riles_vinos/Anexo_F.pdf>

SERVICIO AGRICOLA GANADERO (2009) “**Condiciones Básicas para la Aplicación de Riles Vitivinícolas en Riego, Anexo G: Métodos de Riego**” [fecha de consulta: miércoles, 09 de septiembre de 2009] <http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/guia_riles_vinos/Anexo_G.pdf>

SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS (2004) “**Clasificación de Los Terrenos (Suelos)**” [fecha de consulta: martes, 08 de septiembre de 2009]
<http://www.sii.cl/documentos/resoluciones/2004/reso57_anexo1.doc >

SERVICIO NACIONAL DE ADUANAS (2009) “**Estadística de Comercio Exterior**” [fecha de consulta: viernes, 20 de noviembre de 2009] <<http://200.72.160.89/estacomex/asp/index.asp>>

SCHOENNENBECK, Pablo [et al.] (2007) “**Plan de Negocios para Planta productora de Biodiesel**” Trabajo de IN69B, contacto personal.

SCHUCHARDT, SERCHELI, Y MATHEUS VARGAS (1997) “**Transesterification of Vegetable Oils: a Review**” [fecha de consulta: viernes, 21 de agosto de 2009]
<http://jbcs.sbq.org.br/jbcs/1998/vol9_n3/30.pdf>

SOY INFOR CENTER (2009) “**History of Soybean Crushing: Soy Oil and Soybean Meal**” [fecha de consulta: martes, 27 de octubre de 2009]
<http://www.soyinfocenter.com/HSS/soybean_crushing1.php>

SOTOLONGO [et al.] (2008) “**JATROPHA CURCAS L. AS A SOURCE FOR THE PRODUCTION OF BIODIESEL: A CUBAN EXPERIENCE**” [fecha de consulta: lunes, 14 de septiembre de 2009]
<<http://hem.fyristory.com/zanzi/paper/W2257.pdf>>

SUPERINTENDENCIA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES (2008) “**Establece protocolos de normas técnicas para análisis y/o ensayos de bioetanol y biodiesel según se indica**” [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009]
<<http://www.sec.cl/pls/portal/docs/PAGE/SECNORMATIVA/COMBUSTIBLES%20RESOLUCIONES/RE%20746,%20METODOS%20ENSAYO%20BIOCL.PDF>>

THEBIOENERGYSITE (2008) “**Subsidy loss threatens German bio-fuel industry**” [fecha de consulta: martes, 18 de agosto de 2009]
<<http://www.thebioenergysite.com/news/254/subsidy-loss-threatens-german-biofuel-industry>>

USDA FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE (2009) "**Oilseeds World Market and Trade, Nov. 2009**" [fecha de consulta: domingo, 15 de noviembre de 2009] <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2006) "**Biodiesel Handling and Use Guidelines**" [fecha de consulta: miércoles, 19 de agosto de 2009] <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/40555.pdf>>

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2006) "**A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions Draft Technical Report**" [fecha de consulta: domingo, 31 de mayo de 2009] <<http://www.epa.gov/OMS/models/analysis/biodsl/p02001.pdf>>

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2009) "**Diesel Fuel Programs and Regulations**" [fecha de consulta: sábado, 05 de septiembre de 2009] <<http://www.epa.gov/oms/regs/fuels/diesel/diesel.htm> >

VALLE DEL ELQUI (2009) "**Mapa Rutero de Vicuña**" [fecha de consulta: sábado, 14 de noviembre de 2009] < <http://portaldeelqui.com/mapa-rutero-de-vicuna/>>

VOEGELE, Erin (2009) "**Glycerin's Role in 2009**" *Biodiesel Magazine* [fecha de consulta: miércoles, 30 de septiembre de 2009] <http://www.biodieselmagazine.com/article.jsp?article_id=2976 >

8. Anexos

8.1. Determinación de una Tasa de Descuento por Metodología CAPM

Mediante el CAPM, un modelo de costo de capital, se determina una tasa de retorno esperable para un activo de retorno variable o riesgoso. Se toma en consideración el riesgo y retorno de mercado y la sensibilidad del activo a éste, junto al retorno de un activo libre de riesgo.

El retorno esperado para el activo i o $E(R_i)$ se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$E(R_i) = \beta_i(R_m - R_f) + R_f$$

Donde R_m es el retorno de mercado, R_f el retorno de un activo libre de riesgo, y β_i es la sensibilidad al retorno del mercado del activo i .

En este caso, el activo libre de riesgo en general se define por el precio histórico del activo libre de riesgo, no por el precio presente. El activo libre de riesgo elegido es el pagaré descontable a 30 días del banco central de Chile, cuya tasa promedio es 3,89% en las licitaciones de los últimos 10 años.⁹⁷

8.1.1. Para cultivos agrícolas

Para calcular un beta apropiado para cultivos agrícolas, se considera el β de empresas ligadas al rubro agroindustrial, en este caso Iansa, Watts, Concha y Toro, y San Pedro. El β describe la sensibilidad del retorno del activo a los retornos del mercado en general, calculado como:

$$\beta_i = \frac{Cov(r_i, r_m)}{Var(r_i)}$$

Es decir, β es el cociente entre la covarianza del retorno del activo con el retorno del mercado y la varianza del retorno del activo. Se calcula usando los retornos periódicos durante alguna extensión de tiempo, por ejemplo los cierres diarios de los papeles durante dos años.

Como las empresas tienen diferencias en la razón de endeudamiento, para compararlas es necesario “desapalancar” los β asociados para compensar el efecto de la deuda sobre la relación riesgo-rentabilidad. β apalancado, o incorporando el efecto de la deuda, es convertida en un β desapalancado, mediante la siguiente fórmula:

$$\beta_u = \frac{\beta_l}{(1 + (1 - t) \left(\frac{D}{P}\right))}$$

⁹⁷ BANCO CENTRAL DE CHILE

Es decir, que el β_u o β desapalancado es igual al cociente del β_l o β apalancado y una función de t , la tasa impositiva y $\left(\frac{D}{P}\right)$, la razón de deuda partido patrimonio. En la tabla 21 se presentan algunos resultados de β desapalancado.

Tabla 23: Betas para Empresas Agroindustriales Transadas en la Bolsa de Comercio de Santiago

Accion	β apalancado 2 años	pasivo exigible/patrimonio	β desapalancado
CONCHATORO	0,30	0,65	0,19
IANSÁ	0,67	0,87	0,39
SAN PEDRO	0,26	0,35	0,20
WATTS-B	0,06	1,47	0,03

Fuente: 1ei, Bolsa de Comercio de Santiago, Elaboración Propia

8.1.2. Para empresas relacionadas con la industria de los combustibles

Para calcular un β apropiado para empresas ligadas a la industria de elaboración y distribución de los combustibles, se consideraron los β de Copec y Gasco, presentando algunos resultados en la tabla 22.

Tabla 24: Betas para Empresas Comercializadoras de Derivados del Petróleo Transadas en la Bolsa de Comercio de Santiago

Accion	β apalancado 2 años	pasivo exigible/patrimonio	β desapalancado
COPEC	0,88	0,63	0,58
GASCO	0,15	2,04	0,06

Fuente: 1ei, Bolsa de Comercio de Santiago, Elaboración Propia

8.1.3. Para este proyecto integrado

Para el proyecto integrado, se calcula un Beta promedio a partir de los resultados de los β desapalancados de las tablas 23 y 24. El promedio de los β_u para las empresas identificadas es 0,24. El premio por riesgo correspondiente a Chile, o el término $R_m - R_f$, es de 7,1%⁹⁸, calculado en base al premio por riesgo de un mercado desarrollado y sumando el riesgo país otorgado por el rating de bonos soberanos. Luego, la tasa de retorno exigible del patrimonio determinado por el modelo CAPM es:

$$E(R_i) = 0,24(7,1\%) + 3,89\% = 5,6\%$$

8.1.4. Discusión de la validez de la tasa determinada

⁹⁸ DAMODARAN "Country Default Spreads and Risk Premiums

Hay un factor no considerado por la metodología utilizada, que corresponde al riesgo tecnológico. No hay firmas directamente comparables con la operación del proyecto, pues las operaciones de COPEC y Gasco radican más en la comercialización que en la producción, y las firmas agrícolas de naturaleza alimenticia mencionadas gozan de una demanda muy estable en el caso de Watts y Iansa, y además tienen acceso a mercados internacionales en caso de San Pedro y Concha y Toro. El proyecto contemplado utiliza tecnología agrícola sin antecedentes comerciales y apunta a una demanda sujeta a condiciones económicas nacionales, por lo que se estima que la tasa determinada por la metodología anterior es un premio demasiado bajo por el riesgo asumido, y no refleja correctamente el descuento que deben recibir los flujos de efectivo del proyecto.

Tabla 25: Betas para una selección de empresas integradas de petróleo en el NYSE

Acción	β apalancado 1 año	pasivo exigible/patrimonio	β desapalancado
ConocoPhillips	1,12	1,55	0,54
Exxon Mobil	0,47	1,11	0,26
Chevron	0,66	0,83	0,42
Shell	0,87	1,19	0,48
BP	0,75	1,42	0,38
Repsol YPF	1,43	1,46	0,71
Petrobras	1,50	0,99	0,89
Gazprom	1,49	0,46	1,13
Promedio:			0,60

Fuente: Google Finance, Elaboración Propia

Otra alternativa sería componer una cartera de acciones más similares, por ejemplo productores de biodiesel en Estados Unidos, algunos de los que tienen un papel transado. Sin embargo, este esfuerzo se complica y vuelve inútil debido a la falta de trayectoria, ya que no hay un beta histórico que rige la relación de la acción con el mercado.

Una metodología final para explorar es suponer que en el largo plazo⁹⁹, el negocio de un proyecto integrado de biocombustible tiende a comportarse como el negocio de una firma integrada de petróleo, es decir una que produce y refina petróleo. Las betas de empresas de petróleo tradicionales transadas en EEUU se presentan en la tabla 23.

Tomando un premio por riesgo del mercado en la bolsa NYSE de aproximadamente 6%, y una tasa libre de riesgo de aproximadamente 4%¹⁰⁰, se calcula un premio por riesgo para las empresas de la tabla 25 de aproximadamente 7,59%. Esta tasa sirve de guía, representando el rango inferior de riesgo del proyecto. En el caso en que se estableciese definitivamente una tecnología agrícola para plantar jatropha y convertir el aceite en biodiesel, llevando el riesgo a niveles similares a empresas de la industria del petróleo tradicional, sería aplicable. Sin

⁹⁹ DAMODARAN (2000)

¹⁰⁰ DAMODARAN (2008)

embargo, en el corto plazo, se requiere de un descuento mayor para hacerse cargo del factor incógnito del cultivo.

8.2. Adaptación del Balance de Masas para Aceite de Raps a Aceite de Jatropha

Aplicando la metodología utilizada por Jérôme Hervé en Diseño Conceptual de una Planta de Biodiesel se reconstruyó el balance de masas para cada flujo en caso de aceite de raps. Después, se cambiaron los parámetros con respecto al flujo de entrada para reflejar el mayor contenido de ácidos grasos libres que tiene la jatropha, como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26: Comparación de Contenidos del Aceite Crudo de Raps y de Jatropha

Descripción Flujo	Aceite de Raps	Aceite de Jatropha
Composición		
Aceite		
TG	97,250	96,940
FFA	0,870	2,230
Fosfatidos	1,080	0,030
Otros (no saponificables)	0,800	0,800
Total (ton/día)	100,000	100,000

Fuente: HERVÉ, AKBAR [et al.]

A continuación, se presenta el balance de masas adaptado de Hervé para un flujo de entrada de aceite de jatropha:

N° Flujo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Descripción Flujo	Aceite Crudo	Aceite Calentado	Acido Fosforico	Agua	Flujo Degum.	Goma y Agua	Goma	Agua	Aceite sin fosfatidos	Soda Caustica
Composición										
Aceite										
TG	318,983	318,983			318,983	1,595	1,595		317,388	
FFA	7,338	7,338			7,338				7,338	
Fosfatidos	0,099	0,099			0,000					
Otros	2,632	2,632			2,632				2,632	
Agua			0,049	6,581	6,630	6,597		6,299	0,332	21,171
Metanol										
Catalizador										
Goma					0,378	0,378	0,378			
Jabones										
Ácido fosforico			0,280							
Ácido clorhidrico										
NaOH										2,222
Sales										
Glicerol										
Metil éster										
Total (ton/día)	329,052	329,052	0,329	6,581	335,962	8,571	1,973	6,299	327,689	23,393
Total (ton/hora)	13,710	13,710	0,014	0,274	13,998	0,357	0,082	0,262	13,654	0,975

N° Flujo	11	11'	11''	12	13	14	15	16	17	18
Descripción Flujo	Agua	Aceite y Soda Caustica	Aceite y Soda caliente	Flujo refinado	Borra	Aceite	Aceite Calentado	Vapor agua	Aceite refinado	Aceite refinado
Composición										
Aceite										
TG		317,388	317,388	317,388	18,161	299,227	299,227		299,227	299,227
FFA		7,338	7,338	0,073		0,073	0,073		0,073	0,073
Fosfatidos		0,000	0,000							
Otros		2,632	2,632	2,632	0,150	2,483	2,483		2,483	2,483
Agua	49,153	70,656	70,656	71,122	70,766	0,356	0,356	0,356		
Metanol										
Catalizador										
Goma										
Jabones				7,831	7,831					
Ácido fosforico										
Ácido clorhidrico										
NaOH		2,222	2,222	1,188	1,188					
Sales										
Glicerol										
Metil éster										
Total (ton/día)	49,153	400,236	400,236	400,234	98,096	302,138	302,138	0,356	301,782	301,782
Total (ton/hora)	2,048	16,677	16,677	16,676	4,087	12,589	12,589	0,015	12,574	12,574

N° Flujo	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Descripción Flujo	Catalizador	Metanol	Flujo de Reactor 1	Glicerol	Flujo de Decantador 1	Catalizador	Metanol	Flujo de reactor 2	Glicerol	Ester a lavar
Composición										
Aceite										
TG			44,884		44,884			2,992		2,992
FFA			0,000							
Fosfatidos										
Otros			2,483		2,483			2,483		2,483
Agua										
Metanol	26,930	38,283	37,502	22,501	15,001	4,040	5,742	20,217	12,130	8,087
Catalizador	2,992		2,979	2,979		0,449		0,449	0,449	
Goma										
Jabones			0,029	0,003	0,026			0,026	0,003	0,024
Ácido fosforico										
Ácido clorhidrico										
NaOH										
Sales										
Glicerol			26,558	26,558				4,374	4,374	
Metil éster			255,506		255,506			297,589		297,589
Total (ton/día)	29,923	38,283	369,940	52,040	317,899	4,488	5,742	328,130	16,956	311,174
Total (ton/hora)	1,247	1,595	15,414	2,168	13,246	0,187	0,239	13,672	0,706	12,966

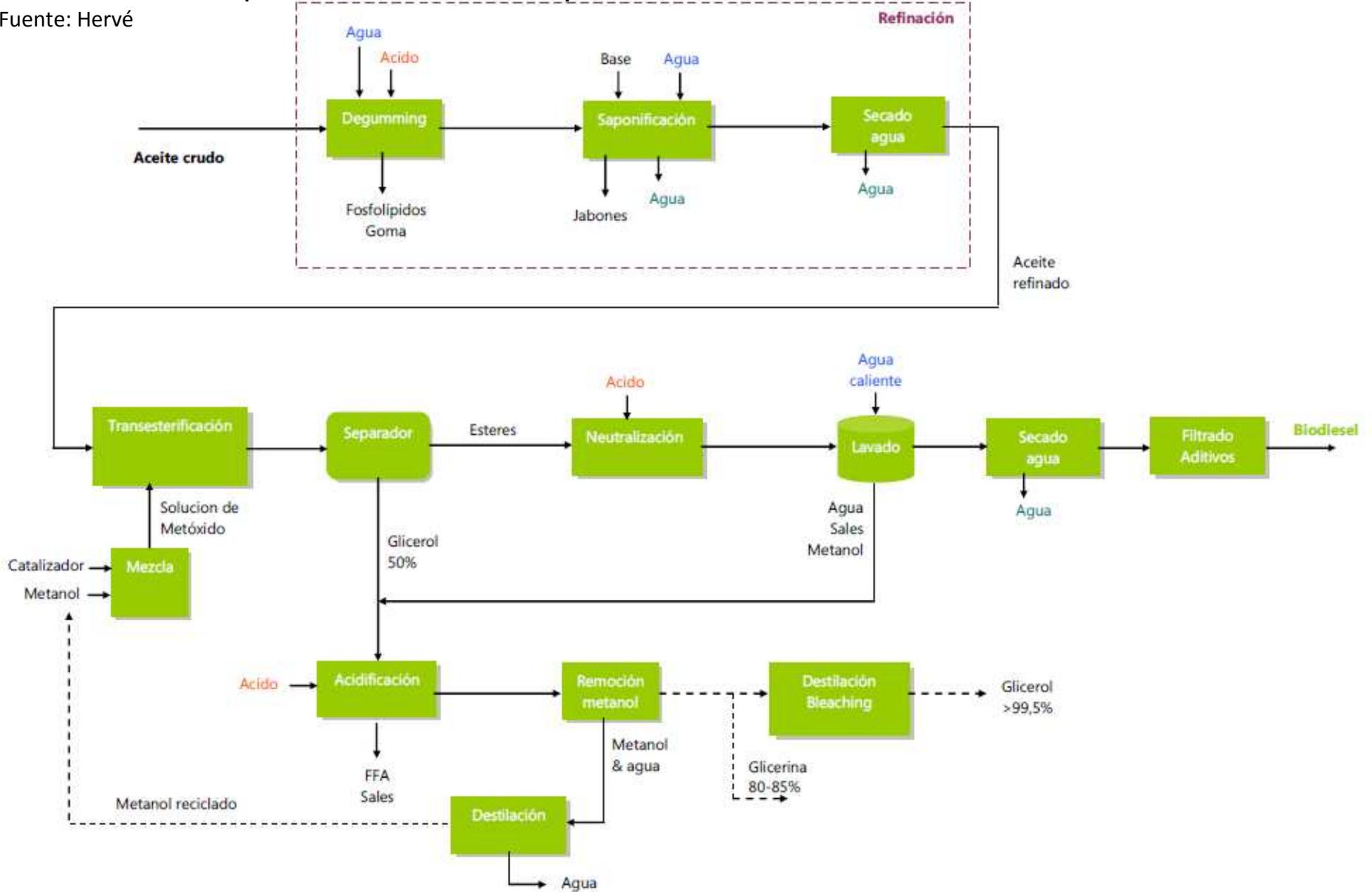
N° Flujo	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
Descripción Flujo	Ester calentado	Agua	Agua Caliente	Waste de lavador	Ester lavado	Agua de decantador	Ester de decantador	Ester calentado	Ester calentado	Vapor agua
Composición										
Aceite										
TG	2,992				2,992		2,992	2,992	2,992	
FFA										
Fosfatidos										
Otros	2,483				2,483		2,483	2,483	2,483	
Agua		62,235	62,235	56,011	6,223	5,912	0,311	0,311	0,311	0,311
Metanol	8,087			8,087						
Catalizador										
Goma										
Jabones	0,024			0,024						
Ácido fosforico										
Ácido clorhidrico										
NaOH										
Sales										
Glicerol										
Metil éster	297,589				297,589		297,589	297,589	297,589	
Total (ton/día)	311,174	62,235	62,235	64,122	309,287	5,912	303,375	303,375	303,375	0,311
Total (ton/hora)	12,966	2,593	2,593	2,672	12,887	0,246	12,641	12,641	12,641	0,013

N° Flujo	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Descripción Flujo	Ester caliente	Ester tibio	Ester Biodiesel	Glicerol	Ácido	Glicerol Neutralizado	Ácidos grasos libres	Glicerol	Soda Caustica	Glicerol de Reactor
Composición										
Aceite										
TG	2,992	2,992	2,992							
FFA						0,005	0,005			
Fosfatidos										
Otros	2,483	2,483	2,449							
Agua					21,866	21,866		21,866	1,269	21,926
Metanol				34,631		36,664		36,664		36,664
Catalizador				3,428						
Goma										
Jabones				0,006						
Ácido fosforico										
Ácido clorhidrico					2,430	0,121		0,121		
NaOH									0,133	
Sales						3,709		3,709		3,904
Glicerol				30,932		30,932		30,932		30,932
Metil éster	297,589	297,589	297,589							
Total (ton/día)	303,064	303,064	303,030	68,996	24,296	93,298	0,005	93,293	1,403	93,426
Total (ton/hora)	12,628	12,628	12,626	2,875	1,012	3,887	0,000	3,887	0,058	3,893

N° Flujo	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
Descripción Flujo	Glicerol de Estanque	Glicerol Calentado	Glicerol 100°C	Vapor saturado	Glicerol final caliente	Glicerol final	Metanol humedo	Metanol y Agua	Metanol vapor	Metanol liquido	Agua
Composición											
Aceite											
TG											
FFA											
Fosfatidos											
Otros											
Agua	21,926	21,926	21,926	82,552	21,926	21,926	82,552	138,563	0,184	0,044	138,519
Metanol	36,664	36,664	36,664		0,183	0,183	36,481	44,568	44,568	44,345	0,223
Catalizador											
Goma											
Jabones								0,024			0,024
Ácido fosforico											
Ácido clorhidrico											
NaOH											
Sales	3,904	3,904	3,904		3,904	3,904					
Glicerol	30,932	30,932	30,932		30,932	30,932					
Metil éster											
Total (ton/día)	93,426	93,426	93,426	82,552	56,945	56,945	119,033	183,155	44,752	44,389	138,766
Total (ton/hora)	3,893	3,893	3,893	3,440	2,373	2,373	4,960	7,631	1,865	1,850	5,782

8.3. Detalles del proceso de refinación y transesterificación.

Fuente: Hervé



8.4. Detalles de la inversión en implantación del cultivo

Los precios de los insumos del invernadero y del sombreadero considerados en el trabajo de Arancibia [et al.] fueron actualizados con cotizaciones a Tattersall. Se consideró un valor de la mano de obra de \$15.000 pesos por jornada. Esto corresponde a la estimación de Julio Haberland para mano de obra subcontratada en la ubicación del proyecto. En las tablas 27, 28, y 29 respectivamente, se presentan los resultados de la actualización para la construcción del invernadero y la germinación de las semillas allí, la construcción del sombreadero y el trasplante y maduración de las plantas, y finalmente la implantación definitiva de las plantas.

Tabla 27: Desglose insumos y mano de obra invernadero

Insumos Invernadero				
	Ítem	Cantidad	Unidad	Total
	Semillas	2,6	kg	83.096
	IVA 19%			15.788
	Gastos Envío			8.310
	Bandejas Almacigueras	100	unidad	54.000
	Sustrato	400	litros	48.000
	Previcur N SL, 250 CC	2	unidad	17.050
	Polietileno	21	m2	18.165
	Invernadero	1	unidad	85.004
Subtotal				329.413
Mano de Obra Invernadero				
	Ítem	Cantidad	jornadas	Total
	Construcción Invernadero	6		90.000
	Llenado de Bandejas	1		15.000
	Siembra de Bandejas	4		60.000
	Riego	6		90.000
	Aplicación Fungicida	2		30.000
Subtotal				285.000
Total Invernadero / Ha				614.413

Fuente: Adaptación de Arancibia [et al.]

Tabla 28: Desglose insumos y mano de obra sombreadero

Insumos Sombreado				
	Ítem	Cantidad	Unidad	Total
	Malla Russel	100	m2	860
	Bolsas plásticas	3000	unidad	36.000
	Sustrato	4000	litros	480.000
	Madera	10	unidad	12.900
Subtotal				529.760
Mano de Obra Sombreadero				
	Ítem	Cantidad	jornadas	Total
	Preparación sitio	1		15.000
	Preparacion bolsas	2		30.000
	Trasplante a bolsas	2		30.000
	Riego	4		60.000
Subtotal				135.000
Total Sombreado / ha				664.760

Fuente: Adaptación de Arancibia [et al.]

Tabla 30: Costos manejo y cosecha por hectárea, año 1

Labor	Epoca	Jornadas Hombre		Jornadas tractor		Insumos			
		cantidad	valor total	cantidad	valor total	tipo	cantidad	unidad	valor
Poda	julio	3	45.000	0,25	15.000	Podexal	3	litros	4.950
Aplicación herbicida	octubre	1	15.000	1,5	90.000	Rango 480 SL	2,5	litros	4.813
Aplicación Fertilizantes	octubre	0,5	7.500			Urea	47	kg	13.386
						Nitrato de Potasio:	16	kg	6.785
						Superfosfato Triple	76	kg	39.644
Riego	octubre-abril	10	150.000						
Total Por item		14,5	217.500	1,75	105.000				69.577
Subtotal	392.077								
Imprevistos (5%)	19.604								
Total (costo x ha)	411.680								

Fuente: Actualización propia de Arancibia [et al.]

Tabla 31: Costos manejo y cosecha por hectárea, año 2

Labor	Epoca	Jornadas Hombre		Jornadas tractor		Insumos			
		cantidad	valor total	cantidad	valor total	tipo	cantidad	unidad	valor
Poda	julio	3	45.000	0,25	15.000	Podexal	3	litros	4.950
Aplicación herbicida	octubre	1	15.000	1,5	90.000	Rango 480 SL	2,5	litros	4.813
Aplicación Fertilizantes	octubre	0,5	7.500			Urea	68	kg	19.664
						Nitrato de Potasio:	25	kg	10.661
						Superfosfato Triple	111	kg	58.300
Riego	octubre-abril	10	150.000						
Total Por item		14,5	217.500	1,75	105.000				98.388
Subtotal	420.888								
Imprevistos (5%)	21.044								
Total	441.932								

Fuente: Actualización propia de Arancibia [et al.]

Tabla 32: Costos manejo y cosecha por hectárea, año 3

Labor	Epoca	Jornadas Hombre		Jornadas tractor		Insumos			
		cantidad	valor total	cantidad	valor total	tipo	cantidad	unidad	valor
Poda	julio	3	45.000	0,25	15.000	Podexal	3	litros	4.950
Aplicación herbicida	octubre	1	15.000	1,5	90.000	Rango 480 SL	2,5	litros	4.813
Aplicación Fertilizantes	octubre	0,5	7.500			Urea	140	kg	40.157
						Nitrato de Potasio:	48	kg	20.354
						Superfosfato Triple	224	kg	117.766
Riego	octubre-abril	10	150.000						
Total Por item		14,5	217.500	1,75	105.000				188.039
Subtotal	510.539								
Imprevistos (5%)	25.527								
Total	536.066								

Fuente: Actualización propia de Arancibia [et al.]

Tabla 33: Costos manejo y cosecha por hectárea, año 4 en adelante

Labor	Epoca	Jornadas Hombre		Jornadas tractor		Insumos			
		cantidad	valor total	cantidad	valor total	tipo	cantidad	unidad	valor
Poda	julio	3	45.000	0,25	15.000	Podexal	3	litros	4.950
Aplicación herbicida	octubre	1	15.000	1,5	90.000	Rango 480 SL	2,5	litros	4.813
Aplicación Fertilizantes	octubre	0,5	7.500			Urea	208	kg	59.821
						Nitrato de Potasio:	73	kg	31.015
						Superfosfato Triple	336	kg	176.066
Riego	octubre-abril	10	150.000						
Cosecha mecanizada	enero-febrero	1	15.000			Diesel	7,5	lt	4.158
Total Por item		15,5	232.500	1,75	105.000				280.823
Subtotal	618.323								
Imprevistos (5%)	30.916								
Total	649.239								

Fuente: Actualización propia de Arancibia [et al.]

8.6. Actualización de la inversión inicial en la planta de biodiesel

La actualización del monto de la inversión se realiza utilizando el índice de costo de planta publicado por la revista Chemical Engineering. El valor de este índice en 2007 que sería aplicable a la fecha del diseño conceptual de la planta de Hervé es 525,4. A junio del 2009, el valor del índice cayó a 508,9, reflejando una menor demanda por los insumos, equipamiento, servicios de construcción e ingeniería durante el año 2009. Luego, se reducen los montos calculados por Hervé en 3,24%. El costo del terreno fue sustituido para reflejar el costo estimado de suelo en la ubicación de la planta considerada en el presente trabajo.

Tabla 34: Detalle actualización inversión inicial

	Original (2007)	Actualizado (2009)	
1. Desarrollo Preliminar			
Compra terreno (2ha)	9.000.000	9.000.000	CLP
Permisos y licencias básicas	150.000	145.147	USD
Subtotal	166.364	160.981	USD
2. Obras civiles	1.847.778	1.787.991	USD
3. Equipamiento	8.845.298	8.559.097	USD
Subtotal 1 + 2 + 3	10.859.440	10.508.068	USD
Adicionales			
Otros e imprevistos	1.628.916	1.576.210	USD
Gestión construcción	542.972	525.403	USD
Ingeniería y diseño	1.085.944	1.050.807	USD
Puesta en marcha planta	542.972	525.403	USD
Subtotal adicionales	3.800.804	3.677.824	USD
Costo total planta	14.660.244	14.185.892	USD

Fuente: Elaboración propia a partir de Hervé e índices de CHEMICAL ENGINEERING

8.7. Detalle de costos fijos de personal

Se acoge el plan de recursos humanos ideado por Schoennenbeck [et al.] en un plan de negocios que considera la comercialización del biodiesel, lo que es omitido por Hervé. Aquí se reproduce el detalle de ese plan.

Tabla 35: Listado de personal

Unidad	Cargo	Sueldo Bruto Mensual	Cantidad	Total
Gerencia General	Gerente	2.800.000	1	2.800.000
	Secretaria	700.000	1	700.000
Gerencia Finanzas y Ventas	Gerente	1.800.000	1	1.800.000
	Secretaria	550.000	2	1.100.000
	Subgerente Ventas	1.300.000	1	1.300.000
	Atención al Cliente	800.000	1	800.000
	Ayudante atención al Cliente	500.000	1	500.000
	Logística y Planificación	100.000	1	100.000
	Ayudante L&P	500.000	1	500.000
	Ventas	1.000.000	1	1.000.000
	Ayudante Ventas	600.000	3	1.800.000
	Jefe Adquisiciones	800.000	1	800.000
	Cotizaciones	500.000	1	500.000
	Subgerente Ventas	1.300.000	1	1.300.000
	Encargado Tesorería	600.000	1	600.000
	Encargado Presupuesto y Cost.	600.000	1	600.000
Gerencia Operaciones	Gerente	1.800.000	1	1.800.000
	Secretaria	550.000	2	1.100.000
	Jefe Ingeniería	1.000.000	1	1.000.000
	Encargado Proyectos	800.000	2	1.600.000
	Jefe Mantenición	800.000	1	800.000
	Jefe Control de Calidad	800.000	1	800.000
	Encargado Laboratorio	600.000	2	1.200.000
	Jefe de Planta	1.400.000	1	1.400.000
	Ingeniero de Procesos	900.000	1	900.000
	Ingeniero Prevención	700.000	1	700.000
	Jefe de Turno	800.000	4	3.200.000
	Operario	350.000	16	5.600.000
Gerencia RRHH	Gerente	1.800.000	1	1.800.000
	Secretaria	550.000	1	550.000
	Jefe Selección Personal	800.000	1	800.000
	Entrevistador	500.000	1	500.000
	Supervisor Servicios Externos	800.000	1	800.000
	Supervisor Planeación RRHH	800.000	1	800.000
		Total Mensual		\$ 41.550.000
		Aualizado en USD		\$ 906.545

Fuente: SCHOENNENBECK [et al.]