

BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE. II. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

BIOFUELS IN CHILE. II. ECONOMICAL EVALUATION OF BIOFUELS ELABORATION

Roberto E. Muñoz-Lagos*, Rodrigo A. Ortega-Blu, Luis G. Acosta-Espejo, Rodrigo A. González-Platteau

Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María. Avenida Santa María 6400, Vitacura, Santiago-Chile. Código Postal 7660251. (roberto.munoz@usm.cl).

RESUMEN

Para determinar si la producción de biocombustibles en Chile es económicamente factible se realizó una evaluación a nivel de productor agrícola y de planta productora, considerando cinco especies cultivadas en distintos sistemas productivos. El análisis de los resultados mostró que la rentabilidad agrícola varió entre -43.2% y 30.4% , esto es, algunas opciones serían no sostenibles. En planta, la producción de etanol y biodiésel fue rentable al usar maíz (*Zea mays* L.) y raps (*Brassica napus* L.) como insumo. Sin embargo, sólo la producción doméstica de biodiésel a base de raps pudo abastecer un 2% de sustitución de combustibles fósiles por biocombustibles. Finalmente, en junio 2008, el precio del petróleo WTI que justificaría la producción de etanol y biodiésel sería US\$144.6 barril⁻¹ y US\$184.6 barril⁻¹.

Palabras clave: etanol, biodiésel, *Zea mays* L., *Brassica napus* L.

ABSTRACT

In order to determine whether the production of biofuels in Chile is economically feasible, an evaluation at farmer and plant production level was carried out, considering five species grown in different productive systems. Analysis of results showed that agricultural profitability ranged between -43.2% and 30.4% , that is, some options would be unsustainable. In plant, the ethanol and biodiesel production was profitable by using corn (*Zea mays* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) as an input. However, only the domestic production of rapeseed-based biodiesel could provide a 2% substitution of fossil fuels by biofuels. Finally, by June 2008, WTI oil prices required to justify the production of ethanol and biodiesel would be US\$144.6 barrel⁻¹ and US\$184.6 barrel⁻¹.

Key words: ethanol, biodiesel, *Zea mays* L., *Brassica napus* L.

INTRODUCCIÓN

La alta volatilidad en los precios del petróleo ha generado inestabilidad en el crecimiento económico de muchos países, tanto exportadores como importadores de crudo (FAO, 2008). Esto ha llevado a varios países importadores a considerar alternativas energéticas, para desconcentrar su matriz y para evaluar sus posibilidades de independencia energética. Quizás la alternativa más estudiada ha sido la de los biocombustibles.

Chile tiene una agricultura altamente tecnificada, con producciones de elevados rendimientos, un clima favorable y una amplia diversidad de instrumentos de fomento del Estado, lo que genera un escenario

INTRODUCTION

The high volatility in oil prices has created unstability in the economic growth of many countries, both, crude oil exporters and importers (FAO, 2008). This has led to several importing countries to consider energy alternatives, to decentralize their energy matrix and to assess their potential for energy independence. Perhaps the most studied alternative has been that of biofuels.

Chile has high-tech agriculture with production of high yields, favorable climate, and a wide diversity of promotion instruments of the state, which creates a favorable scenario to develop a biofuel industry based on agricultural crops. However, there are significant limitations, such as the shortage of land and the absence of a regulatory framework, which together with the ongoing threat of importation of these energy fuels, would impact the interest of potential

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: Junio, 2009. Aprobado: Septiembre, 2010.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 849-859. 2010.

favorable para desarrollar una industria de biocombustibles con base a cultivos agrícolas. Sin embargo, hay importantes limitaciones, como la escasez de suelos y la ausencia de un marco regulatorio, lo que junto a la permanente amenaza de importación de estos energéticos impactaría el interés de potenciales productores por ingresar al mercado (ODEPA, 2007).

Tiffany y Eidman (2003) y Van Gerpen *et al.* (2005) coinciden en que los granos constituyen el componente más importante del costo de producción de biocombustibles y, en consecuencia, determinan en gran medida el precio final. Sin embargo, sus resultados no son directamente extrapolables al caso chileno, principalmente por las marcadas diferencias en las políticas del sector, así como la disponibilidad y el precio de otros insumos. Una evaluación específica para cada país es indispensable.

El presente artículo corresponde a la parte II de un estudio desarrollado para evaluar el potencial de producción de biocombustibles en Chile. El objetivo central en esta parte fue evaluar la factibilidad económica de producir etanol o biodiésel con base a distintos cultivos extensivos. Los resultados se complementan con un análisis de sensibilidad en función de las variables que resultaron determinantes, así como una discusión de escenarios esperado, pesimista y optimista.

MATERIALES Y MÉTODOS

El arroz (*Oryza sativa*), maíz (*Zea mays*) y trigo (*Triticum aestivum*) se consideraron como insumos para el etanol, mientras que el raps (*Brassica napus*) y la maravilla (*Helianthus annuus*) para el biodiésel. Además se consideraron los sistemas productivos identificados por Ortega *et al.* (2010). Se usó el precio real promedio de los granos durante 10 temporadas (1997 a 2006) reportados por ODEPA (2006). Los precios no incluyen impuesto al valor agregado (IVA) y están en moneda de septiembre de 2006. Además, se consideró la tasa de cambio vigente a septiembre 2006 (CH\$531=USD). En general se consideró la ley de un solo precio que establece que en una economía abierta el precio interno refleja el costo marginal de producción nacional y el precio CIF (Cost, Insurance and Freight) al cual se puede adquirir el bien en el mercado internacional, más los costos de internación y aranceles. En el Cuadro 1 se presenta los precios usados en la evaluación para arroz, maíz, trigo, maravilla y raps.

Para determinar el potencial productivo de los granos se calculó su rendimiento en campo, con base a información

producers by entering the market (ODEPA, 2007).

Tiffany and Eidman (2003) and Van Gerpen *et al.* (2005) agree that the grains are the most important component of the cost of biofuel production and, therefore, largely determine the final price. However, their results can not be directly extrapolated to the Chilean case, mainly by the marked differences in the sector policies, as well as the availability and the price of other inputs. A specific evaluation for each country is essential.

This report is Part II of a study conducted to evaluate the potential of biofuel production in Chile. The main objective in this part was to evaluate the economic feasibility to produce ethanol or biodiesel based on different extensive crops. Results are complemented with a sensitivity analysis, based on the variables that proved to be determinant, as well as a discussion of expected, pessimistic and optimistic scenarios.

MATERIALS AND METHODS

Rice (*Oryza sativa*), corn (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum*) were considered as inputs for ethanol, while rapeseed (*Brassica napus*) and sunflower (*Helianthus annuus*) for biodiesel. The production systems identified by Ortega *et al.* (2010) were also considered. The average real price of grains for 10 seasons (1997 to 2006) reported by ODEPA (2006) was used. Prices do not include the added value tax (AVT) and they are in currency of September 2006. It was also considered the September 2006 exchange rate (CH\$531=USD). In general, the 'law of one price' was considered, which states that in an open economy the domestic price reflects the marginal cost of domestic production and CIF (Cost, Insurance, and Freight) price for the commodity in the international market, plus the costs of admission and tariffs. The prices used in the evaluation for rice, corn, wheat, sunflower, and rapeseed are shown in Table 1.

To determine the production potential of grains their yield was calculated at field level based on information provided by ODEPA (2006). Conservative values were considered for the conversion factors (m³ of biofuels per t of grain) given by: rice (0.37), corn (0.40), wheat (0.37), rapeseed (0.46) and sunflower (0.42).

Three scenarios were evaluated to replace the domestic demand projected to 2010 by the National Commission of Energy (CNE, 2008), which are shown in Table 2.

To evaluate the potential for energy independence the domestic consumption of each grain was obtained, adding imports and the national production in 2006. This result

Cuadro 1. Precio promedio de los granos entre 1997 y 2006, a valor real, sin IVA, en moneda de septiembre del 2006.
Table 1. Average price of grains between 1997 and 2006, real value, without AVT, currency for September 2006.

Variable (en US\$ kg ⁻¹)	Arroz	Maíz	Trigo	Maravilla	Raps
Precio	0.197	0.168	0.223	0.283	0.274
Desviación estándar	0.022	0.016	0.014	0.021	0.055

proporcionada por ODEPA (2006). Se consideraron valores conservadores para los factores de conversión (m³ de biocombustible por t de grano) dados por: arroz (0.37), maíz (0.40), trigo (0.37), raps (0.46) y maravilla (0.42).

Se evaluaron tres escenarios de sustitución de la demanda nacional proyectada al 2010 por la por la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2008), los que se presentan en el Cuadro 2.

Para evaluar las posibilidades de independencia energética se obtuvo el consumo nacional de cada grano, sumando las importaciones y la producción nacional al 2006. Ésta se tradujo en superficie dividiendo el consumo por el rendimiento actual publicado por ODEPA (2006). Los resultados se contrastaron con la superficie máxima disponible para cada cultivo, la cual se calculó con información histórica de cultivos factibles en distintas zonas agroecológicas de Chile. La información base se encontraba a nivel de comuna, la que fue agregada para obtener un total nacional.

Para la tecnología de producción de biocombustibles, se seleccionó la molienda seca de grano como método para la elaboración de etanol y la transesterificación del aceite con catalizador alcalino para la producción de biodiésel.

Para definir los tamaños de planta se decidió equilibrar los beneficios de las economías de escala con las ventajas logísticas de plantas de menor tamaño, lo que implicó dos tipos de planta de tamaño mediano para cada biocombustible (Cuadro 3). Se usaron los costos de instalación de una planta de etanol propuesta por Tiffany y Eidman (2003) y el de una planta de biodiésel propuesta por Van Gerpen *et al.* (2005); los costos fueron corregidos de acuerdo al Índice CEPCI (Chemical Engineering Plant Cost Index), en el período correspondiente. Además, se sumó un 20 % por la instalación y entrenamiento de personal en Chile. Para el biodiésel se sumó el costo de

was transformed in an area dividing the consumption by the current yield as published by ODEPA (2006). The results were compared with the maximum area available for each crop, which was calculated using historical information on feasible crop in different agro-ecological zones of Chile. The source information was available at municipality level, which was added to obtain a national total.

Regarding the technology for biofuel production, dry milling was selected as the method for ethanol elaboration, while oil transesterification with alkaline catalyzer was chosen for biodiesel.

To define the plant size, it was decided to balance the benefits from economies of scale with the logistical advantages of smaller plants, which generated two types of medium-size plants for each biofuel (Table 3). The installation costs for an ethanol plant proposed by Tiffany and Eidman (2003), and for a biodiesel plant proposed by Van Gerpen *et al.* (2005), were used; costs were corrected according to the CEPCI Index (Chemical Engineering Plant Cost Index), in the corresponding period. In addition, a 20 % was added by installation and personnel training in Chile. In the case of biodiesel the investment cost required to produce vegetable oil from grains was added, as reported by Searle (2005); also it was corrected by the CEPCI Index and an additional 20 % due to the installation in Chile. The information of investment for each capacity under consideration is summarized in Table 3.

To determine the costs of the plant operation the technical assumptions established by Ortega *et al.* (2010) were adopted and besides:

- 1) The cost of oil production was calculated at US\$ 0.1104 L⁻¹ (Ferchau, 2000).

Cuadro 2. Demanda de gasolina y diésel proyectada al 2010 y escenarios de sustitución.
Table 2. Gasoline and diesel demand projected by 2010 and replacement scenarios.

Combustible	Demanda al 2010 (miles m ³)	Escenario de sustitución (miles m ³)		
		2 %	5 %	10 %
Gasolina	3232	65	162	323
Diésel	4832	97	242	483

inversión requerido para producir aceite vegetal usando granos, como lo reporta Searle (2005); además se corrigió por el índice CEPCI y un 20 % adicional debido a la instalación en Chile. En el Cuadro 3 se resume la información de inversión para cada capacidad considerada.

Para determinar los costos de operación de las plantas se adoptaron los supuestos técnicos establecidos por Ortega *et al.* (2010) y además:

- 1) El costo de producción de aceite calculado fue US\$ 0.1104 L⁻¹ (Ferchau, 2000).
- 2) El costo unitario de la mano de obra se calculó en función del margen por sobre el salario mínimo pagado a un trabajador en una planta de EE.UU. (Tiffany y Eidman, 2003). Se aplicó el mismo margen al salario mínimo en Chile.
- 3) El precio de la electricidad fue US\$ 0.054 kWh⁻¹, de acuerdo con lo reportado por la CNE (2008) como Precio Medio de Mercado (PMM) del Sistema Interconectado Central (SIC).
- 4) El precio del gas natural fue US\$ 10.4931 (MM BTU)⁻¹ para plantas de etanol y US\$11.9217 (MM BTU)⁻¹ para plantas de biodiésel^[1], según lo reportado por la empresa Metrogas S. A. La diferencia se debe a descuentos por volumen.
- 5) Los precios de los insumos químicos fueron: US\$ 0.159 kg⁻¹ para el ácido clorhídrico; US\$ 0.159 kg⁻¹ para el hidróxido de sodio; y US\$ 0.311 L⁻¹ para el metanol; según cotizaciones a empresas químicas proveedoras de insumos.
- 6) El costo calculado de tratamiento de RILES (Residuos Industriales Líquidos) para una planta de etanol fue US\$ 0.002 L⁻¹ (Shapouri y Gallagher, 2003), y el doble para una planta de biodiésel; considerando los requerimientos de purificación por la generación de glicerina y jabones (Van Gerpen *et al.*, 2005).
- 7) El costo de acopio de grano calculado para un mes fue 1 % del precio del grano (COTRISA, 2006).
- 8) El precio del grano usualmente incluye el costo de despacho por los primeros 50 km recorridos y la planta enfrentaría sobreprecio por distancias mayores. En promedio, se paga sobreprecio para la mitad de los granos por 25 km, lo que corresponde a US\$ 0.003 kg⁻¹.
- 9) La producción de etanol genera dos subproductos: DDGS (distiller's dried grains with solubles; granos secos de destilería con solubles) usado para alimentación animal, y CO₂ que se usa en bebidas gaseosas. El precio para el DDGS fue US\$ 116 t⁻¹ y del CO₂ US\$ 168 t⁻¹ (ODEPA, 2006).

Cuadro 3. Capacidad instalada y montos de inversión para plantas productoras de biocombustibles.

Table 3. Installed capacity and required investments for biofuel production plants.

Biocombustible	Capacidad (m ³ año ⁻¹)	Inversión (MM US\$)
Etanol	80 000	54.2
	100 000	67.2
Biodiésel	40 000	17.9
	60 000	24.3

- 2) The unit cost of labor was calculated based on the margin above the minimum wage paid to a worker at a U. S. plant. (Tiffany and Eidman, 2003). The same margin to the minimum wage in Chile was applied.
- 3) The electricity price was US\$ 0.054 kWh⁻¹, in accordance with those reported by the CNE (2008) as the Average Market Price (PMM) of the Central Interconnected System (SIC).
- 4) The natural gas price was US\$ 10.4931 (MM BTU)⁻¹ for ethanol plants and US\$ 11.9217 (MM BTU)⁻¹ for biodiesel plants^[1], as reported by the Metrogas S. A. Company. The difference is due to discounts by volume.
- 5) The prices of chemical products were: US\$ 0.159 kg⁻¹ for hydrochloric acid; US\$ 0.159 kg⁻¹ for sodium hydroxide; and US\$ 0.311 L⁻¹ for methanol; according to price lists of chemical companies that provide inputs.
- 6) The estimated cost for RILES (Industrial Liquid Residuals) treatment of an ethanol plant was US\$ 0.002 L⁻¹ (Shapouri and Gallagher, 2003), and double for a biodiesel plant; considering the requirements for purification due to generation of glycerin and soaps (Van Gerpen *et al.*, 2005).
- 7) The monthly cost of storing grain was estimated at 1 % of the grain prices (COTRISA, 2006).
- 8) The grain price usually includes the shipping cost for the first 50 km driven and the plant would face extra charge for longer distances. On average, extra charges are paid for half of the grains for 25 km, which corresponds to US\$ 0.003 kg⁻¹.
- 9) The ethanol production generates two byproducts: DDGS (distiller's dried grains with solubles) used for animal feed, and CO₂ that can be used in carbonated soft drinks. The price for the DDGS was US\$ 116 t⁻¹ and for CO₂ US\$ 168 t⁻¹ (ODEPA, 2006). The conversion factors were taken from Ortega *et al.* (2010).

¹ Esto implica un cobro de aproximadamente US\$ 10 por millón de BTU (British Thermal Units). Para convertir a volumen se considera que un pie cúbico de gas natural genera en promedio 1000 BTU ♦ This implies a charge of approximately US\$ 10 per million of BTU (British Thermal Units). To convert a volume it is considered that a cubic foot of natural gas generates an average of 1000 BTU.

Los factores de conversión fueron tomados de Ortega *et al.* (2010).

- 10) La producción de biodiésel genera dos subproductos: tortas para alimentación animal y glicerina usada en la industria cosmética. El precio para la torta de raps y de maravilla fue US\$ 154 t⁻¹ y US\$ 147 t⁻¹ (valores basados en su contenido proteínico). El precio de la glicerina fue US\$ 50 t⁻¹, considerando el precio de mercado US\$ 100 t⁻¹, según Johnson y Taconi (2007) y que un escenario de producción de biocombustible generaría un fuerte aumento en la oferta. Los factores de conversión fueron tomados de Ortega *et al.* (2010).
- 11) El precio de otros ítems menores fue tomado de Tiffany y Eidman (2003) y Van Gerpen *et al.* (2005).

El horizonte de vida útil de los activos se fijó en 15 años; sin embargo, las evaluaciones se realizaron a 10 años. El cálculo del valor actual neto (VAN) consideró una depreciación normal y que al final del plazo la planta se liquida al valor de libros. El precio de cada biocombustible se calculó para obtener una tasa interna de retorno (TIR) para el proyecto puro a nivel de planta del 12 %. Se consideró el impuesto general vigente en Chile de 17 %.

Se realizaron análisis de sensibilidad considerando plantas de etanol de 100 000 m³ a base de maíz y plantas de biodiésel de 60 000 m³ a base de raps, para determinar el efecto de cambios en los precios de los principales insumos, cambios en montos de inversión asociados a distintos factores de extracción y reemplazo de gas natural por propano.

En función del precio de los granos se seleccionó un escenario optimista para la planta y uno pesimista, obteniendo precios de etanol y biodiésel a salida de planta. Luego se calcularon los precios equivalentes respectivos combustible fósil y crudo WTI (West Texas Intermediate).

El precio combustible fósil equivalente (PCFE), correspondiente a gasolina para el etanol y diésel para el biodiésel, se calculó dividiendo el precio del biocombustible a salida de planta por un factor de contenido energético de 0.67 para etanol y 0.90 para biodiésel, según lo sugiere ENAP (2007).

El precio crudo WTI equivalente (PCE) se calculó de la correlación histórica entre los precios de los combustibles fósiles y el del crudo, llevados ambos a m³ con base en información de ENAP (2007) y la EIA (2007). El multiplicador fue 0.74 para el etanol y 0.72 para el biodiésel.

El PCFE al consumidor se calculó así: PCFE + MD + CT + IVA + IE; donde MD es el margen de distribución que es US\$ 0.096 L⁻¹; CT son los costos de transporte de US\$ 0.013 L⁻¹; el IVA es el impuesto al valor agregado; e IE es el impuesto específico igual a US\$ 363.91 m³ para gasolina y US\$ 90.977 m³ para el diésel (ENAP, 2007).

10) Biodiesel production generates two byproducts: cakes for animal feed and glycerin used in the cosmetics industry. The price of rapeseed and sunflower cakes was US\$ 154 t⁻¹ and US\$ 147 t⁻¹ (values based on protein content). The price of glycerin was US\$ 50 t⁻¹, considering the market price US\$ 100 t⁻¹, according to Johnson and Taconi (2007) and the fact that a biofuel production scenario would generate a strong increase in supply. The conversion factors were taken from Ortega *et al.* (2010).

11) The price of other minor items was taken from Tiffany and Eidman (2003) and Van Gerpen *et al.* (2005).

The life of the assets was set at 15 years; however, the evaluations were made at 10 years. The calculation of net present value (NPV) considered a normal depreciation and at the end of the period the plant was liquidated at book value. The price of each biofuel was calculated to obtain an internal rate of return (IRR) for the unlevered project at a plant level, of 12 %. The general tax of 17 % in effect in Chile was considered.

Sensitivity analyses were carried out considering ethanol plants of 100 000 m³ based on corn and biodiesel plants of 60 000 m³ based on rapeseed, to determine the effect of changes in prices of major inputs, changes in amounts of investment associated to different factors of extraction and replacement of natural gas by propane.

Depending on the price of grain, optimistic and pessimistic scenarios were selected for the plant, obtaining prices for ethanol and biodiesel at plant gate. Then the price equivalent of the respective fossil fuel and West Texas Intermediate Crude Oil (WTI) were calculated.

The fossil-fuel equivalent price (PCFE), corresponding to gasoline for ethanol and diesel for biodiesel, was calculated dividing the biofuel price at plant gate by a factor of energy content of 0.67 for ethanol and 0.90 for biodiesel, as suggested by ENAP (2007).

The price of WTI crude oil equivalent (PCE) was calculated from the historical correlation between prices of fossil fuels and prices of crude oil, taken both to m³ based on information of ENAP (2007) and EIA (2007). The multiplier was 0.74 for ethanol and 0.72 for biodiesel.

The PCFE for consumer was calculated as follows: PCFE + MD + CT + AVT + IE; where MD is the distribution margin which is US\$ 0.096 L⁻¹; CT are the costs of transportation costs US\$ 0.013 L⁻¹; AVT is the added value tax; and IE is the specific tax equal to US\$ 363.91 m³ for gasoline and US\$ 90.977 m³ for diesel (ENAP, 2007).

The economic analysis was performed in Excel 2003 through automated sheets. The software STATA 8.2 was also used to estimate elasticity of domestic supply of each grain.

El análisis económico se realizó en Excel 2003 a través de planillas automatizadas. Además se usó STATA 8.2 para estimar elasticidades de oferta nacional de cada grano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El trigo cultivado con riego (TVC-R VII) en la VII Región presentó la más alta rentabilidad anual por hectárea con un retorno de 30.4 %; le siguieron el maíz de la VI Región (M1 VI) y el arroz de la VIII Región (AR3 VIII). El raps cultivado en cero labranza (RPCL-IX) en la precordillera de la IX Región presentó una baja tasa de retorno (Cuadro 4). La rentabilidad fue negativa en todos los escenarios evaluados para la maravilla cultivada en la VII Región (G2 VIII). Al final del Cuadro 4 se presenta el precio que deberían alcanzar los granos para obtener una rentabilidad a nivel de productor igual al 12 % (precio límite).

En el Cuadro 5 se muestra que la opción económicamente más favorable de biocombustible

RESULTS AND DISCUSSION

Wheat grown under irrigation (TVC-R VII) in Region VII showed the highest annual return per hectare with 30.4 %, followed by corn in the Region VI (M1 VI) and rice of Region VIII (AR3 VIII). The rapeseed grown under non-till (RPCL-IX) in the Andean foothills of the Region IX showed a low rate of return (Table 4). Profitability was negative in all scenarios evaluated for sunflower cultivated in the Region VII (G2 VII). At the end of Table 4, the price (limit) that grains should have to obtain a profitability level equal to 12 % at the producer's level is shown.

The most economically favorable option of biofuels correspond to corn-based ethanol, as shown in Table 5; however, a strong dependence on imports would be generated as domestic production of grain could not meet the domestic demand (Table 6). Therefore, if the objective is to achieve some level of energy independence the

Cuadro 4. Antecedentes económicos básicos de los sistemas productivos más rentables para la producción de los cultivos seleccionados.[†]

Table 4. Basic economic background of the most profitable production systems for the production of selected crops.

Item	TVC-R VII	M1-VI	AR3-VIII	RPCL-IX	G2-VII
Rendimiento ($t\ ha^{-1}$)	8.0	12.0	7.0	3.5	2.5
Costo total ($US\$\ ha^{-1}$)	1367.7	1654.4	1205.3	927.6	1245.1
Ingreso bruto ($US\$\ ha^{-1}$)	1784.0	2016.0	1379.0	959.0	707.5
Margen bruto ($US\$\ ha^{-1}$)	416.3	361.6	173.7	31.4	-537.6
Rentabilidad (%)	30.4	21.9	14.4	3.40	-43.2
Precio límite ($US\$\ kg^{-1}$)	0.188	0.154	0.192	0.300	0.612

[†] Arroz, maíz y trigo para etanol; maravilla y raps para biodiésel ♦ Rice, corn, and wheat for ethanol; sunflower and rapeseed for biodiesel.

Cuadro 5. Precio de los biocombustibles de acuerdo a la capacidad de la planta y el tipo de grano utilizado como materia prima (rentabilidad exigida 12 %).

Table 5. Price of biofuels according to the capacity of the plant and the type of grain used as raw material (12 % required return).

Capacidad de la planta ($m^3\ año^{-1}$)	Precio ($US\$\ L^{-1}$) [†]		
	Arroz	Maíz	Trigo
80 000 o 100 000 (etanol)	0.761	0.662	0.832
	Raps	Maravilla	
40 000 (biodiésel)	0.733	0.813	
60 000 (biodiésel)	0.722	0.803	

[†] Precios netos a salida de planta sin IVA ni IE ♦ Net prices at plant gate without AVT or IE.

corresponde al etanol a base de maíz; sin embargo, se generaría una fuerte dependencia de las importaciones dado que la producción nacional del grano no podría abastecer la demanda interna (Cuadro 6). Por ello, si el objetivo es lograr algún nivel de independencia energética resulta más atractiva la producción de biodiésel usando raps (Cuadros 5 y 6).

En la evaluación base se determinó que la producción máxima de etanol, dada la superficie disponible actual, con plantas que permiten múltiples insumos (maíz, trigo y arroz) es de 124 351 m³ (Cuadro 6, suma de esos granos en la última hilera). Este volumen sólo permitiría abastecer el escenario de 2 % de sustitución de gasolina proyectada al 2010 (65 000 m³). Una demanda superior desplazaría los usos actuales del grano y obligaría a incrementar las importaciones. Análogamente, para biodiésel, la capacidad de producción nacional se calculó en 423 521 m³ (Cuadro 6, suma para maravilla y raps en la última hilera), obtenida principalmente con raps. Este volumen permitiría cubrir holgadamente la demanda en escenarios de 2 y 5 % de sustitución del diésel establecidas en el Cuadro 2.

Para evaluar el objetivo de independencia energética se simuló un escenario de economía cerrada, donde el consumo nacional debía ser íntegramente abastecido por producción nacional. En este caso no es posible la producción de biocombustibles sin afectar los otros usos de los granos, lo que se refleja en el Cuadro 6 mediante las cifras negativas de balance. Sólo la producción de biodiésel usando raps podría abastecer la demanda generada en el escenario de 2 % de sustitución y en buena medida el de 5 %. Esto se debe a que actualmente sólo se cultiva alrededor del 5 % de la superficie máxima disponible para este cultivo.

Como se muestra en la Figura 1, tanto los ingresos como los costos de producción de biocombustibles

production of biodiesel using rapeseed is more attractive (Tables 5 and 6).

In the benchmark evaluation it was determined that the maximum production of ethanol, given the current available space, with plants that allow for multiple inputs (corn, wheat and rice) is 124 351 m³ (Table 6, addition of those grains in the last row). This volume would only supply the scenario of 2 % substitution of gasoline projected to 2010 (65 000 m³). A higher demand would displace the actual uses of the grain and would force to increase imports. Similarly, for biodiesel, the capacity of domestic production was estimated in 423 521 m³ (Table 6, addition of sunflower and rapeseed on the last row), obtained mainly with rapeseed. This volume would comfortably cover the demand in scenarios of 2 and 5 % replacement of diesel established in Table 2.

To evaluate the objective of energy independence, a scenario of closed economy was simulated, where the domestic consumption should be fully supplied by domestic production. In this case it is not possible to produce biofuels without affecting other uses of grains, which is reflected in Table 6 by the negative figures of balance. Only the production of biodiesel using rapeseeds could supply the demand generated on the scenario of 2 % substitution and largely the 5 %. This is because currently only about 5 % of the maximum area available for this crop is cultivated.

As shown in Figure 1, both income and production costs of biofuels are highly concentrated. In Figure 2 a sensitivity analysis of biofuel price at plant gate is reported with respect to increases in the price of the main factors of production. While the direct effect of the investment was not significant, higher levels of investment could be associated to higher conversion factors. The joint impact of these variables in feasible scenarios is shown in Tables 7 and 8.

Cuadro 6. Balance de superficie para etanol y biodiésel al 2010 en un escenario de un 2 % de sustitución.

Table 6. Balance of area for ethanol and biodiesel by 2010 in a scenario of a 2 % substitution.

Ítem	Maíz	Trigo	Arroz	Maravilla	Raps
Superficie requerida para consumo actual (ha)	279 436	527 654	45 882	35 090	77 770
Superficie requerida para biocombustible (ha)	14 535	39 389	30 659	115 626	60 197
Superficie apta (ha)	150 000	315 000	29 500	90 000	235 000
Balance(ha)	-143 971	-252 043	-47 041	-60 716	97 033
Producción de referencia de biocombustible [†] (m ³)	67 393	50 661	6297	72 982	350 539

[†] Producción factible con superficie disponible actual ❖ Production feasible with current available area.

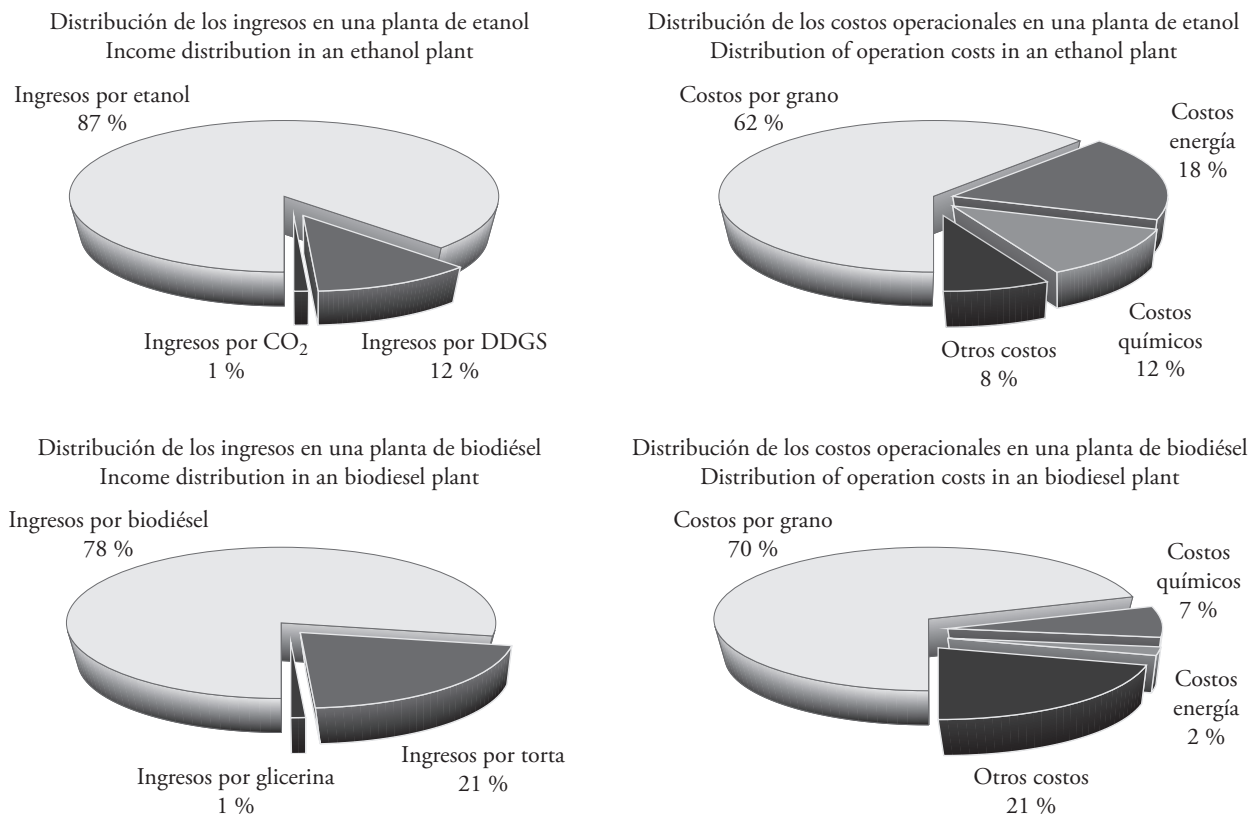


Figura 1. Distribución de los ingresos y costos en plantas productoras de biocombustibles.
Figure 1. Distribution of income and costs in biofuels production plants.

están altamente concentrados. En la Figura 2 se reporta un análisis de sensibilidad del precio de los biocombustibles a salida de planta respecto a aumentos en el precio de los principales factores de producción. Si bien el efecto directo de la inversión resultó poco significativo, mayores montos de inversión podrían estar asociados a mayores factores de conversión. En los Cuadros 7 y 8 se muestra el impacto conjunto de estas variables en escenarios factibles.

Considerando los inconvenientes en el suministro de gas natural argentino, se evaluó un escenario donde éste es reemplazado por gas propano. Si bien los costos energéticos en una planta de etanol se duplicaron, el precio final del etanol subió sólo 13 %. En el caso del biodiésel los costos energéticos subieron en 73 %, pero el precio final del biocombustible subió sólo 1.5 %.

En el Cuadro 9 se muestra un escenario optimista (precio del grano igual al promedio menos una desviación estándar) y uno pesimista (promedio más una desviación estándar) para plantas de etanol de 100 000 m³ y de biodiésel de 60 000 m³.

Considering the problems in the supply of natural gas from Argentina, a scenario where the natural gas is replaced by propane was evaluated. While energy costs in an ethanol plant were doubled, the final price of ethanol increased only 13 %. In the case of biodiesel energy costs rose by 73 %, but the final price of biofuel increased just 1.5 %.

In Table 9 it is shown an optimistic scenario (grain price equal to the average minus one standard deviation) and a pessimistic (mean plus one standard deviation) for ethanol plants of 100 000 m³ and biodiesel of 60 000 m³.

If it is considered that the price of WTI crude oil in November 2006 was US\$ 58.94 barrel⁻¹ (CNE, 2008), it is concluded that even in the best scenario the price equivalent of ethanol would be of US\$ 109.92 barrel⁻¹, 85 % higher than the oil crude price. Something similar happens with the biodiesel produced using rapeseed as its equivalent price in the better scenario would be US\$ 75.67 barrel⁻¹, which exceeds 22 % the observed price of crude.

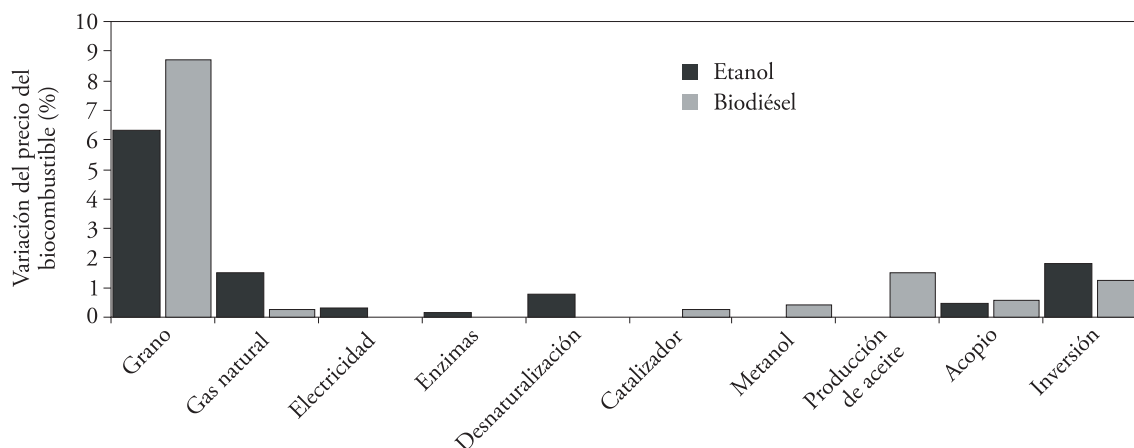


Figura 2. Variación del precio del etanol y biodiésel ante el aumento de un 10 % en el precio de los principales factores de producción.

Figure 2. Change in the price of ethanol and biodiesel to the 10 % increase in the price of the main factors of production.

Cuadro 7. Precios competitivos para el etanol a base de maíz a distintos montos de inversión y factores de conversión en planta.

Table 7. Competitive prices for corn-based ethanol at different levels of investment and conversion factors in plant.

Factor de conversión en planta	Inversión (millones de US\$)			
	60	65	70	75
	Precio US\$ L ⁻¹			
0.37 (L kg ⁻¹)	0.675	0.684	0.693	0.702
0.40 (L kg ⁻¹)		0.657	0.666	0.675
0.43 (L kg ⁻¹)			0.643	0.652
0.46 (L kg ⁻¹)				0.632

Cuadro 8. Precios competitivos para el biodiésel a base de raps a distintos montos de inversión y factores de conversión en planta.

Table 8. Competitive prices for rapeseed-based biodiesel at different levels of investment and conversion factors in plant.

Factor de conversión en planta	Inversión (millones de US\$)			
	15	20	25	30
	Precio US\$ L ⁻¹			
0.42 (L kg ⁻¹)	0.731	0.748	0.766	0.784
0.44 (L kg ⁻¹)		0.727	0.745	0.763
0.46 (L kg ⁻¹)			0.725	0.743
0.48 (L kg ⁻¹)				0.725

Cuadro 9. Precios equivalentes para biocombustibles.

Table 9. Equivalent prices for biofuels.

Cultivo	Precio biocombustible a salida de planta	Precio Combustible Fósil Equivalente (PCFE)	PCFE al consumidor (US\$ L ⁻¹)		Precio crudo WTI equivalente US\$ barril ⁻¹
	US\$ L ⁻¹	US\$ L ⁻¹	(Sin IE)	(con IE)	(sin IE)
Escenario optimista					
Maíz	0.622	0.928	1.234	1.598	109.217
Raps	0.595	0.661	0.916	1.007	75.674
Escenario pesimista					
Maíz	0.702	1.048	1.377	1.740	123.264
Raps	0.849	1.117	1.459	1.550	127.820

Si se considera que el precio del crudo WTI en noviembre de 2006 era US\$ 58.94 barril⁻¹ (CNE, 2008), se concluye que aún en el mejor escenario el precio equivalente del etanol sería US\$ 109.22 barril⁻¹, un 85 % mayor que el precio del crudo. Algo similar ocurre con el biodiésel producido usando raps, ya que su precio equivalente en el mejor escenario sería US\$ 75.67 barril⁻¹, que supera en 22 % al precio observado del crudo.

Finalmente, ante el sostenido aumento del precio internacional del petróleo desde el 2007 hasta mediados del 2008, el precio crudo WTI equivalente (sin IE) fue recalculado, obteniéndose valores de US\$ 144.6 barril⁻¹ y US\$ 184.6 barril⁻¹, para el etanol y el raps. Nuevamente, estos precios fueron muy superiores al precio del barril de petróleo en junio 2008 (US\$ 134.1 barril⁻¹).

CONCLUSIONES

La producción de etanol usando maíz representa la mejor opción de biocombustible para Chile si el objetivo es diversificar la matriz energética. En tal caso debería evaluarse también la alternativa de importación directa de biocombustibles. Si el objetivo es independencia energética, la producción de biodiésel usando raps resulta más conveniente, debido al elevado potencial de producción nacional del grano y la menor dependencia de las importaciones. En cualquier caso, la producción de biocombustibles sólo se justificaría a valores muy altos del precio del crudo WTI, conclusión que es robusta a los análisis de sensibilidad realizados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a ODEPA, en especial al Doctor André Laroze, a la CNE y a la Fundación para la Innovación Agraria, por financiar este estudio. Además agradecen a las personas y empresas privadas en general que entregaron valiosa información para el desarrollo de la investigación.

LITERATURA CITADA

CNE (Comisión Nacional de Energía). 2008. Estadísticas. Gobierno de Chile. http://www.cne.cl/estadisticas/f_estadisticas.html (consultado: julio 2008).
COTRISA (Comercializadora de Trigo S.A.). 2006. Santiago de Chile. <http://www.cotrisa.cl/> (consultado: noviembre 2006).

Finally, given the sustained increase in international oil prices from 2007 to mid 2008, the price of WTI crude oil equivalent (without IE) was recalculated, resulting in values of US\$ 144.6 barrel⁻¹ and US\$ 184.6 barrel⁻¹, for ethanol and biodiesel. Again, these prices were much higher than the price of a barrel of oil in June 2008 (US\$ 134.1 barrel⁻¹).

CONCLUSIONS

Ethanol production using corn is the best biofuel option to Chile if the objective is to diversify the energy matrix. In such a case, the alternative of direct import of biofuels should also be evaluated. If the goal is the energy independence, the production of biodiesel using rapeseeds is more convenient, due to the high potential for domestic production of grain and less dependence of imports. In any case, the production of biofuel only would be justified under very high values of WTI crude oil prices, a conclusion that is robust to the sensitivity analysis made.

—End of the English version—



EIA (Energy Information Administration). 2007. Petroleum U. S. Data. U. S. Department of Energy. <http://www.eia.doe.gov/> (consultado: enero 2007).
ENAP (Empresa Nacional del Petróleo). 2007. Precios y Mercados. <http://www.enap.cl/> (consultado: enero 2007).
FAO (Food and Agricultural Organization of United Nation). 2008. Bosques y energía cuestiones claves. Casa, M. (ed). Roma. 69 p. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0139s/i0139s00.pdf> (consultado: junio 2008).
Ferchau, E. 2000. Equipment for decentralised cold pressing of oil seeds. Folkecenter for Renewable Energy. Hurup Thy, Dinamarca. 64 p.
Johnson D. T., and K. A. Taconi. 2007. The glycerin glut: Options for the value-added conversion of crude glycerol resulting from biodiesel production. Environ. Orogress 26(4): 338-348.
ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2006. Estadísticas y precios. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://www.odepa.gob.cl> (consultado: noviembre 2006).
ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2007. Contribución de la política agraria al desarrollo de los biocombustibles en Chile. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. 140 p.

- Ortega, R., R. Muñoz, L. Acosta, y R. González. 2010. Producción de biocombustibles en Chile. I. Identificación y balance energético de la producción de materias primas y de biocombustibles. *Agrociencia* 44: 611-622.
- Searle, B. 2005. Bio-diesel in Oregon. Oregon Department of Agriculture. http://www.oregon.gov/ODA/do_reports_index.shtml#Bio_diesel_in_Oregon (consultado: noviembre 2006).
- Shapouri, H., and P. Gallagher. 2003. USDA's 2002 ethanol cost-of-production survey. *Agricultural Economic Report* 841. Office of energy Policy and New Uses, USDA Washington D.C. 19 p.
- Tiffany, D. G., and V. R. Eidman. 2003. Factors associated with success of fuel ethanol producers. Department of Applied Economics, University of Minnesota. 54 p.
- Van Gerpen, J., R. Pruszko, D. Clements, B. Shanks, and G. Knothe. 2005. Randall H. K., and A. T. Qualio (eds). *Building a Successful Biodiesel Business*. HRK Communications & Marketing (ed). Idaho. 245 p.