

# BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE. I. IDENTIFICACIÓN Y BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE MATERIAS PRIMAS Y DE BIOCOMBUSTIBLES

## BIOFUELS IN CHILE. I. IDENTIFICATION AND ENERGY BALANCE OF RAW MATERIALS AND BIOFUELS PRODUCTION

R. Augusto **Ortega-Blu\***, R. Eduardo **Muñoz-Lagos**, L. Gonzalo **Acosta-Espejo**, R. Alberto **González-Platteau**

Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María. Avenida Santa María 6400, Vitacura, Santiago-Chile. Código postal 7660251. (rodrigo.ortega@usm.cl).

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar si la producción de biocombustibles en Chile es sostenible, mediante balances energéticos (BE) y evaluaciones económicas, además de un modelo de localización de centros de acopio y plantas productoras. Se seleccionaron cinco cultivos y se definieron los sistemas productivos más representativos. Luego se estudiaron los procesos de producción de etanol y biodiésel y se realizaron balances energéticos en campo y planta. Se concluyó que el maíz (*Zea mays* L.) presentó los mayores rendimientos de etanol y un BE más alto, aunque con una eficiencia energética baja. Esto se debió a los altos costos energéticos, de los cuales el nitrógeno fue responsable del 67 %. El raps (*Brassica napus* L.) presentó un BE superior al del maíz y una mejor sensibilidad al costo energético primario.

**Palabras clave:** *Brassica napus*, *Triticum aestivum*, *Zea mays*, balance energético, biodiésel, etanol.

### INTRODUCCIÓN

El abastecimiento energético condiciona el desarrollo económico de los países y tiene variadas consecuencias ambientales, según la fuente de energía utilizada. Lo anterior es especialmente relevante si se considera que más del 80 % de la energía usada en el mundo proviene de fuentes no renovables (IEA, 2007). Dado los actuales niveles de consumo y el ritmo de crecimiento de la demanda mundial de energía, se calcula que en el 2030 el consumo de petróleo habrá aumentado en 42 % (FAO, 2008). Esta situación pone en riesgo las reservas del

### ABSTRACT

The objective of this study was to determine whether the production of biofuels in Chile is sustainable through energy balance (EB) and economic evaluations, as well as a location model of collection centers and manufacturing plants. Five crops were selected and the most representative production systems were defined. Then the processes of ethanol and biodiesel production were studied and energy balances were carried out in the field and plant. It was concluded that maize (*Zea mays* L.) had the highest yields of ethanol and a higher BE, but with a low energy efficiency. This was due to high energy costs, of which nitrogen was responsible for 67 %. Raps (*Brassica napus* L.) recorded a higher BE than that of maize and showed a better sensitivity to primary energy cost.

**Keywords:** *Brassica napus*, *Triticum aestivum*, *Zea mays*, energy balance, biodiesel, ethanol.

### INTRODUCTION

Energy supply affects the economic development of countries and has various environmental consequences, depending on the source of energy used. This is especially relevant when considering that over 80 % of the energy used worldwide comes from non renewable sources (IEA, 2007). Given the current levels of consumption and growth rate of worldwide energy demand, it is estimated that by 2030 oil consumption will increase by 42 % (FAO, 2008). This situation puts at risk the fossil fuel reserves, so it is indispensable to find alternative sources of energy.

In Chile, the energy supply grows at lower rates than the economy, there is little diversification of the energy matrix and, therefore, a high dependence on oil producing countries. According to the National

\* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

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

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 611-622. 2010.

combustible fósil, por lo que es indispensable encontrar fuentes alternativas de energía.

En Chile el suministro energético crece a tasas menores que la economía, hay una escasa diversificación de la matriz energética y, por tanto, una elevada dependencia de los países productores de hidrocarburos. Según la Comisión Nacional de Energía (2006) se importa 70 % de la energía requerida. Los nuevos proyectos de construcción de centrales hidroeléctricas en la Patagonia también han generado críticas a causa del gran impacto ambiental que provocarían. Así, la producción de biocombustibles a partir de granos adquiere importancia pues reduciría la dependencia energética debido a la diversificación y mayor proporción de energía nacional. Además reactivaría la economía en sectores rurales a través de un mayor empleo y actividades asociadas a la producción de biocombustibles y disminuiría el impacto ambiental por una menor emisión de gases de efecto invernadero (FAO, 2008).

Los biocombustibles se producen de biomasa y los más importantes son etanol y biodiésel. El primero se obtiene de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.), papa (*Solanum tuberosum* L.), remolacha (*Beta vulgaris* L.), maíz (*Zea mays* L.) y otros cereales (FAO, 2008) y en la industria se usa como solvente, bebestible y combustible alternativo. En este último caso puede utilizarse en mezclas con gasolina desde 5 a 95 %, y la de mayor uso es la E10: 10 % etanol y 90 % gasolina ((S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc., 2003). También se puede usar al 100 % en vehículos especialmente diseñados (Brasil). Dada la actual especificación de calidad de las gasolinas, en Chile sólo se podría ofrecer la mezcla E5 (5 % etanol y 95 % gasolina). Una modificación de la norma permitiría usar la E10, una mezcla tolerada por los actuales vehículos, con beneficios sustanciales para el ambiente.

El biodiésel es un combustible para motores diésel que se produce de grasas animales y aceites vegetales nuevos o usados. Normalmente se obtiene de aceites de soja (*Glycine max* L. Merr.), maravilla (*Helianthus annuus* L.), raps (*Brassica napus* L.), ricino (*Ricinus communis* L.), jatropha (*Jatropha curcas* L.) y cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) (FAO, 2008). En su producción se obtiene glicerina como subproducto que se puede usar como solvente, humectante, emulsificante, suavizante, anticongelante, y materia prima para elaborar nitroglicerina y jabones (Van Gerpen *et al.*, 2005). El biodiésel es apto como sustituto parcial

Energy Commission (2006), 70 % of the required energy is imported. The new projects of construction of power plants in Patagonia have also drawn criticism because of the large environmental impact they would cause. Thus, the production of biofuels from grains acquires relevance as it would reduce energy dependence as a result of the diversification and greater proportion of national power. Also it would reactivate the economy in rural areas through increased employment and activities associated with biofuel production and diminish the environmental impact from lower emissions of greenhouse gases (FAO, 2008).

Biofuels are produced from biomass, being ethanol and biodiesel the most important. The first one is obtained from sugar cane (*Saccharum officinarum* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.), sugarbeet (*Beta vulgaris* L.), maize (*Zea mays* L.) and other cereals (FAO, 2008) and in the industry is used as solvent, drink, and alternative fuel. The latter can be used in mixtures with gasoline from 5 to 95 %, and the most used is E10: 10 % ethanol and 90 % gasoline ((S & T)<sup>2</sup> Consultants Inc., 2003). It is also possible to use it 100 % in especially designed vehicles (Brazil). Considering the current quality specification of gasoline, in Chile only the mixture E5 (5 % ethanol and 95 % gasoline) could be offered. A modification of the rule would allow the use of E10, a blend tolerated by current vehicles, with substantial benefits for the environment.

Biodiesel is a fuel for diesel engines produced from animal fats and vegetable oils, new or used. It is usually obtained from soybean (*Glycine max* L. Merr.), sunflower (*Helianthus annuus* L.), raps (*Brassica napus* L.), castor bean (*Ricinus communis* L.), jatropha (*Jatropha curcas* L.) and safflower (*Carthamus tinctorius* L.) oils (FAO, 2008). In its production, glycerin is obtained as a byproduct that can be used as a solvent, humectant, emulsifier, softener, antifreeze, and raw material for nitroglycerin and soaps (Van Gerpen *et al.*, 2005). Biodiesel is suitable as a partial or complete substitute for diesel fuel in diesel engines and can be used on vehicles with internal combustion engines up to 100 % (B100) or in mixtures of varying proportions. The most common use is B20: 20 % biodiesel and 80 % oil diesel (Van Gerpen *et al.*, 2005).

To analyze the production potential of biofuels it is necessary to study technical, economic and

o total del gasóleo en motores diésel y se puede usar en vehículos con motores de combustión interna al 100 % (B100) o en mezclas de proporciones variables. El uso más común es B20: 20 % biodiésel y 80 % diésel de petróleo (Van Gerpen *et al.*, 2005).

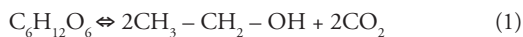
Para analizar el potencial de producción de los biocombustibles es necesario estudiar los aspectos técnicos, económicos y ambientales. La disponibilidad de tierras, el balance de energía, la localización de instalaciones y los costos de producción son algunos elementos claves en una evaluación integral. Con base a estas consideraciones se realizó un estudio para evaluar el potencial de producción de los biocombustibles en Chile usando cultivos extensivos. El estudio fue dividido en tres partes; el presente artículo corresponde a la primera de ellas y los objetivos fueron: 1) identificar los principales sistemas productivos de los cultivos anuales seleccionados como potenciales materias primas para producir biocombustibles; y 2) desarrollar balances de energía para los procesos seleccionados en toda la cadena productiva.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cinco cultivos para la producción de biocombustibles: trigo (*Triticum aestivum* L.), maíz y arroz (*Oryza sativa* L.) para la producción de etanol, y raps y maravilla para la producción de biodiésel.

Se analizó la superficie y el rendimiento en cada provincia de los cinco cultivos seleccionados usando datos obtenidos de fuentes oficiales (INE, 1997; ODEPA, 2008) y empresas privadas. La información fue cruzada con datos de zonas agroecológicas y validada con entrevistas a expertos. Con lo anterior y considerando la información publicada por González *et al.* (2000) y Velasco y González (2004), se definieron los sistemas productivos predominantes para cada cultivo seleccionado, generando fichas técnicas individuales.

Se seleccionó la molienda seca como proceso de producción de etanol ((S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc., 2003), cuyas etapas se presentan en la Figura 1. La fermentación se produce en condiciones anaeróbicas de acuerdo al siguiente equilibrio (ecuación 1):



Para la producción de biodiésel se consideró la transesterificación alcalina (Van Gerpen *et al.*, 2005). Es una reacción de 100 kg de aceite vegetal con 10 kg de alcohol (metanol) en presencia del catalizador básico, produciendo 100 kg de éster y 10 kg de glicerina (ecuación 2):

environmental aspects. The availability of land, energy balance, the location of facilities and production costs are key elements in a comprehensive assessment. Based on these considerations, a study to evaluate the production potential of biofuels in Chile using extensive crops was conducted. The study was divided into three parts; this paper corresponds to the first one and the objectives were: 1) to identify the major production systems of the annual crops selected as potential raw materials to produce biofuels; 2) to develop energy balances for the selected processes throughout the production chain.

### MATERIALS AND METHODS

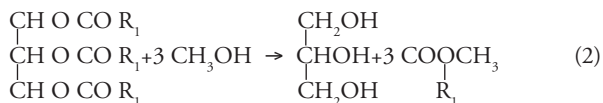
Five crops for biofuel production were selected: wheat (*Triticum aestivum* L.), maize and rice (*Oryza sativa* L.) for the production of ethanol, and rapeseed and sunflower for the production of biodiesel.

We analyzed the area and yield in each province of the five selected crops using data from official sources (INE, 1997; ODEPA, 2008) and private companies. The information was crossed with data from agro-ecological zones and validated by interviewing experts. With the foregoing and considering the information published by Gonzalez *et al.* (2000) and Velasco and González (2004), the prevailing production systems for each crop selected were defined, generating technical sheets.

Dry milling was selected as an ethanol production process ((S & T)<sup>2</sup> Consultants Inc., 2003), whose stages are shown in Figure 1. Fermentation occurs under anaerobic conditions, according to the following equilibrium (equation 1):

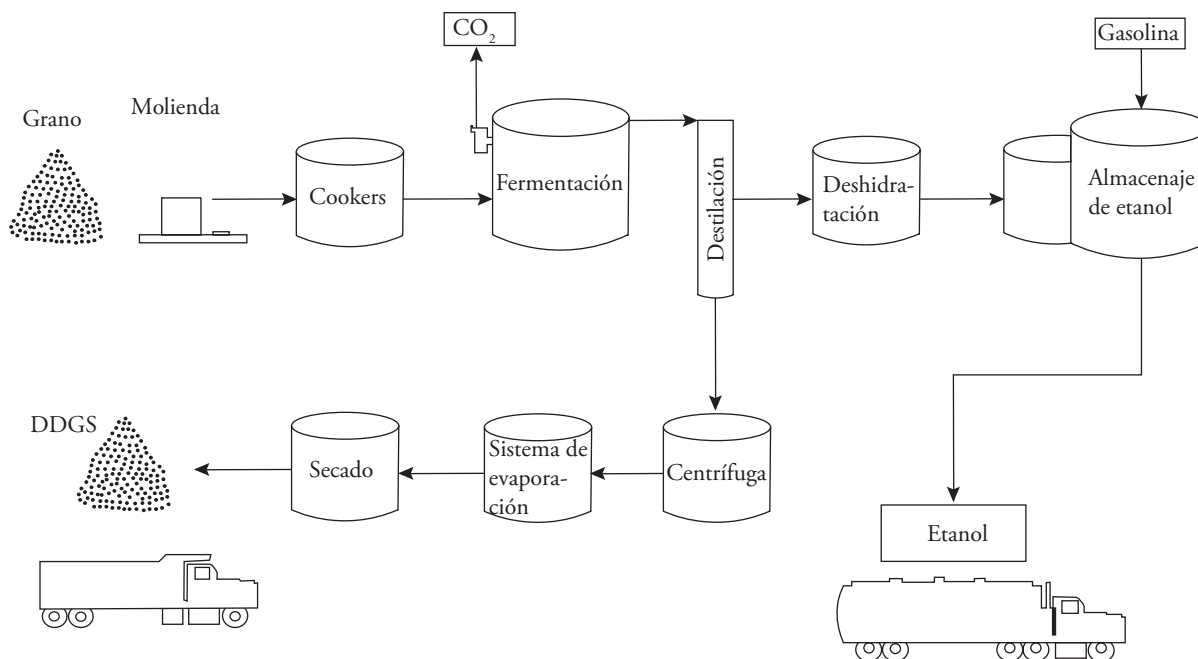


For the production of biodiesel, the alkaline transesterification (Van Gerpen *et al.*, 2005) was considered. It is a reaction of 100 kg of vegetable oil with 10 kg of alcohol (methanol) in the presence of the basic catalyzer, producing 100 kg of ester and 10 kg of glycerin (Equation 2):



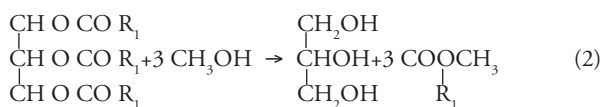
The stages of the productive process are shown in Figure 2.

For the production of biodiesel using oilseeds the pressing stage for oil extraction is added. The byproducts obtained at this stage (cakes) can be used in animal feed as substitutes for other protein sources.



DDGS: dried distiller grains with solubles ♦ granos secos de destilería con solubles.

**Figura 1. Proceso de producción de etanol a base de granos de cereales.**  
**Figure 1. Production process of ethanol from cereal grains.**



Las etapas del proceso productivo se presentan en la Figura 2.

Para la producción de biodiésel usando semillas de oleaginosas se agrega la etapa de prensado para extraer aceite. Los subproductos obtenidos en esta etapa (tortas) se pueden usar en la alimentación animal como sustitutos de otras fuentes proteínicas.

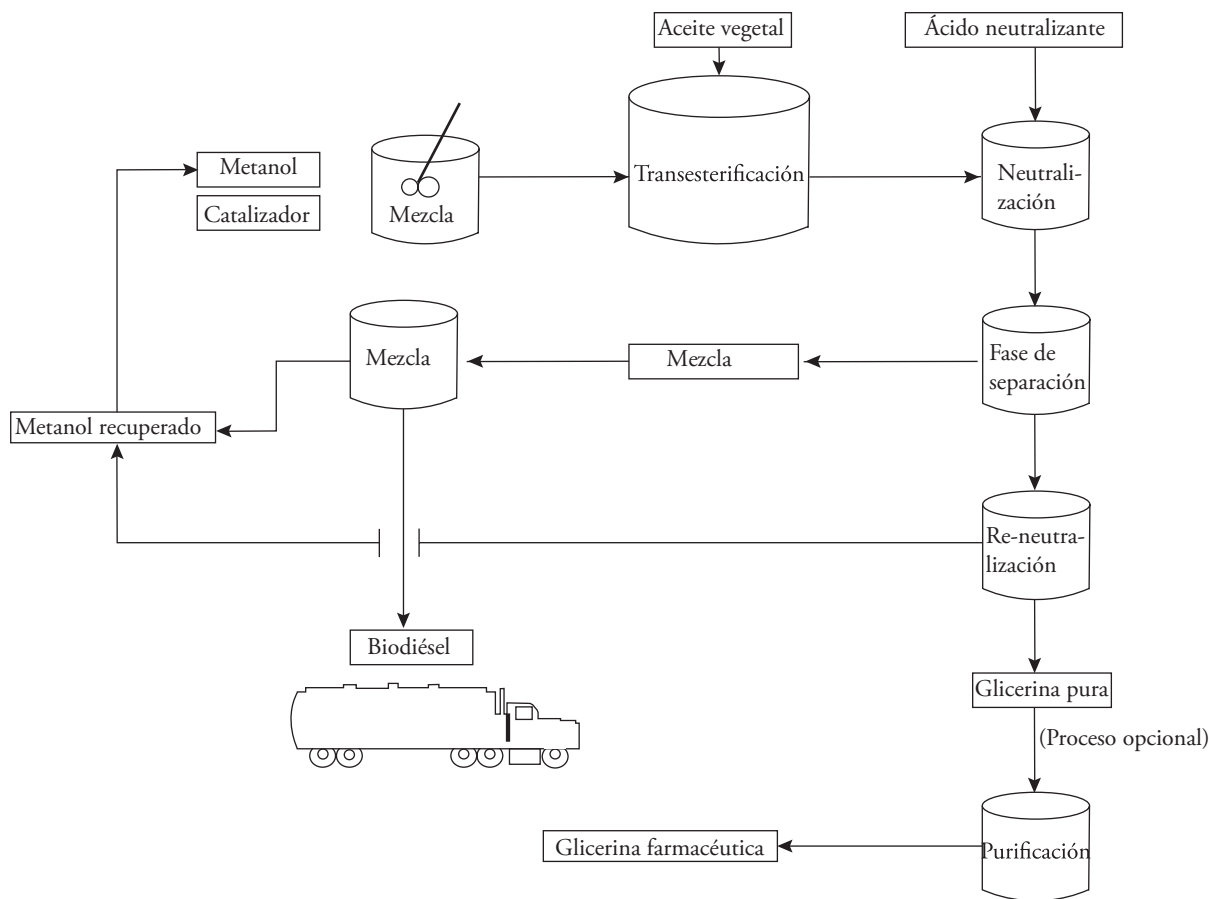
Se usaron los valores máximos de rendimiento de etanol y biodiésel obtenidos en plantas modernas en funcionamiento, usando los datos publicados por Farrel *et al.* (2006) y Johnson (2005) y aportes de organizaciones públicas y privadas.

Para determinar si la producción de biocombustibles con granos es ambientalmente sostenible, se realizaron balances energéticos (BE) en campo según los procedimientos de Hetz (1994) y Hetz y Barrios (1997). El balance no incluyó la energía solar pues se consideró que está siempre presente, permitiendo la fotosíntesis y producción de semillas. Todos los insumos y productos usados fueron convertidos a valores de energía, de acuerdo con el modelo EBAMM versión 1.1 de la Universidad de California Berkeley (Farrell *et al.*, 2006; Hetz y Barrios, 1997). Se desarrolló una planilla Excel que incorpora cada factor del BE, la cual puede ser modificada según el escenario evaluado. Dada la elevada variabilidad en algunos de los valores de energía reportados, se

The maximum yield values of ethanol and biodiesel obtained from modern plants in operation were used; data published by Farrel *et al.* (2006) and Johnson (2005) and contributions from public and private organizations were used.

To determine whether the grain biofuel production is environmentally sustainable, energy balances (BE) were performed in the field according to the procedures by Hetz (1994) and Hetz and Barrios (1997). The balance did not include solar energy as it was considered to be always present, allowing photosynthesis and seed production. All inputs and outputs used were converted into energy values, according to the model EBAMM version 1.1 of the University of California Berkeley (Farrell *et al.*, 2006; Hetz and Barrios, 1997). An Excel spreadsheet was developed that includes each BE factor, which can be modified according to the scenario evaluated. Given the great variability of some of the energy values reported, an arbitrary criterion was used based on the coefficient of variation (CV) of the values available for selection. For the energy values with CV < 60 % averages were considered; with CV > 60 % the expert criterion was applied. The energy cost of machinery was calculated as established by Hetz and Barrios (1997).

For each crop and production system in the field a BE was performed. In addition, for ethanol and biodiesel a global BE was conducted including the energy costs in field and processing plant, that is, from the production of grain to biofuels. The indicators were:



**Figura 2. Proceso estándar de producción de biodiésel.**  
**Figure 2. Standard process for biodiesel production.**

usó un criterio arbitrario basado en el coeficiente de variación (CV) de los valores disponibles para su selección: para valores de energía con CV < 60 % se consideraron los promedios; con CV >60 % se aplicó criterio experto. El costo energético de la maquinaria se calculó según lo establecido por Hetz y Barrios (1997).

Se realizó un BE para cada cultivo y sistema productivo en campo. Además, para etanol y para biodiésel se efectuó un BE global incluyendo los costos energéticos en campo y en la planta procesadora, es decir, desde la producción del grano hasta la producción de los biocombustibles. Los indicadores fueron:

- 1) Valor de energía neta  
 $(VEN) (MJ L^{-1}) = \text{Salidas-entradas}$
- 2) Relación de energía neta  
 $(REN)(\text{sin unidades}) = \frac{\text{Salidas}}{\text{Entradas}}$
- 3) Producción neta (PN)  
 $(MJ kg^{-1} \text{ grano}) = \frac{\text{Energía neta}}{\text{kg grano obtenido}}$

- 1) Net energy value  
 $(VEN) (MJ L^{-1}) = \text{Outputs-inputs}$
- 2) Net energy relationship  
 $(REN) (\text{unitless}) = \frac{\text{Outputs}}{\text{Inputs}}$
- 3) Net production (PN)  
 $(MJ kg^{-1} \text{ grain}) = \frac{\text{Net energy}}{\text{kg grain obtained}}$

The latter was used only for the BE in the field. For the BE in plant the energy costs suggested by Farrell *et al.* (2006) were used. The value of primary energy for an ethanol plant was defined at 9.71 MJ L<sup>-1</sup> (Tiffany and Eidman, 2003). Since this value is very important in the outcome of BE of the whole process, a sensitivity analysis was performed for this parameter conducting BE with primary energy values of 7, 10, 13, 16 and 19 MJ ha<sup>-1</sup>. For a biodiesel plant the primary energy value was set at 1.61 MJ L<sup>-1</sup>, and a sensitivity analysis was conducted with values of 1.12,

Este último se usó sólo para el BE en campo. Para el BE en planta se usaron los costos energéticos sugeridos por Farrell *et al.* (2006). El valor de energía primaria para una planta de etanol se definió en  $9.71 \text{ MJ L}^{-1}$  (Tiffany y Eidman, 2003). Como este valor es muy relevante en el resultado del BE del proceso completo, se realizó un análisis de sensibilidad para este parámetro efectuando BE con valores de energía primaria de 7, 10, 13, 16 y  $19 \text{ MJ ha}^{-1}$ . Para una planta de biodiésel el valor de energía primaria se estableció en  $1.61 \text{ MJ L}^{-1}$  y se efectuó un análisis de sensibilidad con valores de 1.12, 1.6, 2.08, 2.56 y  $3.04 \text{ MJ L}^{-1}$ , que corresponden a 70, 100, 130, 160 y 190 % del costo energético usado en la evaluación.

Los valores usados en la evaluación energética de cada escenario y su fuente, se presentan en el Cuadro 1. Un alto número de los valores de energía usados proviene de la literatura, particularmente de EE.UU.; dichos valores debieran ajustarse bastante bien a la realidad chilena porque los híbridos y variedades usadas son similares, igual que las tecnologías en campo y planta.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Identificación de los sistemas productivos de cultivos para etanol

#### Arroz

Durante la temporada 2006/2007 se sembraron aproximadamente 26 500 ha entre la Región VI y la

1.6, 2.08, 2.56 and  $3.04 \text{ MJ L}^{-1}$ , corresponding to 70, 100, 130, 160 and 190 % of the energy cost used in the evaluation.

The values used in the energy evaluation of each scenario and its source are presented in Table 1. A large number of the energy values used come from the literature, particularly from the United States, so these values should adjust fairly well to the Chilean reality because the hybrids and varieties used are similar, as well as the technologies in the field and plant.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Identification of production systems of crops for ethanol

#### Rice

During the 2006/2007 season approximately 26 500 ha between the Region VI and the VIII ( $34^\circ$  to  $36^\circ$  S) were sown with an average yield of  $5.3 \text{ t ha}^{-1}$  (ODEPA, 2008). About 78 % of rice production is concentrated in Region VII, particularly in the area irrigated by the Digua reservoir.

The production system in Chile is predominantly rice-fallow, with varying intensities of the latter, one to three years. Only in Region VI rice crop is conducted using rotation with other species such as maize. Three production areas located in Regions VI, VII and VIII were selected (they are identified as A1,

**Cuadro 1. Valores de energía promedio usados para el balance energético de la producción de etanol y biodiésel.**  
**Table 1. Average energy values used for the energy balance in the production of ethanol and biodiesel.**

Ítem	Unidad	Etanol <sup>†</sup>	Biodiésel <sup>‡</sup>	Ambos	Origen
Maquinaria	$\text{MJ ha}^{-1}$	4344	3193		Chile
Semilla	$\text{MJ kg}^{-1}$	10	25		Literatura
Nitrógeno (N)	$\text{MJ kg}^{-1}$			56	Literatura
Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	$\text{MJ kg}^{-1}$			10	Literatura
Potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	$\text{MJ kg}^{-1}$			8	Literatura
Cal	$\text{MJ kg}^{-1}$			1	Literatura
Herbicidas	$\text{MJ kg}^{-1}$			324	Literatura
Fungicidas	$\text{MJ kg}^{-1}$			330	Literatura
Transporte de materia prima	$\text{MJ L}^{-1}$	0.58	0.41		Chile
Energía primaria	$\text{MJ L}^{-1}$	9.7	1.6		Literatura
Capital	$\text{MJ L}^{-1}$			0.14	Literatura
Proceso del agua	$\text{MJ L}^{-1}$			0.38	Literatura
Tratamiento de riles	$\text{MJ L}^{-1}$	0.29	0.58		Literatura
Energía biocombustible	$\text{MJ L}^{-1}$	21	32		Literatura

<sup>†</sup> Valores promedio para los sistemas productivos evaluados para la producción de etanol ♦ Mean values for the production systems evaluated for ethanol production.

<sup>‡</sup> Valores promedio para los sistemas productivos evaluados para la producción de biodiésel ♦ Mean values for the production systems evaluated for biodiesel production.

VIII (34° a 36° S), con un rendimiento promedio de 5.3 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Alrededor del 78 % de la producción de arroz se concentra en la VII Región, particularmente en el área regada por el embalse Digua. El sistema productivo predominante en Chile es arroz-descanso, con intensidades variables de este último, de uno a tres años. Sólo en la VI Región la rotación del cultivo del arroz es con otras especies como el maíz. Se seleccionaron tres zonas de producción, ubicadas en las Regiones VI, VII y VIII (identificadas como A1, A2 y A3). Con las variedades actuales, el rendimiento potencial es 9 t ha<sup>-1</sup>; sin embargo, para el presente estudio se determinó que con una agricultura por contrato el rendimiento posible es 7 t ha<sup>-1</sup>.

### Maíz de grano

Aunque se cultiva en gran parte del país (31° a 41° S), el 97 % se concentra entre la Región Metropolitana (RM) y la VIII Región (33° a 37° S). Durante la temporada 2006/2007 se cultivaron poco más de 134 000 ha con un rendimiento promedio de 11.6 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Tradicionalmente, los mayores rendimientos se obtienen en la RM y VI Región, con valores mayores a 12 t ha<sup>-1</sup>.

Los rendimientos potenciales pueden superar las 20 t ha<sup>-1</sup>, lo que está determinado principalmente por el sistema de producción, el híbrido usado, la rotación de cultivos, la fertilización y el riego. La fertilización se basa fundamentalmente en nitrógeno, con dosis de 300 a 500 kg N ha<sup>-1</sup>, y la urea (46 % N) es la principal fuente. En la RM y la VI Región es común el monocultivo de maíz con híbridos de ciclo más largo, mientras que en las Regiones VII y VIII se usan híbridos más precoces en rotación con trigo y otros cultivos de primavera. Se seleccionaron zonas de producción en la VI, VII y VIII Regiones, con labranza tradicional e identificadas como M1, M2 y M3. El rendimiento calculado fue de 12 t ha<sup>-1</sup>, valor alcanzable con un sistema de agricultura por contrato.

### Trigo

En años recientes la superficie cultivada en Chile ha disminuido notablemente, pero el trigo es la especie más importante por ser la base de la dieta nacional. En la temporada 2006/2007 se cultivaron 282 400 ha entre la Región IV y la X (29° a

A2 and A3). With the current varieties, the potential yield is 9 t ha<sup>-1</sup>; however, in the present study it was established that with farming by contract the possible yield may be 7 t ha<sup>-1</sup>.

### Grain maize

Although it is cultivated in much of the country (31° to 41° S), 97 % is concentrated between the Metropolitan Region (RM) and Region VIII (33° to 37° S). During the 2006/2007 season maize was grown in just over 134 000 ha, with an average yield of 11.6 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Traditionally, the highest yields are obtained in RM and Region VI, with values higher than 12 t ha<sup>-1</sup>.

The potential yields can exceed 20 t ha<sup>-1</sup>, which is mainly determined by the production system, the hybrid used, crop rotation, fertilization and irrigation. Fertilization is mainly based on nitrogen, with rates of 300 to 500 kg N ha<sup>-1</sup>, and urea (46 % N) is the main source. In the RM and Region VI it is common to see maize monoculture combined with hybrids of longer cycle, while in Regions VII and VIII more precocious hybrids are used, which are rotated with wheat and other spring crops. Production areas were selected in the VI, VII and VIII Regions, with conventional tillage and identified as M1, M2 and M3. The yield calculated was 12 t ha<sup>-1</sup>, a value achievable with a system of contract farming.

### Wheat

In recent years the wheat cultivated area in Chile has notably diminished, yet this species is the most important since it is the base of the national diet. In the 2006/2007 season 282 400 ha were cultivated between the IV and X Regions (29 ° to 44 ° S) with an average yield of 4.7 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). About 90 % of production came from the Regions VI to IX (34 ° to 41 ° S). Management factors affecting the production of this cereal are: used cultivar, soil preparation, fertilization and water availability. Wheat is grown under rainfed and irrigation conditions. With irrigation the potential yield exceeds 10 t ha<sup>-1</sup>, but in dry land areas, it varies from 6 to 9 t ha<sup>-1</sup>, depending on the agro-ecological zone (Andean foothills or interior dry lands) and the fertilization used. The most representative production systems are: irrigation in Region VII central valley (T1); the

44° S) con un rendimiento promedio de 4.7 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Cerca del 90 % de la producción provino de las Regiones VI a IX (34° a 41° S). Los factores de manejo que inciden en la producción de este cereal son el cultivar usado, la preparación del suelo, la fertilización y la disponibilidad de agua. El trigo se cultiva en condiciones de secano y de riego; con riego el rendimiento potencial supera las 10 t ha<sup>-1</sup> pero en secano varía de 6 a 9 t ha<sup>-1</sup>, según la zona agroecológica (precordillera andina o secano interior) y la fertilización usada. Los sistemas productivos más representativos son: riego en el valle central de la VII Región (T1); secano interior de la VIII Región (T2); cero labranza en el secano interior de la VIII Región (T3); precordillera andina de la VIII Región (T4); y cero labranza en la precordillera andina de la VIII Región (T5).

### Rendimiento de materias primas para etanol

Las plantas procesadoras más comunes son las de molienda seca, con una capacidad anual de producción de 80 000 a 100 000 m<sup>3</sup> (dependiendo del cultivo usado). Estas plantas son multi-alimentadas, es decir, pueden operar usando distintos granos (o combinaciones) como materia prima (Tiffany y Eidman, 2003). Los rendimientos de etanol y subproductos al usar arroz, maíz y trigo se presentan en el Cuadro 2.

### Identificación de los principales sistemas productivos de cultivos para biodiésel

#### Maravilla

Se cultiva en suelos regados de la zona central de Chile (34° a 36° S). Desde la década de 1990, la superficie cultivada en el país cayó drásticamente debido a la fuerte competencia de mezclas de aceite provenientes de Bolivia y Argentina. En años recientes se ha producido un repunte, particularmente de semilleros para la producción de híbridos. Durante la temporada 2006/2007 se cultivaron 2680 ha, con un rendimiento promedio de 2.1 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Por ser un cultivo de primavera y por tanto de riego, utiliza los mismos suelos que el maíz. Los manejos realizados por las empresas productoras de semilla difieren de aquellos para el cultivo destinado a la producción de aceite, lo que dificulta obtener coeficientes técnicos apropiados para distintas zonas

dry land areas of Region VIII (T2); non-till in dry land areas of Region VIII (T3); Andean foothills, Region VIII (T4); and non-till in Andean foothills, Region VIII (T5).

### Yields of raw materials for ethanol

The most common processing plants are those of dry milling, with an annual production capacity from 80 000 to 100 000 m<sup>3</sup> (depending on the crop used.) These plants are multi-fed, that is, they can operate using different grains (or combinations) as raw material (Tiffany and Eidman, 2003). The yields of ethanol and byproducts using rice, maize and wheat are presented in Table 2.

### Identification of the major production systems of crops for biodiesel

#### Sunflower

It is grown in irrigated soils of central Chile (34° to 36° S). Since the 1990s, the area cultivated in the country decreased sharply due to strong competition from oil mixtures coming from Bolivia and Argentina. In recent years there has been an upturn, particularly of seed nurseries for the production of hybrids. During the 2006/2007 season 2680 ha were cultivated, with an average yield of 2.1 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). As a spring crop and therefore with irrigation, it uses the same soils than maize. The management systems used by the seed producing companies differ from those for the cultivation destined to oil production, making it difficult to obtain appropriate technical coefficients for different agro-ecological zones.

**Cuadro 2. Rendimientos por tonelada de materia prima en una planta de etanol.**

**Table 2. Yields per ton of raw material in an ethanol plant.**

Productos	Materia prima		
	Arroz	Maíz	Trigo
Etanol (m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> )	0.40	0.46	0.40
DDGS † (kg t <sup>-1</sup> )	350	330	350
CO <sub>2</sub> (kg t <sup>-1</sup> )	350	330	350

† DDGS: dried distiller grains with solubles ♦ granos secos de destilería con solubles.



agroecológicas. Por tanto, sólo se seleccionó un sistema productivo: labranza tradicional en la VII Región del Maule (G1).

**Raps**

Se cultiva principalmente para aceite vegetal y para la alimentación animal. Originalmente, el aceite y afrecho (salvado) de raps tenían un alto contenido de ácido erúxico y glucosinolatos, compuestos tóxicos en dosis altas. En Canadá se obtuvo variedades con niveles menores a 2 % de ácido erúxico y 30 mmol g<sup>-1</sup> de glucosinolatos, que se conocen con el nombre genérico de canola.

En la temporada 2006/2007 se cultivaron en Chile 16 650 ha, concentradas principalmente en el valle central y precordillera andina de las regiones VII a X (35° a 41° S). La IX Región es la más importante con un rendimiento de 2 a 5 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Se seleccionaron dos sistemas productivos en la precordillera de la IX Región: uno con labranza tradicional (R1) y otro con cero labranza (R2).

**Rendimiento de materias primas biodiésel**

En el Cuadro 3 se presentan los rendimientos de biodiésel, torta seca y glicerina obtenidos en una planta que funciona a plena capacidad, usando granos de oleaginosas.

**Balance energético para la producción de etanol**

Todos los sistemas productivos seleccionados presentaron BE positivos y similares a los publicados por Hetz (1994). Sin embargo, la eficiencia energética (REN) fue menor a los valores reportados, especialmente para el caso del maíz (Cuadro 4). Esto se debería a los mayores niveles de insumos requeridos para

Therefore, only one production system was selected: the conventional tillage in the Maule VII Region (G1).

**Rapeseed**

It is grown primarily for vegetable oil and animal feed. Originally, oil and bran of rape had a high content of erucic acid and glucosinolates, toxic compounds in high doses. Varieties with less than 2 % of erucic acid and 30 mmol g<sup>-1</sup> of glucosinolates were obtained in Canada, now known generically as canola.

In the 2006/2007 season in Chile 16 650 ha were cultivated with rapeseed, mainly concentrated in the central valley and Andean foothills of regions VII to X (35° to 41° S). Region IX is the most important, with a yield of 2 to 5 t ha<sup>-1</sup> (ODEPA, 2008). Two production systems in the Andean foothills of the IX Region were selected: one with conventional tillage (R1) and the other with non-till (R2).

**Yield of biodiesel raw materials**

In Table 3 it is shown the yields of biodiesel, dry cake residues and glycerin obtained in a plant operating at full capacity, using oilseed grains.

**Energy balance for ethanol production**

All selected production systems showed positive BE and similar to those reported by Hetz (1994). However, energy efficiency (REN) was lower than the values reported, especially for maize (Table 4). This would be due to the higher levels of inputs required to produce similar yields, compared to the 1980s and early 1990s.

In the field, 80 % of the energy costs accounted for inputs, with nitrogen standing out as it represented two thirds of the total. This is particularly important for the maize crop, as in Chile high N rates (> 450 kg N ha<sup>-1</sup>) are used.

The global BE was positive for all production systems, with values of REN from 1.22 (T3) to 1.51 (M1), consistent with the results by Farrell *et al.* (2006). For ethanol the best energy balance was for M1, while in biodiesel it was for R2 (Table 5).

According to the sensitivity analysis, with a value of primary energy greater than 16 MJ L<sup>-1</sup> the BE

**Cuadro 3. Rendimientos por tonelada de materia prima en plantas de biodiésel.**

**Table 3. Yields per ton of raw material in biodiesel plants.**

Productos	Materia prima	
	Maravilla	Raps
Biodiésel (m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> )	0.46	0.44
Torta seca (kg t <sup>-1</sup> )	560	580
Glicerina (m <sup>3</sup> t <sup>-1</sup> )	0.046	0.044

producir rendimientos similares, si se compara con la década de 1980 y principios de la de 1990.

En campo, 80 % del costo energético correspondió a insumos, destacando el nitrógeno que representó 2/3 del total. Esta situación es especialmente importante en el cultivo del maíz, dado que en Chile se usan elevadas dosis de N (> 450 kg N ha<sup>-1</sup>).

El BE global fue positivo para todos los sistemas productivos, con valores de REN de 1.22 (T3) a 1.51 (M1) que concuerdan con los resultados de Farrell *et al.* (2006). Para etanol el mejor balance energético fue para M1, mientras que en biodiésel fue para R2 (Cuadro 5).

Según el análisis de sensibilidad, con un valor de energía primaria superior a 16 MJ L<sup>-1</sup> el BE es cercano a cero. Aquí, la tecnología de la planta es fundamental para definir el BE en la producción de etanol.

Para realizar un BE con menor incertidumbre, lo ideal sería contar con valores de energía obtenidos localmente, para cada factor considerado en el balance. Sin embargo, el uso de valores de literatura, particularmente provenientes de EE.UU., no invalida los resultados obtenidos en el presente estudio dada la similitud con las variedades, insumos y tecnologías usadas en Chile. Además, el análisis de sensibilidad realizado con los valores de energía primaria en la planta, reveló que incluso usando plantas procesadoras ineficientes que utilicen 60 % más de energía, el BE en etanol sería positivo o neutro (cero) en todos los escenarios evaluados.

**Cuadro 4. Balance energético en campo para los sistemas productivos de maíz.**

**Table 4. Energy balance in field for maize production systems**

Variable	M1	M2	M3
Energía neta (MJ ha <sup>-1</sup> )	94 159	92 991	91 549
Rango reportado (MJ ha <sup>-1</sup> ) <sup>†</sup>	68 701 - 96 023		
REN	4.6	4.4	4.2
Rango reportado <sup>†</sup> REN	8.3 - 8.4		
PN (MJ kg <sup>-1</sup> )	7.8	7.7	7.6

<sup>†</sup> Hetz, 1994. REN: relación de emergencia neta; PN: producción neta. <sup>‡</sup> Hetz, 1994. REN: net energy relationship; PN: net production.

is close to zero. Here the technology of the plant is crucial to define BE in the production of ethanol.

To make a BE less uncertain, the ideal situation would be having energy values obtained at the local level for each factor considered in the balance. However, the use of values taken from the literature, particularly from the United States, does not invalidate the results obtained in this study given the similarity with the varieties, inputs and technologies used in Chile. In addition, the sensitivity analysis performed with the values of primary energy in the plant revealed that even using inefficient processing plants that utilize 60 % more energy, the BE in ethanol would be positive or neutral (zero) in all the scenarios evaluated.

**Cuadro 5. Balance energético global de sistemas productivos seleccionados para la producción de etanol<sup>†</sup> y biodiésel<sup>‡</sup>.**

**Table 5. Overall energy balance of production systems selected for the production of ethanol<sup>†</sup> and biodiesel<sup>‡</sup>.**

Indicador	A2	M1	T1	R2	G2
En campo:					
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	7.0	12.0	8.0	3.5	2.5
Energía de entrada (MJ ha <sup>-1</sup> )	14 520	25 841	18 055	17 497	15 564
Energía de salida (MJ ha <sup>-1</sup> )	70 000	120 000	80 000	94 500	57 500
Energía neta (MJ ha <sup>-1</sup> )	55 480	94 159	61 945	77 003	41 936
REN	4.8	4.6	4.4	5.4	3.7
Producción neta (MJ kg <sup>-1</sup> )	7.9	7.8	7.7	22.0	16.8
Proceso completo:					
Energía de entrada (MJ L <sup>-1</sup> )	16.3	15.7	16.8	14.5	16.6
Energía de salida (MJ L <sup>-1</sup> )	23.8	23.7	23.9	32.0	32.0
VEN (MJ L <sup>-1</sup> )	7.5	8.1	7.1	17.5	15.3
REN	1.5	1.5	1.4	2.2	1.9

<sup>†</sup> A2, M1 y T1; <sup>‡</sup> R2, G2. VEN: valor de energía neta; REN: relación de energía neta. <sup>♦</sup> A2, M1 y T1; <sup>§</sup> R2, G2. VEN: net energy value; REN: net energy relationship.

## Balance energético para la producción de biodiésel

Los resultados obtenidos en el BE fueron positivos para ambos cultivos, con valores de REN de 1.92 (G1) y 2.21 (R2). En el balance se consideró todo el gasto energético posible en planta, incluido el costo de prensado de las semillas, el lavado y la recuperación del alcohol. También se incorporó el costo de tratamiento de las aguas servidas, que duplicó al del etanol, debido a las dificultades para disponer la glicerina.

En el análisis de sensibilidad se observó que aún duplicando los costos energéticos, los valores de REN eran muy superiores a 1, lo que contrastó con lo obtenido para etanol. Ello se debe a que el costo de energía primaria para la producción de biodiésel es aproximadamente 1/5 del etanol. Así, desde el punto de vista energético en las condiciones nacionales, sería más factible producir biodiésel con base a raps que etanol con base a maíz.

## CONCLUSIONES

En Chile existe una gran diversidad de sistemas de producción de materias primas para la elaboración de biocombustibles (BC) y los cultivos que presentan mayores rendimientos de BC son el maíz y raps.

Los rendimientos de biocombustibles en planta procesadora dependen directamente de la materia prima y el proceso utilizado, y en promedio son menores para el etanol. Además, el costo energético de producir etanol es alrededor de ocho veces el del biodiésel. En el etanol, el balance energético está fuertemente influenciado por el nivel de energía primaria usada en el proceso productivo, la que depende de la tecnología utilizada en la planta procesadora.

En el campo el balance energético está determinado por el sistema productivo, en especial la dosis de nitrógeno utilizada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a ODEPA, en especial al Dr. André Laroze B., 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.

## Energy balance for biodiesel production

The results obtained in the BE were positive for both crops, with values of REN of 1.92 (G2) and 2.21 (R2). In the balance it was considered all possible energy expenditure in the plant, including the cost of seed pressing, washing and alcohol recovery. Also the cost of wastewater treatment was incorporated, which doubled the amount of that of ethanol because of the difficulties to dispose the glycerin.

The sensitivity analysis showed that even doubling energy costs, REN values were much higher than 1, which contrasted with that obtained for ethanol. This is because the cost of primary energy for the production of biodiesel is approximately one fifth of ethanol. Thus, from the energy point of view within national conditions, it would be more feasible to produce biodiesel based on rapeseed than corn-based ethanol.

## CONCLUSIONS

In Chile there is a wide range of production systems of raw materials for the production of biofuels (BC) and the crops having the higher yields of BC are maize and rapeseed.

Yields of biofuels in processing plants are directly dependent on raw materials and the process used, and on average are lower for ethanol. In addition, the energy cost of producing ethanol is about eight times higher than that of biodiesel. In ethanol, the energy balance is strongly influenced by the level of primary energy used in the production process, which depends on the technology used in the processing plant.

In the field the energy balance is determined by the productive system, especially the nitrogen rate used.

—End of the English version—



## LITERATURA CITADA

- Farrell, A.E., R. J. Plevin, B. T. Turner, A. D. Jones, M. O'Hare, and D. M. Kammen. 2006. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. *Science* 311: 506-508.
- González, J., R. Velasco, y G. Morales. 2000. Costos y rentabilidad de cultivos anuales VII y VIII regiones. Centro Regional

- de Investigación Quilamapu. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Boletín INIA No. 41. 150 p.
- Hetz H., E., y A. Berrios. 1997. Costo energético de las operaciones agrícolas mecanizadas más comunes en Chile. *Agronómia* 25 (2): 146-161.
- Hetz H., E. 1994. Utilización de energía en la producción de cultivos tradicionales. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. Boletín de Extensión N°21: 1-36.
- International Energy Agency (IEA). 2007. *World Energy Outlook 2007*. París, Francia. 663 p.
- Johnson D. 2005. Oilseed crops for energy production. Montana State University. <http://www.oconline.org/our-work/economy> (consultado: enero 2007).
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 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).
- CNE (Comisión Nacional de Energía). 2006. Estadísticas. [http://www.cne.cl/estadisticas/f\\_estadisticas.html](http://www.cne.cl/estadisticas/f_estadisticas.html) (consultado: noviembre 2006).
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 1997. Censo agropecuario. [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/censos\\_agropecuarios/censos\\_agropecuarios.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censos_agropecuarios.php) (consultado: noviembre 2006).
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2008. Estadísticas y precios. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://www.odepa.gob.cl> (consultado: marzo 2008).
- (S&T)<sup>2</sup> Consultants Inc. 2003. The addition of ethanol from wheat to GHGenius. Report to Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada, Ottawa, Ontario. K1A 0E4 24 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. Building a successful biodiesel business. Randall, H.K., and A.T. Qualio (eds). HRK Communications & Marketing (Ed). Idaho. 245 p.
- Velasco, R., y J. González. 2004. Antecedentes económicos en la producción de trigo. Centro Regional de Investigación Quilamapu. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán. Boletín INIA N° 114. 184 p.