

TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF A COMBINED BIOGAS-ETHANOL-BIODIESEL PLANT IN CENTRAL CHILE

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE UNA PLANTA COMBINADA DE BIOGAS-ETANOL-BIODIÉSEL EN EL CENTRO DE CHILE

José F. Reyes-Aroca*, Cristian A. Vidaurre-Parra

Departamento de Mecanización y Energía, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción. Vicente Méndez 595, casilla 537. Chillán, Chile. (jreyes@udec.cl) (cvidaurre@udec.cl).

ABSTRACT

The economic feasibility and the technical consistency of a system to produce biofuels were analyzed in Central Chile in the year 2010. In this study, the biodiesel, ethanol, and biogas platforms were integrated to assess the internal rate of return (IRR) and net present value (NPV) indexes. The analysis included the influence of the type of alcohol used in the manufacture of biodiesel (ethanol *versus* methanol), the effect of the relative size of the platform of ethanol with respect to biodiesel, and the impact of the value of main agricultural feedstocks. The study used combinations of plant sizes of 10 000-20 000 m³ y⁻¹ for ethanol, and 20 000-40 000 m³ y⁻¹ for biodiesel, and in all the cases the biogas platform was projected with a generating capacity of 1 MW of electricity. The mass and energy flows were obtained through the balance of mass and energy of the integrated system. All cases studied showed that the impact of the price of grain was greater for ethanol than for biodiesel. According to the economic approach based on the NPV, the system presents negative economical indexes. Sensitivity analysis showed that for production of biodiesel with both methanol and ethanol the monetary flows are negative. There was a minimal change in NPV values with different interest rates of 10, 12 and 15 %. The analysis showed that no capital increase is generated as a result of the project, for any of the three scenarios.

Key words: biofuels, fuel cost, NPV (net present value), mass-energy balance.

ABSTRACT

La viabilidad económica y la consistencia técnica de un sistema para la producción de biocombustibles se analizaron en Chile Central en el año 2010. En este estudio, las plataformas del biodiésel, etanol y biogás se integraron para evaluar los índices de la tasa interna de retorno (TIR) y el valor actual neto (VAN). El análisis incluyó la influencia del tipo de alcohol utilizado en la fabricación de biodiésel (etanol *versus* metanol), el efecto del tamaño relativo de la plataforma de etanol con respecto al biodiésel, y el impacto del valor de las principales materias primas agrícolas. El estudio usó combinaciones de tamaño de las plantas de 10 000 a 20 000 m³ año⁻¹ para etanol y 20 000 a 40 000 m³ año⁻¹ para biodiésel, y en todos los casos la plataforma de biogás se proyectó con una capacidad de generación de 1 MW de electricidad. Los flujos de masa y energía se obtuvieron a través del balance de masa y energía del sistema integrado. Todos los casos estudiados mostraron que el impacto del precio del grano fue mayor para etanol que para biodiésel. De acuerdo con el enfoque económico basado en el VAN, el sistema presenta índices económicos negativos. El análisis de sensibilidad mostró que para la producción de biodiésel con metanol y etanol, los flujos monetarios son negativos. Hubo un cambio mínimo en los valores de VAN con diferentes tasas de interés de 10, 12 y 15 %. El análisis mostró que no se genera aumento de capital como resultado del proyecto, para ninguno de los tres escenarios.

Key words: biocombustibles, costo del combustible, VAN (valor actual neto), balance masa-energía.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global, la contaminación del medio ambiente y la búsqueda de fuentes energéticas nuevas son temas de discusión en cada panel internacional. En Chile este tema tiene

*Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: September, 2012. Approved: July, 2013.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 47: 621-632. 2013.

INTRODUCTION

Global warming, the environmental pollution and the search of new energetic sources, are issues of discussion in every international panel. In Chile this topic has a high strategic meaning, due to its general relationship with the national economy, and specifically for the agricultural sector. In Chile 98 % of the energy used is imported; and 33 % of natural gas and 13 % of coal are produced in the country, while renewable energies account for 0.1 %. The high dependence on non-renewable sources, where about 47 % of the energy consumed is from petroleum and natural gas mainly imported (PROGEA, 2008), makes the country highly sensitive to price fluctuations and shortages in the supply. Therefore, a state policy for diversification and energy security, using sustainable renewable resources is a must. For the agricultural sector, this issue involves developing a clean and environmentally sustainable agriculture, which may supply energy and optimize the utilization of land resources.

In Chile, it is predictable that a policy in biofuels would have different impacts on the economy. First, a change in agriculture from food production to food production and energy products; then there should be an increased demand for agricultural products which contribute to better prices, and also an increase in food production along with its associated agricultural waste that could be converted into biofuels (Acevedo, 2006). In these areas bioethanol, biodiesel and biogas could represent a viable and beneficial alternative to some national agricultural activities.

Bioethanol is alcohol produced from the fermentation of sugar or starch from crops such as corn (*Zea mays*), sugar cane (*Saccharum officinarum*), sugar beet (*Beta vulgaris*), potatoes (*Solanum tuberosum*) and wheat (*Triticum aestivum*). Currently it is used in transportation vehicles, mixed with gasoline at different percentages (E5, E10 and blends in the USA and blends equal or higher than E85 in Brazil, Sweden and Spain). While it is possible to produce ethanol from various materials of vegetable origin, the basic procedure is much the same by using other crops feedstock. The biggest difference is in the grain milling process and alternatives are dry milling and wet milling. Both require virtually the same design

un significado estratégico alto, debido a su relación general con la economía nacional, y específicamente para el sector agrícola. En Chile, 98 % de la energía utilizada es importada, y 33 % del gas natural y 13 % del carbón se producen en el país, mientras que las energías renovables representan 0.1 %. La dependencia alta de fuentes no renovables, con alrededor de 47 % de la energía consumida proveniente del petróleo y gas natural importados principalmente (PROGEA, 2008), hacen que el país sea muy sensible a las fluctuaciones de precios y a escasez en el suministro. Por tanto, una política de estado para la diversificación y la seguridad energética, usando recursos renovables sostenibles es imprescindible. Para el sector agrícola, esta cuestión implica el desarrollo de una agricultura limpia y ambientalmente sostenible, que pueda suministrar energía y optimizar la utilización de los recursos de la tierra.

En Chile es previsible que una política de biocombustibles tendría impactos diferentes en la economía. Primero, un cambio en la agricultura de producción de alimentos a la producción de alimentos y productos energéticos; luego habría un aumento en la demanda de productos agrícolas que contribuyan a mejores precios, y también aumentaría la producción de alimentos junto con sus residuos agrícolas asociados que se podrían convertir en biocombustibles (Acevedo, 2006). En estas áreas el bioetanol, biodiésel y biogás podrían representar una alternativa viable y provechosa para algunas actividades agrícolas nacionales.

El bioetanol es alcohol producido por la fermentación de azúcar o almidón de cultivos, como maíz (*Zea mays*), la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), remolacha (*Beta vulgaris*), patatas (*Solanum tuberosum*) y trigo (*Triticum aestivum*). Actualmente se usa en vehículos de transporte, mezclado con gasolina en diferentes porcentajes (E5, E10 y se mezcla en EE.UU. y se mezcla igual o más que E85 en Brasil, Suecia y España). Aunque es posible producir etanol con diversos materiales de origen vegetal, el procedimiento básico es casi el mismo usando materia prima de cultivos diferentes. La diferencia mayor está en el proceso de molienda del grano y las alternativas son molienda seca y húmeda. Ambas requieren prácticamente el mismo diseño de planta industrial, e involucran procesos similares de producción. El proceso de molienda seca tiene más costo energético y económico asociado,

of industrial plant, and involve similar production processes. The dry milling process has more energy and economic cost associated, since it includes drying the milling waste to generate a product to market as DDGS (dry distiller grain stillage). Wet milling requires that the byproduct generated goes quickly to final destination, since the presence of moisture causes rapid decomposition, and creates many logistical problems.

The technologies for producing ethanol using raw materials rich in starch, such as corn and wheat, are economically feasible and successfully implemented by the Chilean agriculture (McMillan, 1997; McAloon *et al.*, 2000; Shapouri and Gallagher, 2005; Dale and Tyner, 2006). The production of biodiesel oil can be obtained from different plants grown in the country, such as sunflower (*Helianthus annuus*) and rapeseed (*Brassica napus*). However, unlike the production of ethanol, for biodiesel there are three processes of production: transesterification with alkaline catalysis, transesterification with acid catalysis, and oil conversion into fatty acids and then to biodiesel. Worldwide, installed biodiesel plants use the first process, due to its high rate of return (about 98 % conversion of oil into biodiesel), minimal side effects, short reaction time and conversion to biodiesel with no intermediate compounds, and no special materials are required for the infrastructure of the plant. Technologies to produce biodiesel from rapeseed, that exist worldwide, indicate some interesting feasibility conclusions which can be applied to the production of biodiesel in Chile (Van Dyne and Raymer, 1992; Knothe, 2001; Meher *et al.*, 2006). Additionally, there is proven technology globally and economically feasible that allows processing organic material through anaerobic processes to produce biogas, with methane content suitable for power generation (Nallathambi, 1997; Mata-Alvarez *et al.*, 2000; Chynoweth *et al.*, 2001). Biogas is a fuel that is generated naturally or artificially by the digestion or degradation of organic matter, through the action of anaerobic microorganisms. Biogas is composed primarily of methane (CH_4), 50 % to 70 %, carbon dioxide (CO_2), 30 % to 40 %, and other marginal gases, below 1 %. The greater or lesser proportion of these elements, depend on the type of organic matter and how is

ya que incluye el secado de los residuos de la molienda para generar un producto para el mercado como DDGS (sedimentos de granos secos de destilería con solubles). La molienda húmeda requiere que el subproducto generado pase rápidamente al destino final, porque la presencia de humedad causa descomposición rápida y crea muchos problemas logísticos.

Las tecnologías para producir etanol utilizando materias primas ricas en almidón, como maíz y trigo, son económicamente factibles y aplicadas con éxito por la agricultura chilena (McAloon *et al.*, 2000; Shapouri y Gallagher, 2005; Dale y Tyner, 2006). La producción de aceite biodiésel puede obtenerse con diferentes plantas cultivadas en el país, como girasol (*Helianthus annuus*) y raps (*Brassica napus*). Sin embargo, a diferencia de la producción de etanol, para biodiésel hay tres procesos de producción: transesterificación con catálisis alcalina, transesterificación con catálisis ácida, y conversión de aceite en ácidos grasos y luego a biodiésel. En el mundo, las plantas instaladas de biodiésel usan el primer proceso, por su tasa de retorno alta (aproximadamente 98 % de conversión de aceite en biodiésel), efectos secundarios mínimos, tiempo de reacción corto y conversión a biodiésel sin compuestos intermedios, y no se requieren materiales especiales para la infraestructura de la planta. Tecnologías para producir biodiésel con raps, que existen en el mundo, indican algunas conclusiones interesantes de viabilidad que pueden aplicarse a la producción de biodiésel en Chile (Van Dyne y Raymer, 1992; Knothe, 2001; Meher *et al.*, 2006). Además, existe tecnología probada mundialmente y económicamente viable que permite transformar material orgánico a través de procesos anaeróbicos para producir biogás, con contenido de metano adecuado para la generación de potencia (Nallathambi, 1997; Mata-Álvarez *et al.*, 2000; Chynoweth *et al.*, 2001). El biogás es un combustible generado natural o artificialmente por la digestión o degradación de materia orgánica, a través de la acción de microorganismos anaeróbicos. El biogás se compone principalmente de metano (CH_4), 50 % a 70 %, dióxido de carbono (CO_2), 30 % a 40 %, y otros gases, menos de 1 %. La mayor o menor proporción de estos elementos depende del tipo de materia orgánica y cómo se genera. Entre los recursos disponibles y considerados, hay residuos procedentes de la producción de biomasa o de las actividades humanas, los purines

generated. Within the available resources that are considered, there is waste coming from biomass production or human activities, slurry from dairy, cattle, swine and poultry, slaughterhouse waste, agro industrial waste, waste of the wine industry, residential and industrial waste, sewage treatment plants and garbage dumps.

The main purpose of this research was the economic analysis of an integrated system of production of biofuels, using indicators of net present value (NPV) and internal rate of return (IRR) of the productive facility. There will be an assessment of the private profitability, involving the analysis of the influence of specific types of alcohol as input in the production of biodiesel, ethanol or methanol, the effect of the relative size of the productive platform of ethanol with respect to the size of the biodiesel platform, the impact of the cost of agricultural inputs, maize and rapeseed and the consumer price of petrol and diesel. International prices were used in the analysis, because Chile is one of the most open economies in the world, and every internal economic activity has to be compared internationally in terms of costs to check their economic feasibility; which, to produce biofuels has to be permanently assessed locally, as there is a constant change in prices of the agricultural feedstocks and fossil fuels. One Chilean study in that direction was carried out by Ortega *et al.* (2007), to evaluate the economical feasibility to elaborate biodiesel and bioethanol from typical local crops.

MATERIALS AND METHODS

General considerations

Actual technological concepts associated to production of biogas through organic waste from agriculture, production of ethanol with corn and other grains, and production of biodiesel from rapeseed, were applied. These commercial technologies currently in use allow proposing a possible conceptual plant design, consisting of three productive lines or processing platforms, with a production capacity according to the possibilities of supplying inputs in the area of influence of the bioenergetic complex (Figure 1). Based on the possible configurations for the processes and plant sizes, economic parameters for the private economic evaluation of the project were used to measure the effect of each of the technical options investigated, in the profitability of the project. The economic

de vacas lecheras, bovinos para carne, porcino y aves, residuos de mataderos, desechos agroindustriales, residuos de la industria del vino, residuos residenciales e industriales, plantas de tratamiento de aguas residuales y vertederos de basura.

El objetivo principal de esta investigación fue el análisis económico de un sistema integrado de producción de biocombustibles, usando indicadores de valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) de la planta productiva. Habrá una evaluación de la rentabilidad privada, involucrando el análisis de la influencia de los tipos específicos de alcohol como insumo en la producción de biodiésel, etanol o metanol, el efecto del tamaño relativo de la plataforma productiva de etanol con respecto al tamaño de la plataforma de biodiésel, el impacto del costo de insumos agrícolas, maíz, raps y el precio al consumidor de la gasolina y el diésel. Los precios internacionales se usaron en el análisis, porque Chile es una de las economías más abiertas del mundo, y cada actividad económica interna debe ser comparada internacionalmente en términos de costos para comprobar su viabilidad económica, la cual, para producir biocombustibles debe ser evaluada de forma local y permanente, porque hay un cambio constante de precios de materias primas agrícolas y combustibles fósiles. Ortega *et al.* (2007) realizaron un estudio chileno en esa dirección para evaluar la viabilidad económica para elaborar biodiésel y bioetanol con cultivos típicos locales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Consideraciones generales

Conceptos tecnológicos actuales asociados a producción de biogás a través de residuos orgánicos provenientes de la agricultura, producción de etanol con maíz y otros granos, y producción de biodiésel con raps, fueron aplicados. Estas tecnologías comerciales actualmente en uso permiten proponer un posible diseño conceptual de la planta, que consta de tres líneas productivas o plataformas de procesamiento, con una capacidad de producción de acuerdo con las posibilidades de suministrar insumos en el área de influencia del complejo bioenergético (Figura 1). Con base en las configuraciones posibles para los procesos y tamaños de plantas, parámetros económicos para la evaluación económica privada del proyecto fueron usados para medir el efecto de cada una de las opciones técnicas investigadas

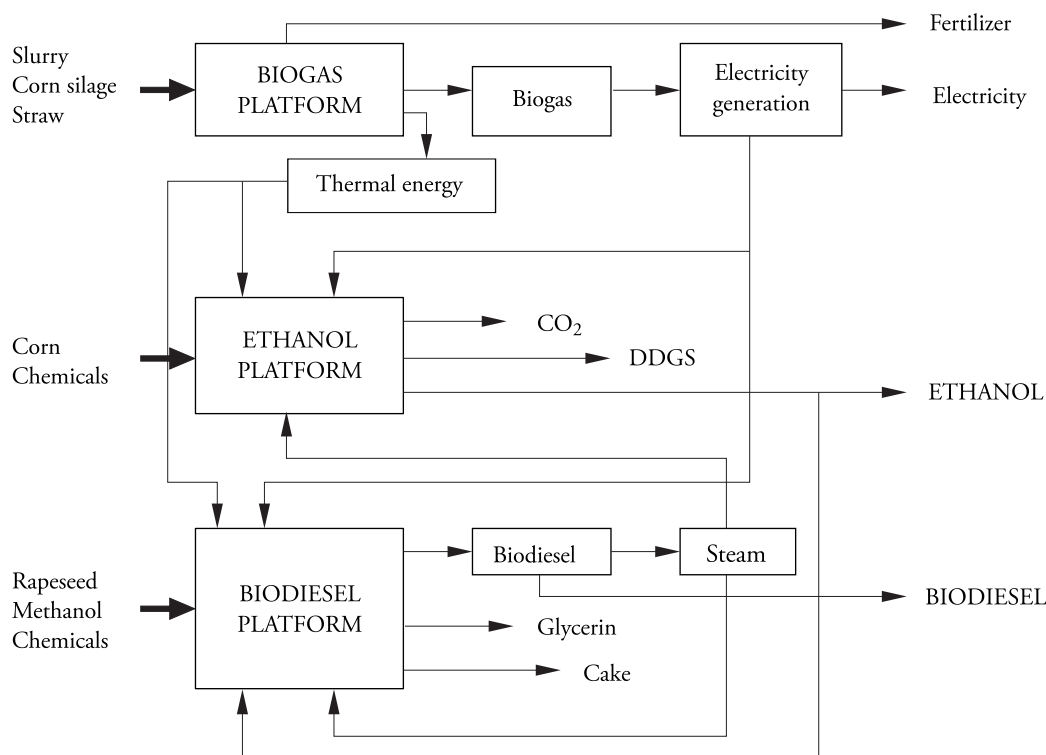


Figure 1. Flow diagram of the integrated bioenergy plant.
Figura 1. Diagrama de flujo de la planta de bioenergía integrada.

variables NPV and IRR were assessed for each combination of technical design parameters of the complex. Data of production, investment and operation costs and prices of different items under study were collected from literature, for each fuel of the platforms (biogas, bioethanol and biodiesel). Among different feasible production processes, dry-milling was selected for ethanol, and transesterification of the rapeseed oil with an alkaline catalyst was selected for biodiesel production. The definition of these processes is crucial because there are technological differences with respect to alternative processes, which can cause considerable amounts of investment and operational costs.

Ethanol

The main inputs required in ethanol production by type of feedstock are approximate averages, but, closely represent the magnitude of the main inputs required per L of ethanol produced. With regard to input costs to produce 1 L of ethanol, the prices were reported by several national producers and distributors (Table 1). Additionally, the prices of grains for ethanol were those of July 2008 reported by ODEPA (2008), whose value was US\$ 276.8 t⁻¹. With respect to the corn yield, the proposed figure was 12 000 kg ha⁻¹, value that is

en la rentabilidad del proyecto. Las variables económicas VAN y TIR se evaluaron para cada combinación de parámetros de diseño técnico del complejo. Los datos de producción, costos de inversión y operación y precios de diferentes productos en estudio se obtuvieron de la literatura, para cada combustible de las plataformas (biogás, bioetanol y biodiésel). Entre los diferentes procesos de producción viables, se seleccionó la molienda en seco para el etanol, y la transesterificación del aceite de raps con un catalizador alcalino se seleccionó para la producción de biodiésel. La definición de estos procesos es crucial porque hay diferencias tecnológicas con respecto a procesos alternativos, que pueden causar grandes cantidades de inversión y costos operativos.

Etanol

Los principales insumos requeridos para producción de etanol por tipo de materia prima son promedios aproximados, pero representan cercanamente la magnitud de los principales insumos requeridos por L de etanol producido. Respecto a los costos de insumos para producir 1 L de etanol, los precios fueron reportados por varios productores y distribuidores nacionales (Cuadro 1). Además, el precio de los granos para etanol fue el de julio 2008, reportado por ODEPA (2008) y

Table 1. Approximate cost of feedstock to produce 1 L of ethanol[†].**Cuadro 1. Costo aproximado de la materia prima para producir 1 L de etanol[†].**

Input	Quantity	Cost (US\$ L ⁻¹)
Natural gas	11.2 (MJ)	0.2532
Electricity	0.1175 (kWh)	0.0075
Diesel	0.00016 (L)	0.0002
Caustic soda	0.0058 (kg)	0.0093
Sulfuric acid	0.011 (kg)	0.0006
Ammonia	0.022 (kg)	0.0036
Water	5.0 (L)	0.0028 ^e

[†]Vidaurre (2008; personal communication).

achievable under a contract farming system in Chile (Ortega *et al.*, 2007). The conversion factor for the acquisition of ethanol was set at 0.4 L kg⁻¹ of maize entering the plant (CATA, 2007). In order to quantify the income, DDGS was valued at US\$ 116 t⁻¹ and liquid CO₂ had a price of US\$ 6 t⁻¹. The costs data associated with the construction of the plant were from studies in Europe and USA. This data allowed estimating the capital investment for different plant sizes (Figure 2). Besides, the economic analysis includes the fact that ethanol is tax free according to Chilean tax policies for biofuels. The sale price of 1 L of ethanol was set by adding 20 % of profit to the cost to produce it.

Biodiesel

Input costs to produce biodiesel in terms of services, maintenance, supplies and administrative were based on data collected from feasibility studies (Haas *et al.*, 2006). Feedstock inputs and unit prices to produce 1 L of biodiesel

fue US\$ 276.8 t⁻¹. Respecto al rendimiento de maíz, la cifra propuesta fue 12 000 kg ha⁻¹, valor factible en un sistema de agricultura por contrato en Chile (Ortega *et al.*, 2007). El factor de conversión para la adquisición de etanol se fijó en 0.4 L kg⁻¹ de maíz que entra en la planta (CATA, 2007). Para cuantificar los ingresos, el DDGS se valoró en US\$ 116 t⁻¹ y el precio del CO₂ líquido fue US\$ 6 t⁻¹. Los datos de los costos asociados con la construcción de la planta fueron de estudios realizados en Europa y EE.UU. Esta información permitió estimar la inversión de capital para los diferentes tamaños de las plantas (Figura 2). Además, el análisis económico incluyó el hecho de que el etanol está libre de impuestos de acuerdo con las políticas tributarias chilenas para biocombustibles. El precio de venta de 1 L de etanol se fijó añadiendo 20 % de la ganancia al costo para producirlo.

Biodiésel

Los costos de insumos para producir biodiésel en términos de servicios, mantenimiento, suministros y administración se basaron en datos obtenidos de estudios de viabilidad (Haas *et al.*, 2006). Los insumos de materias primas y los precios unitarios para producir 1 L de biodiésel fueron considerados en la evaluación de costos, de acuerdo con las cifras facilitadas por varios productores y distribuidores (Cuadro 2). El precio de venta de semilla de raps provino de información de publicaciones comerciales (Van Gerpen *et al.*, 2005 y Van Kasteren y Nisworo, 2007), de algunos estudios detallados de plantas que producen biodiésel. Respecto al costo de la instalación de una planta de biodiésel, ya que no hay experiencia en Chile, la información se obtuvo de fuentes internacionales, principalmente de EE.UU. y Europa (Howell, 2005), para ajustar una curva de costo versus planta (Figura 3). Los precios del raps para la evaluación económica se basan en datos reportados por Iglesias (2009). Los

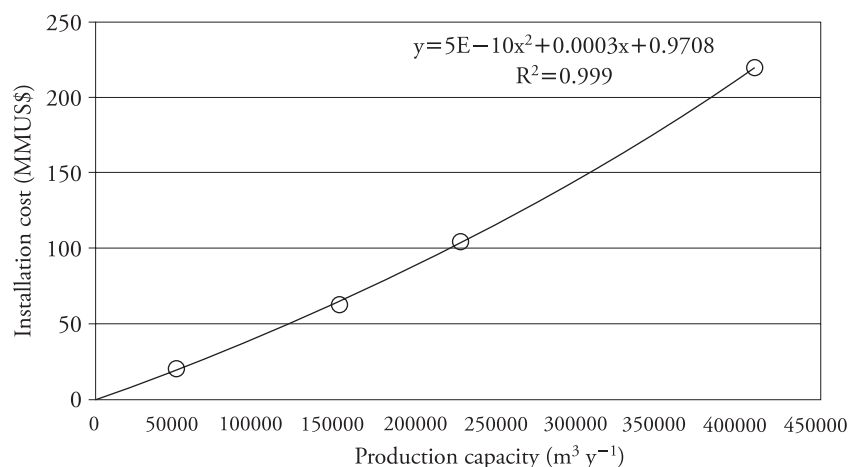


Figure 2. Construction cost of an ethanol plant based on its annual capacity.

Figure 2. Costo de construcción de una planta de etanol con base en su capacidad anual.

were considered in the cost assessment, according to the figures supplied by several producers and distributors (Table 2). The sale price of rapeseed was data obtained from trade publications (Van Gerpen *et al.*, 2005 and Van Kasteren and Nisworo, 2007), of some detailed studies of plants producing biodiesel. With respect to the cost of installation of a biodiesel plant, as there is no experience in Chile, this information was obtained from international sources, mainly USA and Europe (Howell, 2005), to fit a curve of cost versus plant (Figure 3). Rapeseed prices for the economic evaluation were based on data reported by Iglesias (2009). The prices for rapeseed fluctuated between Ch\$ 350 t⁻¹ and Ch\$ 365 t⁻¹. Considering the production process as the one of transesterification of rapeseed oil using base catalyst, typical yields of biodiesel, glycerin and dry cake per ton of grain were used (Table 3). The final price at which the biodiesel can be traded was obtained through the sum of costs to produce 1 L plus 20 % profit.

Biogas

This study proposes a biogas platform with power capacity of 1 MW, based on a dairy facility generating biogas by anaerobic digestion of slurry plus silage and straw. For the purpose of the mass and energy balance, the mass contribution was assumed 33.3 % for each of those substrates, according to their availability. To calculate the cost of producing biogas and its equivalent electric energy in kWh, the model of Walla and Schneeberger (2008) was used. This model combine all the associated costs involved in the generation of 1 kWh for different sizes of power, measured in kW (Figure 4). It is assumed that the cost of transporting the substrates is negligible since they are generated near to the processing facilities. Costs of construction were based on the model generated by Walla and Schneeberger (2003) for

precios del raps variaron entre Ch\$ 350 t⁻¹ y Ch\$ 365 t⁻¹. Considerando el proceso de producción como el de transesterificación de aceite de raps usando catalizador básico, se utilizaron rendimientos típicos de biodiésel, glicerina y torta seca por tonelada de grano (Cuadro 3). El precio final en que el biodiésel puede comercializarse se obtuvo a través de la suma de los costos para producir 1 L más 20 % de ganancia.

Biogás

Este estudio propone una plataforma de biogás con capacidad de potencia de 1 MW, sobre la base de una instalación lechera generando biogás mediante digestión anaeróbica de purines más ensilado y paja. Para el propósito del balance de masa y energía, la contribución de masa se consideró 33.3 % de cada sustrato, de acuerdo con su disponibilidad. Para calcular el costo de producción de biogás y su energía eléctrica equivalente en kWh, se usó el modelo de Walla y Schneeberger (2008). Este modelo combina todos los costos asociados implicados en la generación de 1 kWh para diferentes tamaños de

Table 2. Approximate cost of feedstock to produce a liter of biodiesel[†].

Cuadro 2. Costo aproximado de material prima para producir un litro de biodiésel[†].

Input	Quantity	Cost (US\$ L ⁻¹)
Chloridric acid	0.008 (kg)	0.0151
Electricity	0.025 (kWh)	0.2304
Methanol	0.104 (kg)	0.0687
Caustic soda	0.0144 (kg)	0.0316
Natural gas	1.4 (MJ)	0.0016
Water	0.3822 (L)	0.0002

[†]Van Gerpen *et al.* (2005), Fortenbery (2005).

Figure 3. Construction cost of a biodiesel plant based on its annual capacity.

Figura 3. Costo de construcción de una planta de biodiésel con base en su capacidad anual.

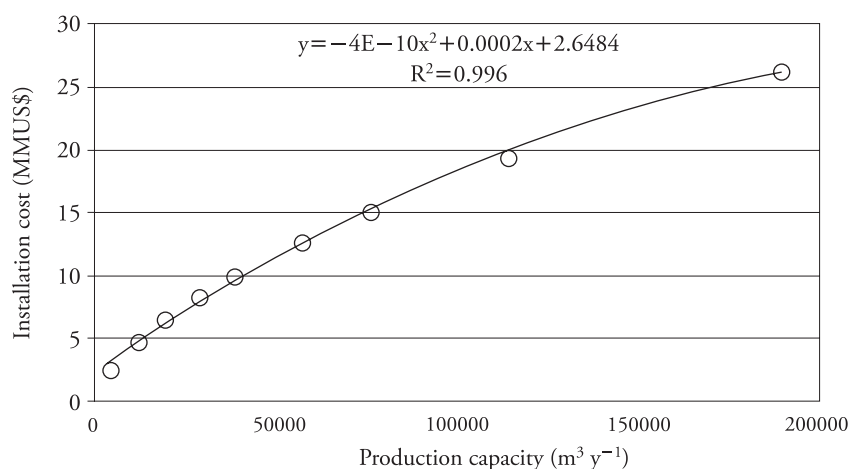


Table 3. Yield in biodiesel production from rapeseed.**Cuadro 3. Rendimiento en producción de biodiésel con raps.**

Product	Yield (t^{-1} of rapeseed)
Biodiesel	0.42 m^3
Dried cake	580 kg
Glycerin	0.042 m^3

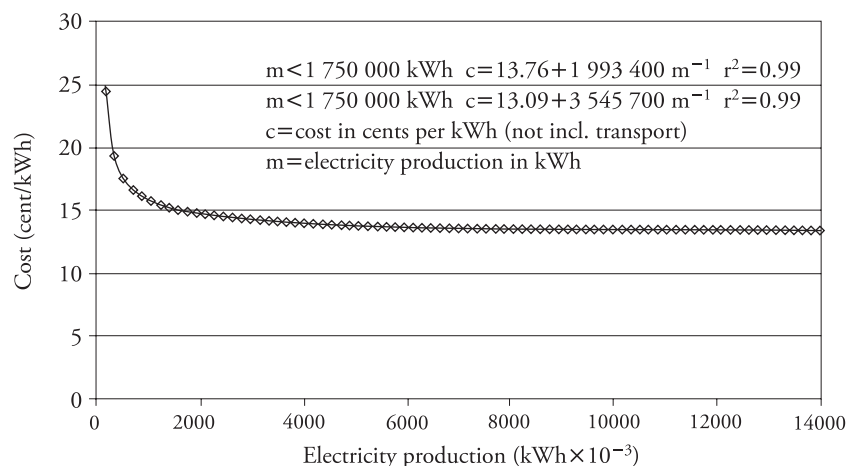
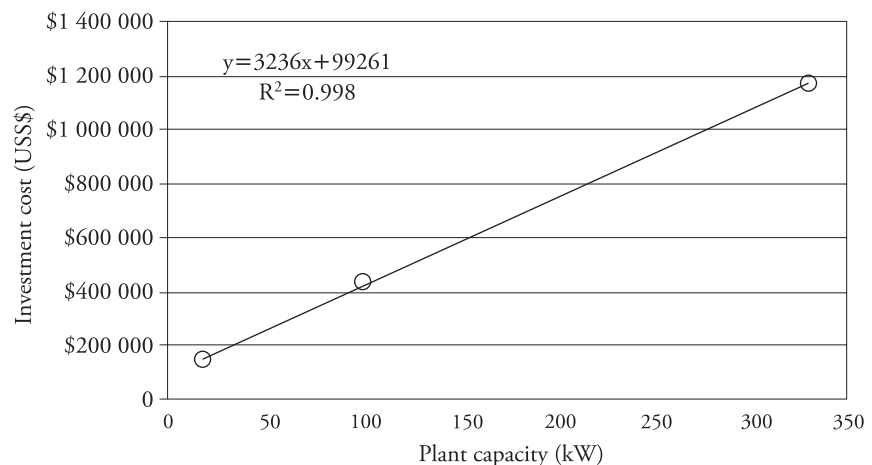
†CATA (2007).

plant capacities up to 350 kW (Figure 5). The surplus energy, or unused electricity from the biogas platform was valued at US\$ 0.064 kWh^{-1} . The calorific value of the biogas used to generate electricity was set at 38.93 MJm^{-3} .

A mass and energy balance was carried out considering the integrated operation of the three bio energy platforms, which was used to perform the economical simulation of the energy production system. The economical analysis of the plant was performed with respect to the type of alcohol used

potencia, medidos en kW (Figura 4). Se supone que el costo de transportar los sustratos es insignificante, ya que se generan cerca de las instalaciones de procesamiento. Los costos de construcción se basaron en el modelo generado por Walla y Schneeberger (2003) para capacidades de la planta hasta 350 kW (Figura 5). El exceso de energía o electricidad no usada de la plataforma de biogás se valoró en US\$ 0.064 kWh^{-1} . El valor calorífico del biogás usado para generar electricidad se fijó en 38.93 MJm^{-3} .

Un balance de masa y energía se realizó considerando el funcionamiento integrado de las tres plataformas de bioenergía usado para realizar la simulación económica del sistema de producción de energía. El análisis económico de la planta se realizó con respecto al tipo de alcohol usado para elaborar biodiésel (etanol *versus* metanol), y el tamaño relativo de la plataforma de etanol con respecto al biodiésel. El estudio evaluó cuatro combinaciones de tamaños de plantas con capacidad de 10 000 a 20 000 para etanol, y 20 000 a 40 000 $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ para biodiésel, y en todos los casos la plataforma de biogás se proyectó

**Figure 4. Cost of production of a plant of biogas based on installed power (Walla and Schneeberger, 2008).****Figura 4. Costo de producción de una planta de biogás con base a la potencia instalada (Walla y Schneeberger, 2008).****Figure 5. Cost of installation of a plant of biogas (Walla and Schneeberger, 2008).****Figura 5. Costo de instalación de una planta de biogás (Walla y Schneeberger, 2008).**

in the manufacture of biodiesel (ethanol *versus* methanol), and the relative size of the platform of ethanol with respect to biodiesel. The study assessed four combinations of plant sizes with capacities of 10 000-20 000 for ethanol, and 20 000-40 000 $\text{m}^3 \text{y}^{-1}$ for biodiesel, and in all the cases the biogas platform was projected with a generating capacity of 1 MW of electricity, to assess their influence on the final cost per liter of bio fuel. Four scenarios were studied for the integrated system (Table 4). In order to find certain indicators of profitability that could demonstrate the viability of the project, a sensitivity analysis with respect to interest rates (10, 12 and 15 %) employing either methanol or ethanol was carried out. Average cost of grain was used in all cases. In the calculation of NPV and IRR the evaluation horizon was set at 12 years while the depreciation of the plant was estimated at 20 years. In addition, a theoretical maximum usage of the plant capacity was considered, which means all the personnel and equipment operating at maximum efficiency, using 100 % capacity of the plant.

RESULTS AND DISCUSSION

The final price of 1 L of ethanol and biodiesel, obtained from costs associated to different combinations of production capacity, indicated minor differences in the cost per liter of fuel (Table 5). These production costs for biodiesel and ethanol include the energy cost due to the electricity supplied by the biogas platform. With a variation of 15 % in the cost of corn for ethanol and rapeseed for biodiesel, the variation of the cost of each L at the biofuel plant output, generate a proportional increase or decrease in value for every kg of grain with magnitude of ± 12 % for biodiesel and ± 13 % for ethanol. Weston and Brigham (1984), Brealey and Myers (1985) and Belli (1996), acknowledge the difficulty of applying the criterion

con una capacidad generadora de 1 MW de electricidad, para evaluar su influencia en el costo final por litro de biocombustible. Cuatro escenarios se estudiaron para el sistema integrado (Cuadro 4). Para encontrar ciertos indicadores de rentabilidad que pudieran demostrar la viabilidad del proyecto, se realizó un análisis de sensibilidad con respecto a las tasas de interés (10, 12 y 15 %) empleando ya sea metanol o etanol. En todos los casos se usó el costo promedio del grano. En el cálculo del VAN y la TIR el horizonte de evaluación se fijó en 12 años, mientras que la depreciación de la planta se estimó en 20 años. Además, se consideró un uso máximo teórico de la capacidad de la planta, lo que significa que todo el personal y equipos operan con máxima eficiencia, usando la capacidad de la planta al 100 %.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El precio final de 1 L de etanol y biodiésel, obtenido de los costos asociados a diferentes combinaciones de capacidad de producción, indicó diferencias menores en el costo por litro de combustible (Tabla 5). Estos costos de producción de biodiésel y etanol incluyeron el costo de energía debido a la electricidad suministrada por la plataforma de biogás.

Table 4. Productive combinations of the integrated plant with electricity power of 1 MW from biogas platform.

Cuadro 4. Combinaciones productivas de la planta integrada con energía eléctrica de 1 MW de la plataforma de biogás.

Case	Ethanol ($\text{m}^3 \text{y}^{-1}$) Net volume	Biodiesel ($\text{m}^3 \text{y}^{-1}$) Net volume
1	20 000	20 000
2	20 000	40 000
3	10 000	20 000
4	10 000	40 000

Table 5. Selling value of the fuel produced in the integrated plant based on production costs.

Table 5. Valor de venta del combustible producido en la planta integrada con base en los costos de producción.

Case	Volume (m^3) ($\text{m}^3 \text{y}^{-1}$)		Cost (US\$ L^{-1})		Sell price (US\$ L^{-1})	
	ethanol	biodiesel	ethanol	biodiesel	ethanol	biodiesel
1	24 690	29 200	0.844	1.18	1.0	1.4
2	28 230	51 244	0.837	1.17	1.0	1.4
3	14 115	25 622	0.847	1.19	1.0	1.4
4	17 656	47 666	0.845	1.17	1.0	1.4

of the IRR for the lack of good properties of this indicator to define the feasibility of an inversion project. The economic analysis of the four cases for different interest rates and considering biodiesel production from methanol *versus* ethanol did not allow calculating the IRR (Figures 6 and 7).

Rocabert (2006) considers that a project is unfeasible if all cash flows are non positive. The NPV in such cases is always negative, its slope is always positive and there is no IRR. This study clearly reveals the characteristics listed above, where the slope of the NPV is always positive (Figures 6 and 7). Besides, the final price per L in the case of producing biodiesel from methanol *versus* ethanol, varied between 1 and 1.5 %. The values of NPV were all negatives and its differences ranged between 4.7 and 10 %. The analysis showed that there is no capital increase as a result of the project for any of the scenarios studied.

Con una variación del 15 % en el costo de maíz para el etanol y raps para el biodiésel, la variación del costo de cada L puesto a la salida de la planta del biocombustible, genera un aumento o disminución proporcional en el valor por cada kg de grano con magnitud de ± 12 % para biodiésel y ± 13 % para etanol. Weston y Brigham (1984), Brealey y Myers (1985) y Belli (1996), reconocen la dificultad de aplicar el criterio de la TIR por la falta de buenas propiedades de este indicador para definir la viabilidad de un proyecto inversión. El análisis económico de los cuatro casos para diferentes tipos de interés y considerando la producción de biodiésel con metanol *versus* etanol no permitió calcular la TIR (Figuras 6 y 7).

Rocabert (2006) considera que un proyecto no es factible si todos los flujos de efectivo no son positivos. El VPN en tales casos es siempre negativo, su pendiente es siempre positiva y no hay TIR. Este estudio revela claramente las características

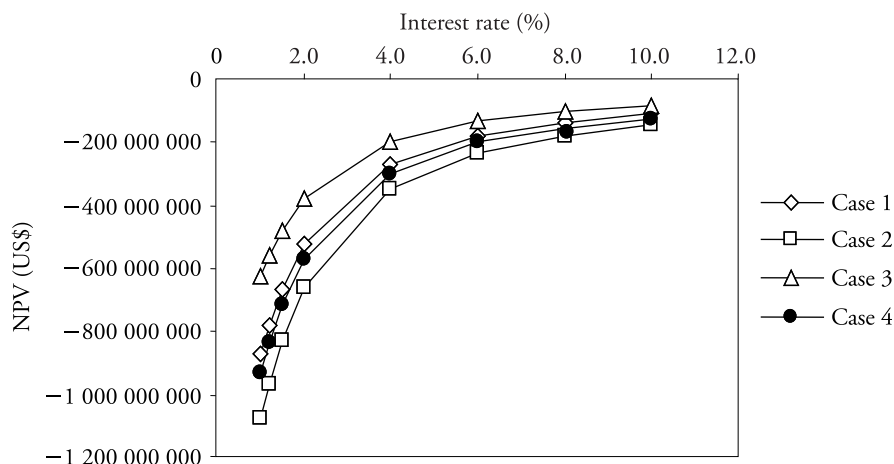
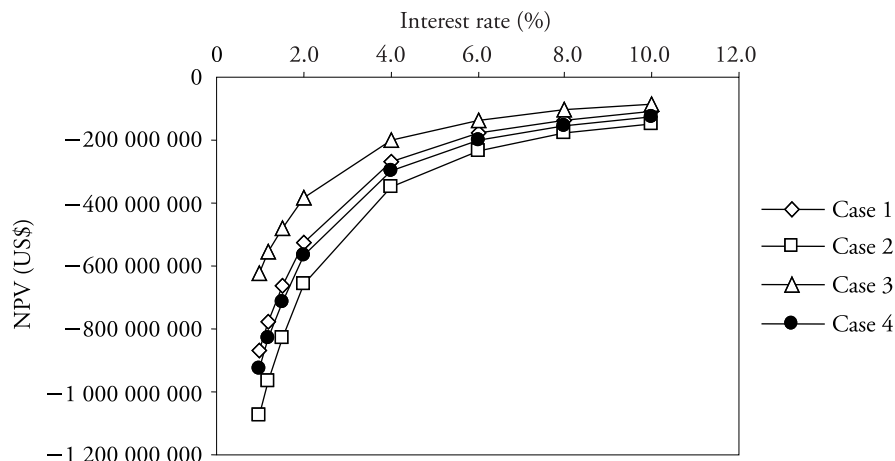


Figure 6. Analysis of the net present value for the integrated plant, when using methanol to produce biodiesel.

Figura 6. Análisis del valor actual neto de la planta integrada, al utilizar metanol para producir biodiésel.

Figure 7. Analysis of the net present value for the integrated plant, when using ethanol to produce biodiesel.

Figura 7. Análisis del valor actual neto de la planta integrada, al utilizar etanol para producir biodiésel.



CONCLUSIONS

According to the economic criteria based on the net present value, the annual money flows of the plant generate losses. There were minor cost differences to produce biodiesel using methanol or ethanol as alcohol source. With either methanol or ethanol to produce biodiesel, the economic flows of the plant are negative, net present value is negative, it has positive slope when plotting against the interest rate, and it is not possible to calculate the internal rate of return. Nevertheless, the fuel combination with mayor contribution of biogas to the total fuel production generates less negative money flows. The investment cost of the plant is dependable of the fuel production capacity, being higher for the highest capacity production of the ethanol and biodiesel combination, at the same biogas production capacity. The impact of the price of grain on the final production cost of both ethanol and biodiesel turned out to be critical. This dependence is greater for ethanol than for biodiesel. It is clear that the implementation of a biofuel production facility which produce a combination of biodiesel, ethanol and biogas, does not show economical feasibility, mainly due to the high cost of producing ethanol and mainly biodiesel.

LITERATURE CITED

- Acevedo, E. 2006. Agroenergía un desafío para Chile. CIENCIAS AGRONOMICAS N° 11 UNIVERSIDAD DE CHILE SERIE Santiago. Chile. pp: 8.
- Belli, P. 1996. Handbook on economic analysis of investment operations research. Policy Department, The World Bank. Washington DC. 160 p.
- Brealey, R., and S. Myers. 1985. Principles of Corporate Finance. 7^a Ed. 2003. Mc Graw-Hill. Nueva York. 1330 p.
- CATA (Centro Avanzado de Tecnología para la Agricultura). 2007. Evaluación del Potencial Productivo de Biocombustibles en Chile con Cultivos Agrícolas Tradicionales. Departamento de Industrias. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile. 148 p.
- Chynoweth, D., J. Owens, and R. Legrand. 2001. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. Renew. Ener. 22(1-3): 1-8.
- Dale, R., and W. Tyner. 2006. Economic analysis of dry-milling technologies. Purdue University. DOE Grant #DE-FG36-04G014220. 39 p.
- Fortenbery, T. R. 2005. Biodiesel feasibility study: An evaluation of biodiesel feasibility in Wisconsin. Staff paper Num. 481. Department of Agricultural and Applied Economics. University of Wisconsin-Madison. 36 p.
- mencionadas anteriormente, donde la pendiente del VAN es siempre positiva (Figuras 6 y 7). Además, el precio final por litro en el caso de producir biodiésel con metanol *versus* etanol, varió entre 1 y 1.5 %. Los valores de VPN fueron todos negativos, y sus diferencias oscilaron entre 4.7 y 10 %. El análisis mostró que no hay aumento de capital como resultado del proyecto para cualquiera de los escenarios estudiados.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los criterios económicos basados en el valor actual neto, el flujo de dinero anual de la planta genera pérdidas. Hubo diferencias menores en los costos para producir biodiésel con metanol o etanol como fuente de alcohol. Ya sea con metanol o etanol para producir biodiésel, los flujos económicos de la planta son negativos, el valor actual neto es negativo, tiene pendiente positiva cuando se grafica contra la tasa de interés, y no es posible calcular la tasa interna de retorno. Sin embargo, la combinación de combustible con una mayor contribución del biogás a la producción total de combustible genera flujos de dinero menos negativos. El costo de inversión de la planta depende de la capacidad de producción de combustible, siendo mayor para la más alta capacidad productiva de la combinación de etanol y biodiésel, a la misma capacidad de producción de biogás. El impacto del precio de cereales en el costo final de la producción de etanol y biodiésel resultó ser crítico. Esta dependencia es mayor para etanol que para biodiésel. Es claro que la implementación de una planta de producción de biocombustibles que produce una combinación de biodiésel, etanol y el biogás, no muestra viabilidad económica, debido principalmente al coste alto de producción de etanol y principalmente biodiésel.

—Fin de la versión en Español—



- Haas, M. J., A. J. McAloon, W. C. Yee, and T. A. Foglia. 2006. A process model to estimate biodiesel production costs. Bioresource Technol. 97: 671-678.
- Howell, S. 2005. Time to take the biodiesel plunge? Render Magazine. February: 10-14.
- Iglesias, R. 2009. Raps Canola temporadas agrícolas 2007-2008, 2008-2009. Publicación de la Oficina de Estudios

- y Políticas Agrarias – ODEPA Ministerio de Agricultura. Chile. 9 p.
- Knothe, G. 2001. Historical Perspectives on Vegetable Oil-Based Diesel Fuels. Inform, AOCS, 1107 p.
- Mata-Alvarez, J., S. Mace, and P. Llabres. 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievement and perspectives. *Bioresource Technol.* 74(1): 3-16.
- McAloon, A., F. Taylor, W. Yee, K. Ibsen, and R. Wooley. 2000. Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks, Technical Report, NREL/TP-580-28893, Golden, CO. 36 p.
- Meher, L., D. Sagar, and S. Naik. 2006. Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 10(3): 248-268.
- Nallathambi, V. 1997. Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass Bioenerg.* 13(1-2): 83-114.
- Ortega, R., R. Muñoz, L. Acosta, and C. Muñoz. 2007. Evaluación y sensibilización de estudios técnico-económicos respecto al potencial de biocombustibles en Chile. Informe final, CATA, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile. 42 p.
- PROGEA. 2008. Diseño de un Modelo de Proyección de Demanda Energética Global Nacional a Largo Plazo. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile. Chile. 282 p.
- Rocabert, J. P. 2006. Los criterios Valor Actual Neto y Tasa Interna de Rendimiento, Departamento de Economía Aplicada, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Autónoma de Barcelona. e-publica 2(2007): 1-11.
- Shapouri, H., and P. Gallagher. 2005. USDA's. 2002. Ethanol cost-of-production survey, USDA, Agricultural Economic Report Number 841. 19 p.
- Van Dyne, D., and P. Raymer. 1992. Biodiesel production potential from industrial rapeseed in the southeastern U.S. TV-86444V, Tennessee Valley Authority, Alabama. 20 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. Idaho. 245 p.
- Van Kasteren, J. M. N., and A. P. Nisworo. 2007. A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. *Resources Conserv. Recycling* 50(4): 442-458.
- Walla, C. and W. Schneeberger. 2003. Analyse der Investitionskosten und des Arbeitszeitbedarfs landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Österreich. *Berichte über Landwirtschaft* 81(4): 527-535.
- Walla, C., and W. Schneeberger. 2008. The optimal size for biogas plants. *Biomass Bioenerg.* 32(6): 551-557.