

BIOCOMBUSTIBLES EN CHILE. III. LOCALIZACIÓN SIMULTÁNEA DE CENTROS DE ACOPIO Y PLANTAS PRODUCTORAS

BIOFUELS IN CHILE. III. SIMULTANEOUS LOCALIZATION OF PLANTS AND WAREHOUSES

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

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

RESUMEN

El presente estudio aborda un problema de localización de centros de acopio y plantas productoras de etanol y biodiésel en Chile. Se propuso un modelo de localización de facilidades que minimiza los costos involucrados desde la producción de los cultivos agrícolas, hasta la distribución de los biocombustibles a los centros de consumo más importantes. Se evaluaron escenarios de 2, 5 y 10 % de sustitución de la demanda de gasolina y 2, 5 y 8 % de diésel proyectada al 2010. Se consideraron tres tamaños de planta: 40 000, 80 000 y 100 000 m³ año⁻¹ para las que producen etanol y 20 000, 40 000 y 60 000 m³ año⁻¹, para las que producen biodiésel. Las potenciales ubicaciones de las plantas de biocombustibles en su mayoría estuvieron desde la VII Región hasta la X Región, debido a la disponibilidad de los cultivos, la distancia a los centros de consumo y el valor de los suelos.

Palabras clave: problemas de localización, etanol, biodiésel.

INTRODUCCIÓN

Un elemento fundamental en un estudio de factibilidad técnico-económica para la producción de biocombustibles es determinar la localización de las plantas productoras y de los centros de acopio. Esto involucra el diseño de una estructura o red de distribución que considere todos los costos asociados (Marín y Pelegrín, 1999). Según Chopra y Meindl (2008), el diseño de una cadena de abastecimiento incluye la localización de las plantas procesadoras, el almacenamiento, el transporte de las materias primas, productos y subproductos, así

ABSTRACT

This paper addresses a problem of locating warehouses and plants producing ethanol and biodiesel in Chile. A facility location model that minimizes the costs involved from the production of agricultural crops to the distribution of biofuels to major consumption centers was proposed. Scenarios of 2, 5, and 10% substitution of gasoline demand and 2, 5, and 8% diesel projected to 2010 were evaluated. Three plant sizes were considered: 40 000, 80 000 and 100 000 m³ year⁻¹ for those producing ethanol and 20 000, 40 000 and 60 000 m³ year⁻¹, for those producing biodiesel. Potential locations of biofuel plants were mostly from Region VII to Region X, due to the availability of crops, distance to centers of consumption and soil value.

Key words: location problems, ethanol, biodiesel.

INTRODUCTION

A key element in a study of technical-economic feasibility of biofuel production is to determine the location of production plants and warehouses. This involves designing a structure or distribution system that considers all associated costs (Marín and Pelegrín, 1999). According to Chopra and Meindl (2008), the design of a supply chain includes the location of processing plants, storage, transport of raw materials, products and byproducts, as well as the allocation of capacity and functions for each component of the chain. Simultaneous localization of factories and warehouses are treated as problems of location of two or more stages (Venema and Calamar, 2003). In the first stage, products are transported from factories to warehouses, which can be considered either fixed or part of the decision problem. In the

*Autor responsable ♦ Author for correspondence.

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

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 44: 861-872. 2010.

como la asignación de capacidad y funciones a cada componente de la cadena. La localización simultánea de fábricas y depósitos se tratan como problemas de localización de dos o más etapas (Venema y Calamar, 2003). En la primera etapa, los productos son transportados de las fábricas a los depósitos, los que pueden ser considerados fijos o formar parte del problema de decisión. En una segunda etapa los productos son transportados de los depósitos a los clientes (Kaufman *et al.*, 1977; Gao y Robinson, 1992).

Este artículo corresponde a la parte III del estudio de potencial de producción de biocombustibles en Chile, y su objetivo fue determinar la localización para las plantas productoras de biocombustibles y los centros de acopios (para granos, biocombustibles y subproductos).

MATERIALES Y MÉTODOS

Un objetivo en el estudio fue la diversificación de la matriz energética, donde se permite la importación ya sea de grano o biocombustible (es decir, considera una economía abierta); en este caso la localización recomendada sería cerca de un puerto. En el presente caso se evaluó la localización de las instalaciones cuando el objetivo es la independencia energética (es decir, con una economía cerrada a las importaciones de materias primas o biocombustibles).

En este estudio se desarrolló un modelo de localización de plantas productoras y centros de acopio que proporciona dos tipos de resultados: el primero indica el lugar donde deberían ubicarse estas instalaciones y el segundo asigna los flujos de granos, productos y subproductos. Para ello se consideraron las 24 provincias entre la Región Metropolitana y la X Región de Chile. Se propuso diseñar dos redes de abastecimiento, una para etanol y otra para biodiésel. En la Figura 1 se presenta la estructura general de la red propuesta; sus componentes fueron:

- 1) Áreas de cultivo: las provincias donde se producen los granos para la producción de biocombustibles. La información de las áreas de cultivo corresponde a datos de entrada para el modelo, mientras que la cantidad de grano producida en cada una de ellas corresponde a una salida del modelo. Los granos fueron: arroz (*Oryza sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.) para la producción de etanol y maravilla (*Helianthus annuus* L.) y raps (*Brassica napus* L.) para la producción de biodiésel. Se consideró que una provincia podía tener hasta seis zonas agro-ecológicas para cada cultivo: valle central de riego, valle central de secano, secano interior, secano de precordillera, secano costero y suelos de

second stage the products are transported from the warehouses to customers (Kaufman *et al.*, 1977; Gao and Robinson, 1992).

This article corresponds to the third part of a study dealing with the potential production of biofuels in Chile, and its objective was to determine the location of biofuel production plants and warehouses (for grains, and biofuels and byproducts).

MATERIALS AND METHODS

An objective in the study was to diversify the energy matrix, which allows the import of either grain or biofuel (that is, it considers an open economy); in this case the recommended location for a production facility would be near a port. In this case the location of these facilities was evaluated when the objective is the energy independence (that is, with an economy closed to imports of raw materials or biofuels).

In this paper a model for locating production plants and warehouses was developed; the model provides two types of results: the first shows where these facilities should be located and the second assigns the flows of grains, products and byproducts. For this purpose the 24 provinces between the Metropolitan Region and Region X of Chile were considered. It was proposed to design two supply networks, one for ethanol and one for biodiesel. The general structure of the proposed network is shown in Figure 1; their components were:

- 1) Cultivation area: provinces where grains are produced for biofuel production. The information of the cultivation areas corresponds to input data for the model, while the amount of grain produced in each area corresponds to an output of the model. The grains were: rice (*Oryza sativa* L.), corn (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) for ethanol production and sunflower (*Helianthus annuus* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) for biofuel production. It was considered that a province could have up to six agro-ecological zones for each crop: irrigated central valley, dryland central valley, interior dryland, Andean dryland foothills, coastal dryland, and rice soils. With this background the agro-ecological zones were established, the potential crops were defined, and the maximum area that can be allocated to each type of crop was obtained; and besides, the maximum area that can be used for each agro-ecological zone considering all crop types together, the yield for each type of crop depending on the agro-ecological zone, the cost to obtain the grain by each type of crop (considering that the price for each type of grain is the same in all provinces) and the land rent by alternative uses.

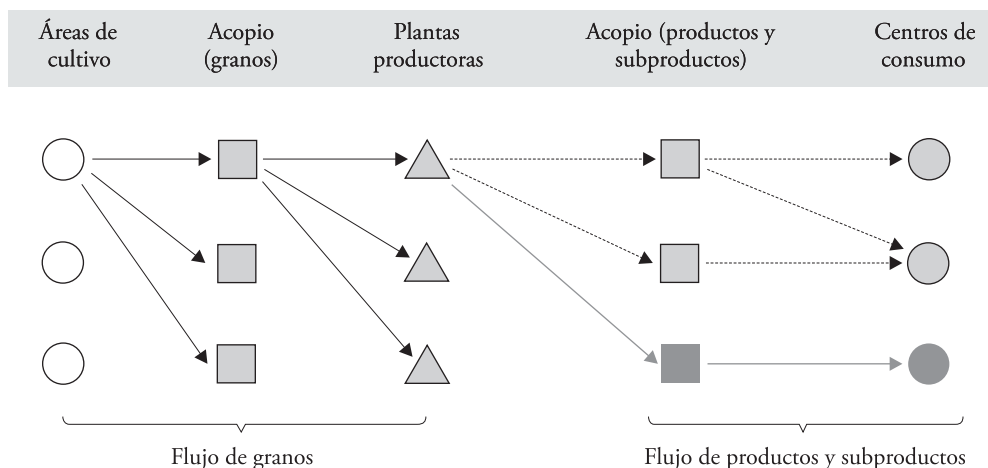


Figura 1. Estructura de redes del modelo.

Figure 1. Network structure of the model.

aptitud arroceras. Con estos antecedentes se establecieron las zonas agro-ecológicas, se definieron los cultivos posibles y se obtuvo la superficie máxima que se puede destinar a cada tipo de cultivo; y además, la superficie máxima que se puede usar por cada zona agro-ecológica considerando los tipos de cultivo en conjunto, el rendimiento para cada tipo de cultivo según zona agro-ecológica, el costo de obtención del grano por tipo de cultivo (se considera que el precio para cada tipo de grano es el mismo en todas las provincias) y la renta de la tierra por usos alternativos.

- 2) Centros de acopio de granos: instalaciones donde se almacenan los granos usados en la producción de etanol o biodiésel. Su ubicación potencial consideró las 24 provincias productoras de granos. Se consideró que cada centro de acopio puede almacenar cualquier tipo de grano y su capacidad es ilimitada.
- 3) Plantas productoras de etanol y de biodiésel: fábricas conocidas comúnmente como biorrefinerías. Su ubicación potencial consideró las 24 provincias productoras de granos. Se consideró que la tecnología seleccionada para una planta productora es compatible con la utilización indiferenciada de todos los granos, para etanol (trigo, maíz y arroz) o para biodiésel (maravilla y raps). Para cada tipo de biocombustible se evaluaron diferentes tamaños de plantas, con capacidades de producción anual de 40 000, 80 000 y 100 000 m³ (etanol) y de 20 000, 40 000 y 60 000 m³ (biodiésel). Se consideró sólo un coeficiente energético por tipo de cultivo, independientemente de la variedad cultivada. En la Figura 2 se muestra el proceso de producción del respectivo biocombustible considerado en el modelo de localización y los respectivos factores de conversión energética. Estos factores de conversión se interpretan así: en la producción de biodiésel de 1 t de maravilla se obtienen 0.42 m³ de biodiésel

- 2) Grain warehouses: facilities where grains used in the production of ethanol or biodiesel are stored. Potential location considered the 24 grain-producing provinces. It was considered that each warehouse can store any kind of grain and it has unlimited capacity.
- 3) Plants producing ethanol and biodiesel: factories commonly known as bio-refineries. Potential location considered the 24 grain-producing provinces. It was considered that the technology selected for a production plant is compatible with all grain types, either for ethanol (wheat, maize and rice) or biodiesel (sunflower and rapeseed). For each type of biofuel different sizes of plants were evaluated, with capacities of annual production of 40 000, 80 000 and 100 000 m³ (ethanol) and 20 000, 40 000 and 60 000 m³ (biodiesel). Only one energy coefficient was considered by crop type, regardless of the variety grown. The production process of the respective biofuel considered in the location model and the respective energy conversion factors is shown in Figure 2. These conversion factors are interpreted as follows: in the production of biodiesel from 1 t of sunflower 0.42 m³ of biodiesel and as residue 0.56 t cake (a solid residue high in protein) are obtained.
- 4) Warehouses for products and byproducts: any places where ethanol, biodiesel, DDGS (distillers dried grain with solubles) and cakes are received for storage. Different warehouses were defined for the products and byproducts of biofuel industry. Any of the 24 provinces was considered as a potential location to install a warehouse. It was considered that the warehouses have unlimited capacity and that they are required for products and byproducts.
- 5) Consumption centers: for biofuels, 11 consumption centers (one by region) were considered, and demand is concentrated

- y como residuo 0.56 t de torta (un residuo sólido alto en proteína).
- 4) Centros de acopio para productos y subproductos: lugares donde se almacenan el etanol, biodiésel, DDGS (distillers dried grain with solubles; granos secos de destilería con solubles) y tortas. Se definieron diferentes centros de acopio para los productos y los subproductos de la industria de los biocombustibles. Cualquiera de las 24 provincias fue considerada como una localidad potencial para instalar un centro de acopio. Se consideró que los centros de acopio tienen capacidad ilimitada y que se requieren para productos y subproductos.
- 5) Centros de consumo: para los biocombustibles se consideraron 11 centros de consumo (uno por Región) y que la demanda está concentrada en los centroides de las Regiones I a X, incluyendo la Región Metropolitana. Las Regiones XI y XII fueron excluidas del análisis por falta de conectividad terrestre. Se evaluaron escenarios de 2, 5 y 10 % de sustitución de gasolina y 2, 5 y 8 % de sustitución de diésel, por etanol y biodiésel (Cuadro 1), según las proyecciones de demanda al 2010 establecidas por la CNE (2008). También se definió la demanda de subproductos, calculada en 322 644 t anuales. Lo anterior se obtuvo con los supuestos que el DDG y las tortas se usan en la alimentación de bovinos, que el 25 % de

- in centers of the Regions I to X, including the Metropolitan Region. Regions XI and XII were excluded from analysis due to lack of terrestrial connectivity. Scenarios of 2, 5, and 10 % substitution of gasoline and 2, 5, and 8 % substitution of diesel by ethanol and biodiesel, respectively, were evaluated (Table 1) according to the demand projections by 2010 established by the CNE (2008). The byproduct demand was also defined and was estimated at 322 644 t annually. This was obtained with the assumptions that the DDG and cakes are used in cattle feeding, that 25 % of the livestock of the country is of that kind, that an animal consumes 1 kg of byproduct per day and that demand for DDG and cakes comes from the 23 provinces with the highest number of cattle.
- 6) The grain, products and byproducts flow: corresponds to truck transportation; to calculate distances, the trips driven on roads or paths were considered. In the grain shipping it was considered that if the origin is equal to the destination, the distance driven is $\frac{1}{2}$ the radio, because the distance driven to transport grains when the origin is equal to the destination is different from zero.

In this study two supply networks were designed and modeled with a similar structure to that presented in Figure 1:



Figura 2. Plantas productoras de etanol y biodiésel.
Figure 2. Ethanol and biodiesel production plants.

Cuadro 1. Demanda de biocombustibles en distintos escenarios de sustitución proyectadas al año 2010.
Table 1. Demand for biofuels in different replacement scenarios projected by year 2010.

	Escenario de sustitución					
	Etanol			Biodiésel		
	2 %	5 %	10 %	2 %	5 %	8 %
Demanda (miles m³)	63.6	159	317.9	94.2	235.6	376.9

la ganadería del país es de este tipo, que un bovino consume 1 kg de subproducto por día y que la demanda por DDG y tortas proviene de las 23 provincias con mayor número de bovinos.

- 6) Flujo de granos, productos y subproductos: corresponde al transporte en camiones y para calcular las distancias se consideró los recorridos por carreteras o caminos. En el transporte de los granos se consideró que si el origen es igual al destino la distancia recorrida es de $\frac{1}{2}$ el radio, por cuanto la distancia recorrida para transportar los granos cuando el origen es igual al destino es diferente de cero.

En este estudio se diseñó y modeló dos redes de abastecimiento con estructura similar a la presentada en la Figura 1: una red para la producción y distribución de etanol y otra red para la producción y distribución de biodiésel. El modelo para localizar los centros de acopio y plantas productoras de etanol se presenta a continuación. Un modelo similar se desarrolló para la red de abastecimiento de biodiésel. Dado que son modelos idénticos sólo se presenta el modelo para la red de abastecimiento de etanol.

La selección de la ubicación geográfica de los centros de acopio y plantas productoras se realizó buscando minimizar los costos de: 1) obtención de granos en las provincias; 2) la renta por uso alternativo de la tierra; y 3) transporte de granos, productos y subproductos. Las restricciones del modelo indican que: 1) se debe atender toda la demanda de productos y subproductos; 2) todo flujo de granos que llegue a un centro de acopio de granos debe ser transportado a una planta productora; 3) la cantidad de producto y subproducto obtenida en una planta depende de los tipos de granos utilizados; 4) la totalidad del producto o subproducto que llegue a un centro de acopio debe ser transportado a los centros de consumo del referido producto o subproducto; 5) se debe mantener la superficie máxima disponible para los cultivos; 6) se debe mantener la capacidad de producción anual de una planta; y 7) existe un número máximo de centros de acopio y plantas productoras que pueden instalarse.

Los datos necesarios para el modelo son los siguientes:

- P : Conjunto de provincias donde se pueden localizar las plantas productoras de etanol.
- A : Conjunto de provincias donde se pueden localizar los centros de acopio de granos.
- K : Conjunto de cultivos utilizados para la producción de etanol, $K = \{\text{trigo, maíz, arroz}\}$.
- S : Conjunto de índices para productos y subproductos, $S = \{1 = \text{etanol, } 2 = \text{DDG}\}$.
- C^s : Conjunto de centros de consumo de $s \in S$.

a network for production and distribution of ethanol and other for production and distribution of biodiesel. The model to locate the warehouses and ethanol -producing plants is shown below. A similar model was developed for the network of biodiesel supply. Since they are identical models, only the model for the supply network of ethanol is presented.

The selection of geographic locations of warehouses and production plants was performed seeking to minimize the costs of: 1) grain supply in the provinces; 2) rent for alternative land use; and 3) transport of grains, products and byproducts. The restrictions of the model were: 1) the whole demand for products and byproducts must be met; 2) a grain flow that reaches a grain warehouse must be transported to a manufacturing plant; 3) the amount of product and byproduct obtained from a plant depends on the types of grain used, 4) the entire product or byproduct that reaches a warehouse must be trucked to the consumption centers of that product or byproduct; 5) the maximum area available for cultivation must be kept to; 6) the annual production capacity of a plant must be kept to; and 7) there is a maximum number of warehouses and production plants that can be installed.

The data required for the model are:

- P : Set of provinces where the ethanol production plants can be located.
- A : Set of provinces where grain warehouses can be located.
- K : Set of crops used for ethanol production, $K = \{\text{wheat, corn, rice}\}$
- S : Set of indices for products and byproducts, $S = \{1 = \text{ethanol, } 2 = \text{DDG}\}$
- C^s : Set of centers of consumption of $s \in S$.
- A^s : Set of provinces where warehouses of $s \in S$ can be located.
- I : Set of provinces considered for crops.
- I^k : Set of provinces with potential for crop $k \in K$.
- Z : Set of the type of zones by province, $Z = \{1, \dots, 6\}$.
- K^i : Set of possible crops in the province i .
- Dem_{ib}^s : Demand of $s \in S$ (m^3 for ethanol and t for DDG) by consumption center $b \in C^s$
- $Area_{iz}$: Maximum area available for all crops in the zone $z \in Z$ of the province $i \in I$.
- $AreaMax_{ik}$: Maximum area that can be destined in the province $i \in I$ to the crop $k \in K$.
- $Yield_{izk}$: Yield of the crop $k \in K$ in the zone $z \in Z$ of the province $i \in I$.
- M : A high value to represent the unskilled nature of the warehouses.

- A^i : Conjunto de provincias donde se pueden localizar los centros de acopio de $s \in S$.
- I : Conjunto de provincias consideradas para los cultivos.
- I^k : Conjunto de provincias con potencial para el cultivo $k \in K$.
- Z : Conjunto de los tipos de zonas por provincia, $Z = \{1, \dots, 6\}$.
- K^i : Conjunto de cultivos posibles en la provincia i .
- Dem_{ij}^s : Demanda de $s \in S$ (m^3 para etanol y t para DDGS) por centro de consumo $b \in C^S$.
- $Superficie_{iz}$: Superficie máxima disponible para todos los cultivos en la zona $z \in Z$ de la provincia $i \in I$.
- $SuperficieMax_{ik}$: Superficie máxima que puede ser destinada en la provincia $i \in I$ al cultivo $k \in K$.
- $Rendim_{izk}$: Rendimiento del cultivo $k \in K$ en la zona $z \in Z$ de la provincia $i \in I$.
- M : Un valor elevado para representar la naturaleza no capacitada de los centros de acopio.
- Q : Capacidad de producción anual (m^3) de la planta de etanol.
- f_{ks} : Factor de conversión energética desde el cultivo $k \in K$ al producto $s \in S$, esto es, t del cultivo $k \in K$ requerido para producir $1 m^3$ o 1 t, según corresponda, de $s \in S$.
- a_{ikz}^1 : Costo de obtención de 1 t del grano $k \in K$ en la zona $z \in Z$ de la provincia $i \in I$.
- b_{iz}^1 : Renta de la tierra por usos alternativos, en la provincia $i \in I$, zona $z \in Z$.
- c^1 : Costo de transporte de 1 t de grano.
- c_s^2 : Costo de transporte de una unidad de medida de $s \in S$ (m^3 para etanol, t para DDGS).
- d_{ij}, d_{jp} : Distancia entre los puntos (cultivos hacia acopio de granos, d_{ij} ; o acopio de granos hacia planta, d_{jp}).
- d_{pb}, d_{lb} : Distancia entre los puntos (desde una planta hasta un acopio de productos, d_{pb} o desde un acopio de productos hasta un centro de consumo, d_{lb}).

Se requiere además definir los siguientes parámetros:

- $NumPlanta$: Número máximo de plantas de etanol a ser instaladas.
- $NumAcoGra$: Número máximo de almacenes de granos a ser instalados.
- $NumAco_s$: Número máximo de almacenes de $s \in S$ a ser instalados.

El diseño de la red se obtiene con los valores de las siguientes variables:

- Q : Capacidad de producción (m^3) de la planta de etanol.
- f_{ks} : Energy conversion factor from the $k \in K$ crop to the product $s \in S$, this is, t of the crop $k \in K$ required to produce $1 m^3$ or 1 t, as appropriate, of $s \in S$.
- a_{ikz}^1 : Cost of supply of 1 t of grain $k \in K$ in the zone $z \in Z$ of the province $i \in I$.
- b_{iz}^1 : Land rent by alternative uses, in the province $i \in I$, zone $z \in Z$.
- c^1 : transportation cost of 1 t of grain.
- c_s^2 : Transportation cost of a unit of measurement of $s \in S$ (m^3 for ethanol, t for DDG).
- d_{ij}, d_{jp} : Distance between the points (crops to grain warehouses, d_{ij} ; or grain warehouse to the plant, d_{jp}).
- d_{pb}, d_{lb} : Distance between the points (from a plant to a warehouse of products, d_{pb} , or from a warehouse of products to a consumption center, d_{lb}).

It is also required to define the following parameters:

- $NumPlant$: Maximum number of ethanol plants to be installed.
- $NumAcoGra$: Maximum number of grain warehouses to be installed.
- $NumAco_s$: Maximum number of warehouses of $s \in S$ to be installed.

The design of the network is obtained with the values of the following variables:

- x_{ijkz}^1 : Quantity (t) of grain of the crop k produced in the zone z , shipped from the province i to the grain warehouse j .
- x_{jpk}^3 : Quantity (t) of grain of the crop k , shipped from the warehouse j to the plant p .
- z_{pls}^1 : Quantity of product/byproduct s (m^3 for ethanol; t for DDG), shipped from the plant p to the warehouse of s installed in l .
- z_{lbs}^3 : Quantity of product /byproduct s (m^3 for ethanol and t DDG), shipped from the warehouse of s located in l to the consumption center of s located in b .
- $y_{jk}^1 = 1$, if a grain warehouse k is located in the province h ; otherwise 0.
- $y_p^2 = 1$, if a production plant is located in the province p ; otherwise 0.
- $y_{ls}^3 = 1$, if a warehouse is located of s in the province h ; otherwise 0.

- x_{ijkz}^1 : Cantidad (t) de granos del cultivo k , producidos en la zona z , enviada desde la provincia i hasta el centro de acopio de granos j .
 x_{jpk}^3 : Cantidad (t) de granos del cultivo k , enviada desde el centro de acopio j hasta la planta p .
 z_{pls}^1 : Cantidad del producto/subproducto s (m^3 para etanol; t para DDGS), enviada desde la planta p hasta el centro de acopio de s instalado en l .
 z_{lhs}^3 : Cantidad del producto/subproducto s (m^3 para etanol y t DDGS), enviada desde el centro de acopio de s situado en l hasta el centro de consumo de s situado en h .
 $y_{jk}^1 = 1$, si se localiza un centro de acopio de granos k en la provincia j ; 0, en caso contrario.
 $y_p^2 = 1$, si se localiza una planta productora en la provincia p ; 0, en caso contrario.
 $y_{ls}^3 = 1$, si se localiza un centro de acopio de s en la provincia l ; 0, en caso contrario.

El modelo matemático posee la siguiente función objetivo:

Minimizar costos de {Obtención de grano + Renta por uso alternativo + Transporte de grano + Transporte de producto + Transporte de subproducto}.

$$\text{Obtención de grano} = \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^k} a_{ikz}^1 x_{ijkz}^1.$$

$$\text{Renta por uso alternativo} = \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^k} \frac{b_{iz}^1 x_{ijkz}^1}{\text{Rendim}_{izk}}.$$

$$\text{Transporte de grano} = \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^k} c^1 d_{ij} x_{ijkz}^1 + \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} c^1 d_{jp} x_{jpk}^3.$$

$$\text{Transporte de producto} = \sum_{s \in \{1\}} \sum_{p \in P} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{pl} z_{pls}^1 + \sum_{s \in \{1\}} \sum_{h \in C^s} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{hl} z_{lhs}^3.$$

$$\text{Transporte de subproducto} = \sum_{s \in S - \{1\}} \sum_{h \in C^s} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{lh} z_{lhs}^3 + \sum_{s \in S - \{1\}} \sum_{p \in P} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{pl} z_{pls}^1.$$

Las restricciones consideradas son:

$$\text{Demanda: } \sum_{l \in A^s} z_{lhs}^3 \geq \text{Dem}_h^s, h \in C^s, s \in S.$$

$$\text{Balance para acopio de granos: } \sum_{i \in I^k} \sum_{z \in Z} x_{ijkz}^1 = \sum_{p \in P} x_{jpk}^3, j \in A, k \in K.$$

The mathematical model has the following objective function:

To minimize costs of {Grain supply + Rent by alternative use + Grain transport + Transport of product + Byproduct transport}.

$$\text{Grain supply} = \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^k} a_{ikz}^1 x_{ijkz}^1.$$

$$\text{Rent by alternative use} = \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^k} \frac{b_{iz}^1 x_{ijkz}^1}{\text{Yield}_{izk}}.$$

$$\text{Grain transport} = \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^k} c^1 d_{ij} x_{ijkz}^1 + \sum_{j \in A} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} c^1 d_{jp} x_{jpk}^3.$$

$$\text{Transport of product} = \sum_{s \in \{1\}} \sum_{p \in P} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{pl} z_{pls}^1 + \sum_{s \in \{1\}} \sum_{h \in C^s} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{hl} z_{lhs}^3.$$

$$\text{Byproduct transport} = \sum_{s \in S - \{1\}} \sum_{h \in C^s} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{lh} z_{lhs}^3 + \sum_{s \in S - \{1\}} \sum_{p \in P} \sum_{l \in A^s} c_s^2 d_{pl} z_{pls}^1.$$

The restrictions considered are:

$$\text{Demand: } \sum_{l \in A^s} z_{lhs}^3 \geq \text{Dem}_h^s, h \in C^s, s \in S.$$

$$\text{Balance for grain warehouse/storage: } \sum_{i \in I^k} \sum_{z \in Z} x_{ijkz}^1 = \sum_{p \in P} x_{jpk}^3, j \in A, k \in K.$$

$$\text{Balance of production of products and byproducts: } \sum_{k \in K} \sum_{j \in A} f_{ks} x_{jpk}^3 = \sum_{l \in A^s} z_{pls}^1, p \in P, s \in S.$$

$$\text{Ethanol warehouse/storage: } \sum_{p \in P} z_{pls}^1 = \sum_{h \in C^s} z_{lhs}^3, s \in \{1\}, l \in A^s.$$

$$\text{Byproducts warehouse/storage: } \sum_{p \in P} z_{pls}^1 = \sum_{h \in C^s} z_{lhs}^3, s \in S - \{1\}, l \in A^s.$$

Maximum area:

$$\sum_{k \in K^i} \sum_{j \in A} \frac{x_{ijkz}^1}{\text{Yield}_{izk}} \leq \text{Area}_{iz}, z \in Z, i \in I.$$

$$\sum_{z \in Z} \sum_{j \in A} \frac{x_{ijkz}^1}{\text{Yield}_{izk}} \leq \text{AreaMax}_{ik}, i \in I, k \in K^i.$$

It guarantees the existence of ethanol plants

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in A} x_{jpk}^3 + \sum_{s \in S} \sum_{l \in A^s} z_{pls}^1 \leq \text{My}_p^2, p \in P.$$

Balance de producción de productos y subproductos:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in A} f_{ks} x_{jpk}^3 = \sum_{l \in A^s} z_{pls}^1, p \in P, s \in S.$$

Acopio etanol: $\sum_{p \in P} z_{pls}^1 = \sum_{b \in C^s} z_{lbs}^3, s \in \{1\}, l \in A^s.$

Acopio subproductos: $\sum_{p \in P} z_{pls}^1 = \sum_{b \in C^s} z_{lbs}^3, s \in S - \{1\}, l \in A^s.$

Superficie máxima:

$$\sum_{k \in K^i} \sum_{j \in A} \frac{x_{ijkz}^1}{\text{Rendim}_{izk}} \leq \text{Superficie}_{iz}, z \in Z, i \in I.$$

$$\sum_{z \in Z} \sum_{j \in A} \frac{x_{ijkz}^1}{\text{Rendim}_{izk}} \leq \text{SuperficieMax}_{ik}, i \in I, k \in K^i.$$

Garantiza la existencia de plantas de etanol:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in A} x_{jpk}^3 + \sum_{s \in S} \sum_{l \in A^s} z_{pls}^1 \leq My_p^2, p \in P.$$

Garantiza la existencia de acopios:

Acopio grano: $\sum_{i \in I^k} \sum_{z \in Z} x_{ijkz}^1 + \sum_{p \in P} x_{jpk}^3 \leq My_{jk}^1, j \in A, k \in K.$

Acopio etanol: $\sum_{p \in P} z_{pls}^1 + \sum_{b \in C^s} z_{lbs}^3 \leq My_{ls}^3, s \in \{1\}, l \in A^s.$

Acopio subproducto:

$$\sum_{p \in P} z_{pls}^1 + \sum_{b \in C^s} z_{lbs}^3 \leq My_{ls}^3, s \in S - \{1\}, l \in A^s.$$

Capacidad para plantas de etanol: $\sum_{l \in A^s} z_{pls}^1 \leq Qy_p^2, s \in \{1\}, p \in P.$

Cantidad de instalaciones:

Plantas productoras: $\sum_{p \in P} y_p^2 \leq \text{NumPlanta}.$

Centros de acopio de granos: $\sum_{k \in K} \sum_{j \in A} y_{jk}^1 \leq \text{NumAcoGra}.$

Centros de acopio de etanol y subproductos:

$$\sum_{l \in A^s} y_{ls}^3 \leq \text{NumAco}_s, s \in S.$$

El modelo de programación matemática propuesto corresponde a un modelo lineal mixto entero. Para resolver las diferentes instancias de los modelos se utilizó el programa CPLEX versión 10.2.0.

It guarantees the existence of warehouses:

Grain warehouse:

$$\sum_{i \in I^k} \sum_{z \in Z} x_{ijkz}^1 + \sum_{p \in P} x_{jpk}^3 \leq My_{jk}^1, j \in A, k \in K.$$

Ethanol warehouse: $\sum_{p \in P} z_{pls}^1 + \sum_{b \in C^s} z_{lbs}^3 \leq My_{ls}^3, s \in \{1\}, l \in A^s.$

Byproduct warehouse:

$$\sum_{p \in P} z_{pls}^1 + \sum_{b \in C^s} z_{lbs}^3 \leq My_{ls}^3, s \in S - \{1\}, l \in A^s.$$

Capacity for ethanol plants: $\sum_{l \in A^s} z_{pls}^1 \leq Qy_p^2, s \in \{1\}, p \in P.$

Number of installations:

Production plants: $\sum_{p \in P} y_p^2 \leq \text{NumPlant}.$

Grain warehouses: $\sum_{k \in K} \sum_{j \in A} y_{jk}^1 \leq \text{NumAcoGra}.$

Ethanol and byproduct warehouses: $\sum_{l \in A^s} y_{ls}^3 \leq \text{NumAco}_s, s \in S.$

The proposed mathematical programming model corresponds to a mixed-integer linear model. To resolve the different instances of the models the CPLEX program version 10.2.0 was used.

RESULTS AND DISCUSSION

The grain cost and the conversion rate are key factors when deciding the most suitable raw material for biofuel production. This, added to crop yield, leads to postulate corn as the most suitable crop for ethanol production (wheat and rice were never used as input), and rapeseed for biodiesel production. However, other factors such as availability of soils limit grain production. That is why with demands greater than 8 % of biodiesel it is essential to have alternative crops as sunflower; though its yield may be lower (in this case the amount of diesel produced with sunflower was less than 0.04 % of total production).

A summary of the costs obtained for the different evaluated scenarios is shown for ethanol (Table 2) and for biodiesel (Table 3). For each type of biofuel the scenario with the highest total cost was identified,

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El costo del grano y la tasa de conversión son factores clave al momento de definir la materia prima más adecuada para la producción de biocombustibles. Lo anterior, sumado al rendimiento del cultivo, conduce a que el maíz se postule como el cultivo recomendable para la producción de etanol (el trigo y el arroz nunca fueron usados como insumo), y el raps para la producción de biodiésel. Sin embargo, otros factores como la disponibilidad de suelos limitan la producción de los granos. Por ello, con demandas superiores al 8 % de biodiésel es imprescindible disponer de cultivos alternativos como maravilla, aunque su rendimiento pueda ser inferior (en este caso la cantidad de biodiésel producida con maravilla fue menor al 0.04 % del total producido).

Un resumen de los costos obtenidos para los diferentes escenarios evaluados se presenta para etanol (Cuadro 2) y para biodiésel (Cuadro 3). Para cada tipo de biocombustible se identificó el escenario con el mayor costo total, el cual se consideró como escenario base (100 %) para evaluar los escenarios

which was considered as the baseline scenario (100%) to evaluate the remaining scenarios. For each case (that is, each combination of replacement scenario of demand and capacity of the plant) information is shown in aggregate (total cost) and in detail, for each component of the cost (Grain supply, Rent by alternative use, Grain transport, Transport of product and Transport of byproduct) and information on the average participation of each cost component in the total cost is included.

It is noted that the largest share in the costs of the supply chain comes from the grain supply and the rent by alternative use (Tables 2 and 3). These costs are influenced mainly by the demand requirements (substitution scenario). The plant capacity has a main effect on the transportation costs.

The corn production for ethanol was always carried out in the irrigated central valley; the cultivation and grain warehouse were carried out in provinces located between the Regions VI and VIII, depending on the evaluated scenario of substitution. This was repeated with the location of processing plants. For example, the location of ethanol plants

Cuadro 2. Resumen de los costos obtenidos en la cadena de abastecimiento de etanol.

Table 2. Summary of costs obtained in the ethanol supply chain.

Escenario de sustitución (%)	2			5			10			Participación promedio en el costo total (%)
Capacidad de la planta (m ³ año ⁻¹)	40	80	100	40	80	100	40	80	100	
Costo total (%)	19	19	19	48	48	48	100	100	100	
Obtención de grano (%)	20	20	20	50	50	50	100	100	100	75.3
Renta por uso alternativo (%)	16	16	16	46	46	46	100	100	100	15.8
Transporte de grano (%)	21	26	26	51	50	47	100	102	98	2.6
Transporte de producto (%)	29	27	27	55	57	56	100	102	98	3.6
Transporte de subproducto(%)	4	6	6	14	20	21	100	94	95	2.7

Cuadro 3. Resumen de los costos obtenidos en la cadena de abastecimiento del biodiésel.

Table 3. Summary of the costs obtained in the biodiesel supply chain.

Escenario de sustitución (%)	2			5			8			Participación promedio en el costo total (%)
Capacidad de la planta (m ³ año ⁻¹)	20	40	60	20	40	60	20	40	60	
Costo total (%)	23	23	23	61	59	59	100	96	96	
Obtención de grano (%)	25	25	25	62	62	62	100	100	100	71.8
Renta por uso alternativo (%)	21	21	21	59	58	58	100	100	100	19.5
Transporte de grano (%)	4	6	6	28	18	15	100	43	29	2.7
Transporte de producto (%)	34	35	34	72	78	79	100	116	121	4.7
Transporte de subproducto(%)	20	12	20	153	99	88	100	56	75	1.3

restantes. Para cada caso (es decir, cada combinación de escenario de sustitución de la demanda y capacidad de la planta) se muestra información de manera agregada (el costo total) como en detalle, para cada componente de costo (Obtención de grano, Renta por uso alternativo, Transporte de grano, Transporte de producto y Transporte de subproducto) y se incluye información sobre la participación promedio de cada componente de costo en el costo total.

Se observa que la mayor participación en los costos de las cadenas de abastecimiento proviene de la obtención del grano y de la renta por uso alternativo (Cuadros 2 y 3). Estos costos están influenciados principalmente por los requerimientos de demanda (escenario de sustitución). La capacidad de las plantas tiene un efecto principal en el costo de transporte.

La producción del maíz para etanol siempre se realizó en la zona del valle central de riego; el cultivo y el acopio del grano se realizaron en provincias ubicadas entre las Regiones VI y VIII, dependiendo del escenario de sustitución evaluado. Esto se repitió con la localización de las plantas procesadoras. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra la localización de plantas productoras de etanol de $100\,000\text{ m}^3\text{ año}^{-1}$ y la superficie de maíz necesaria para el escenario de 10 % de sustitución; las flechas indican hacia donde se envía la producción de granos de las provincias.

Es interesante destacar que las provincias de las Regiones IX y X nunca fueron seleccionadas para el acopio y la producción de etanol. Ello es consistente con el hecho que la principal zona de producción del maíz se encuentra entre la Región Metropolitana y la VIII Región (ODEPA, 2008). La Región Metropolitana sólo figuró como centro de acopio de etanol en los escenarios de sustitución del 5 y 10 % y sólo cuando éste fue producido en plantas de $80\,000$ y $100\,000\text{ m}^3\text{ año}^{-1}$ de capacidad.

El análisis de los tres escenarios de demanda de etanol, de 2, 5 y 10 % de sustitución de gasolina al año 2010, usando un tamaño de planta de $100\,000\text{ m}^3\text{ año}^{-1}$ permite conocer donde debieran localizarse las plantas para iniciar la producción de etanol en Chile (Figura 4). Para la demanda de 2 % se requiere una planta de etanol y la localización propuesta es la provincia de Ñuble. Para la demanda de 5 % las localizaciones propuestas son Ñuble (que usaría 70 % de su capacidad de producción) y Talca (con aproximadamente 90 % de uso de su capacidad de producción). Para la demanda de 10 % se requieren

that produce $100\,000\text{ m}^3\text{ year}^{-1}$ and corn acres needed for the scenario of 10 % substitution is shown in Figure 3; arrows indicate where the grain production of provinces is sent.

Interestingly, the provinces of Regions IX and X were never selected for warehouses and ethanol production. This is consistent with the fact that the main corn production area is located between the Metropolitan and VIII Regions (ODEPA, 2008). The Metropolitan Region was only outstanding as a warehouse for ethanol in scenarios of 5 and 10 % substitution and only when it was produced in plants of $80\,000$ and $100\,000\text{ m}^3\text{ per year}^{-1}$ of capacity.

The analysis of the three ethanol scenarios of 2, 5 and 10% substitution of gasoline by 2010, using a plant size of $100\,000\text{ m}^3\text{ year}^{-1}$ allows knowing where the plants should be located to begin producing ethanol in Chile (Figure 4). For the demand of 2 % one ethanol plant is required and the proposed location is the province of Ñuble. For

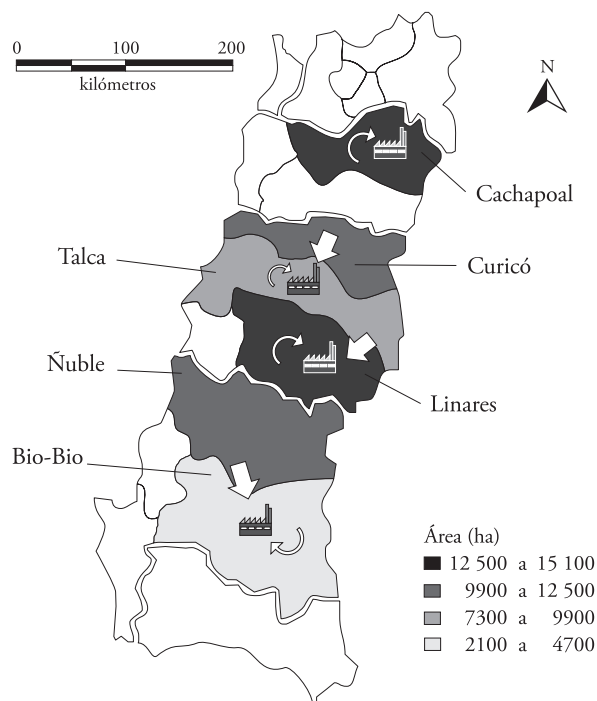


Figura 3. Superficie necesaria de maíz para producción de etanol y flujos de grano (flechas) hacia plantas productoras – plantas de $100\,000\text{ m}^3\text{ año}^{-1}$ y demanda 10 %.

Figure 3. Area required of corn for ethanol production and grain flows (arrows) toward producing plants – plants of $100\,000\text{ m}^3\text{ per year}^{-1}$ and 10 % demand.

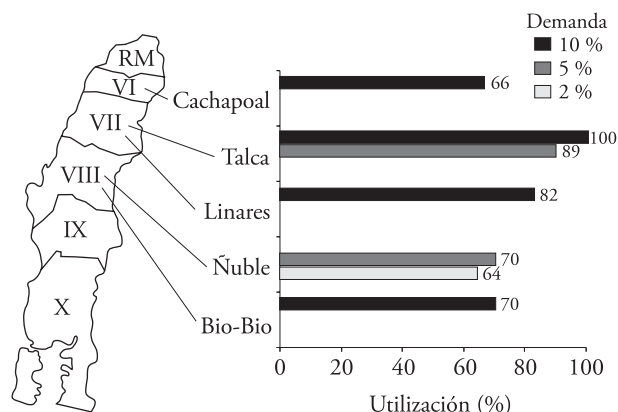


Figura 4. Localización de las plantas de etanol de 100 000 m³ año⁻¹ en función de la demanda.

Figure 4. Localization of ethanol plants of 100 000 m³ year⁻¹ in function of demand.

65 176 ha de maíz para abastecer cuatro plantas de producción ubicadas en las provincias de Cachapoal, Talca, Linares y Bio-Bio. En la Figura 4 se observa que al aumentar la demanda, las provincias de la VII Región se vuelven más atractivas para instalar una planta productora de etanol.

Respecto al modelo de localización de plantas de biodiésel, el análisis de los resultados indica que el cultivo del raps debería comenzar en el secano interior y expandirse principalmente hacia el valle central de secano y el secano de precordillera.

En general, los centros de acopio y las plantas productoras de biodiésel se ubicaron en provincias desde Talca al sur, debido a la cercanía con los cultivos. La excepción fue el escenario de un 8 % de sustitución con plantas de 20 000 m³, donde los centros de acopio son provincias de la Región Metropolitana y VI.

El análisis de los tres escenarios de demanda de 2, 5 y 8 % de reemplazo del diésel de transporte por biodiésel, usando un tamaño de planta de 60 000 m³ año⁻¹ permitiría conocer donde debieran localizarse las plantas para iniciar la producción de biodiésel en el país. El análisis de los resultados indica que para un escenario de sustitución del 2 % se requerirían dos plantas localizadas en las provincias de Malleco y Osorno. Aún al aumentar el porcentaje de sustitución a 5 y 8 %, el porcentaje de utilización de la planta de Osorno no llega a 100 % (Figura 5).

En un escenario de sustitución del 8 % la cantidad producida de tortas es aproximadamente 50 % mayor que el consumo considerado en este estudio.

the demand of 5 % the proposed locations are Ñuble (which would use 70 % of its production capacity) and Talca (about 90 % of use of its production capacity). For the demand of 10 %, 65 176 ha of corn are required to supply four production plants located in the provinces of Cachapoal, Talca, Linares and Bio-Bio. As shown in Figure 4 when demand increases, the provinces of the Region VII become more attractive to install an ethanol production plant.

As to the location model of biodiesel plants, the analysis of results indicates that the cultivation of rapeseed should begin in the interior dryland and spread primarily to the dryland central valley and the Andean dryland foothills.

In general, warehouses and biodiesel production plants were located in southern provinces from Talca, due to its proximity to the crops. The exception was the scenario of an 8 % substitution with plants of 20 000 m³, where the warehouses are provinces of the Metropolitan and VI Regions.

The analysis of the three scenarios of demand of 2, 5 and 8 % replacement of diesel for transport by biodiesel, using a plant size of 60 000 m³ year⁻¹ would allow to know where plants should be located to begin the biodiesel production in the country. The analysis of the results indicates that for a replacing scenario of 2 % two plants located in the provinces of Malleco and Osorno would be required. Even by increasing the replacement rate at 5 and 8 %, the utilization of the Osorno plant is less than 100 % (Figure 5).

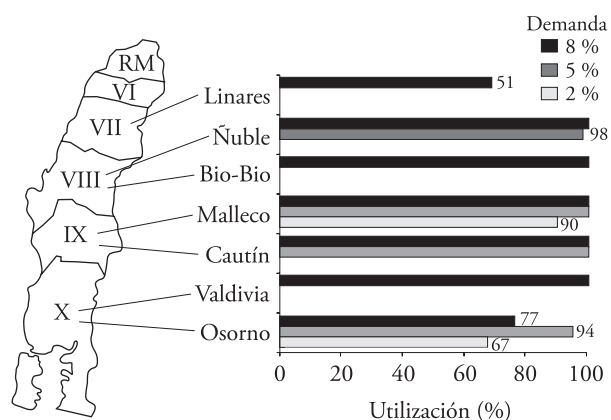


Figura 5. Localización de las plantas de biodiésel de 60 000 m³ año⁻¹ en función de la demanda.

Figure 5. Localization of biodiesel plants of 60 000 m³ year⁻¹ in function of demand.

Lo anterior obliga a buscar nuevos destinos para el subproducto.

CONCLUSIONES

La expansión de las plantas productoras de etanol usando maíz, en Chile, sería desde una de las provincias de la VIII Región (Ñuble o Bio-Bio) hacia la VII Región (la provincia de Talca aparece con mayor frecuencia en los escenarios evaluados) y finalmente una de las provincias de la VI Región (Colchagua o Cachapoal). Si el objetivo fuese establecer una industria de biodiésel producido con raps, la primera planta productora debería ubicarse en una de las provincias de la IX Región (Cautín o Malleco) y seguir la expansión hacia una de las provincias de la X Región (Valdivia u Osorno) y hacia las regiones VIII y VII.

AGRADECIMIENTO

El primer autor agradece a FONDECYT por el financiamiento recibido. Este trabajo es uno de los resultados generados a partir del proyecto FONDECYT de Iniciación en Investigación número 11060172.

LITERATURA CITADA

- CNE (Comisión Nacional de Energía). 2008. Estadísticas. Gobierno de Chile. http://www.cne.cl/estadisticas/f_estadisticas.html (consultado: julio 2008).
- Chopra, S., P. Meindl. 2008. Administración de la Cadena de Suministro. Estrategia, Planeación y Operación. Pearson Educación. Tercera Edición. México. 552 p.
- Gao, L., and E. P. Robinson Jr. 1992. A dual-based optimization procedure for the two-echelon uncapacitated facility location problem. *Naval Res. Logistics* 39: 191-212.

In a scenario of substitution of 8 % the produced amount of cakes is approximately 50 % higher than the consumption considered in this study. This forces to look for new destinations for the byproduct.

CONCLUSIONS

The expansion of ethanol production plants using corn in Chile, would occur from one of the provinces of Region VIII (Ñuble or Bio-Bio) to the Region VII (the province of Talca appears most often in the scenarios assessed) and finally one of the provinces of Region VI (Colchagua or Cachapoal). If the objective is to establish an industry of biodiesel produced from rapeseed, the first manufacturing plant should be located in one of the provinces of Region IX (Cautín or Malleco) and continue the expansion into one of the provinces of Region X (Valdivia or Osorno) and to regions VIII and VII.

—End of the English version—



- Kaufman L., M. V. Eede, and P. Hansen. 1977. A plant a warehouse location problem. *Operations Res. Quat.* 28: 547-554.
- Marín A., and B. Pelegrín. 1999. Applying Lagrangian relaxation to the resolution of two-stage location problems. *Ann. Operations Res.* 86: 179-198.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias). 2008. Estadísticas y precios. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://www.odepa.gob.cl>. (consultado: noviembre 2006 y marzo 2008).
- Venema, H. D., and P. H. Calamai. 2003. Bioenergy systems planning using location-allocation and landscape ecology design principles. *Ann. Operations Res.* 123: 241-261.