

## **PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA**

**MODELO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE  
ALGAS EN ARGENTINA**

**Demarco, Adrián Emmanuel – LU118581**

Ingeniería Industrial

**Navarrete Monge, José Fernando – LU117021**

Ingeniería en Alimentos

Tutor/es:

**Maimbil, Edgar, UADE**

**Romera, Nahuel, UADE**

**Marzo 24, 2014**



**UADE**

**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

### **Agradecimientos**

Dedicamos este trabajo a todos aquellos que contribuyeron de una u otra forma con nosotros en su elaboración.

- A nuestro Dios y Creador, por darnos la vida y salud,
- A Tiny y Nahuel, por su ayuda enorme y paciente al formarnos en la Dinámica de Sistemas y acompañarnos en la creación de este simulador a lo largo de este año,
- A nuestros padres, hermanos y amigos, por todo su apoyo incondicional en nuestros años académicos,
- Al Prof. Dr. Alberto D'Andrea, por orientarnos en el mundo de las microalgas cuando aún desconocíamos del tema,

A todos ustedes, muchas gracias.

## Resumen

La Argentina se encuentra ante un crecimiento importante en los últimos años en materia de biocombustibles, en especial de biodiesel. Tanto es así que la ley 26.093, sancionada en el año 2006, estableció que a todo combustible que se comercialice en territorio argentino debe incorporarse un porcentaje de biocombustible.

El biodiesel puede producirse a partir de diversos oleaginosos como la soja o el maíz, pero también puede producirse a partir del aceite extraído de micro algas, cuyo papel en el actual modelo energético motivó al desarrollo de este estudio.

El biodiesel en la Argentina se obtiene en su mayoría a partir de la semilla de soja, lo cual implica que muchos sectores económicos se vean afectados por el uso en grandes cantidades de esta semilla. La producción de biodiesel a partir de algas es una oportunidad para ingresar a competir en el mercado del biodiesel.

Las algas son de rápido crecimiento y una buena productividad de aceite. Sus principales ventajas son que no entran en conflicto por las tierras agrícolas y cumple con las normas sobre el uso de alimentos para la producción de biocombustibles. La posibilidad de cultivar estas algas en piletas al aire libre, con diferentes condiciones hídricas, elimina la necesidad de tierra cultivable de los oleaginosos.

Como principales desafíos a la explotación de algas para producción de combustibles se encuentra la falta de conocimientos respecto a estirpes o variedades de algas de alto rendimiento, así como una estructura de costos no muy atractiva para inversiones de explotación a gran escala.

Las barreras tecnológicas también representan un problema, pero varias empresas argentinas han tomado la iniciativa en este tipo de recurso y han desarrollado técnicas que contribuyen a mejorar la productividad, llegando incluso a la fabricación de máquinas “llave en mano” para producción de biodiesel de algas a nivel PyME.

El presente trabajo consiste en la realización de un modelo de simulación de la producción actual de biodiesel a partir de algas en la Argentina. Este modelo se basa en la Dinámica de Sistemas, disciplina que permite el análisis de sistemas complejos de subsistemas interrelacionados, donde la realimentación de información cumple un papel

---

fundamental. Utilizando datos técnicos e información oficial del mercado energético del país se pueden construir escenarios que permiten evaluar el futuro de la actividad.

**Palabras Clave:** Biodiesel - Producción – Micro algas – Oleaginosos – Especies – Dinámica de Sistemas – Modelo de simulación.

## Abstract

Argentina has experienced these last years an important grow in biofuels, especially biodiesel. So it is that law 26.093, which was sanctioned in 2006, established that every fuel commercialized in Argentinian territory must incorporate a percentage of biofuel.

Biodiesel can be produced with a variety of oleaginous like soy or corn, but also can be produced with oil obtained from micro algae, whose paper in the country's energetic model impulsed the development of this study.

Biodiesel in Argentina is obtained mostly from soy seeds, which involves many agricultural and economic sectors affected by the use of large amounts of this seed. Algae biodiesel production is a chance to join and rival in biodiesel market.

Algae are species of fast grow and a good oil productivity and its best advantage is that it's working doesn't generate conflicts with agricultural lands neither normatives related to biofuels made from food. The possibility to grow algae in outdoors pools with different water conditions, eliminates oleaginous' need of cultivable land.

The main challenges to algae exploit for biodiesel production is the lack of knowledge regarding algae lineage or species of high oil performance, and also cost structures unattractive for potential investors.

Technologic barriers also mean a problem, but some Argentinian companies have taken the lead in this type of resource and have developed techniques to increase productivity, even creating turnkey machines to produce biodiesel in a PyME ("Small and Medium Size Enterprises") level.

This work consists in the creation of a simulation model of algae biodiesel production in Argentina. This model will be based in System Dynamics, discipline which allows the study of complex systems of interrelated subsystems, where information flow fulfils an important role. Using technical data and official information from the market, scenarios can be made to evaluate the future of this activity.

**Key words:** Biodiesel - Production – Micro algae – Oleaginous – Varieties – Systems Dynamic – Simulation model

## Contenido

1. Introducción .....	9
1.1 Objetivo.....	9
1.2 Límites y alcances.....	9
2. Marco teórico .....	10
2.1 Las microalgas como materia prima para la producción de biodiesel .....	12
2.2 Producción de microalgas .....	14
2.3 Algunos tipos de microalgas estudiadas para la obtención de biodiesel.....	15
2.3.1 Chlorella Vulgaris– Algas Verdes.....	15
2.3.2 Spirulina– Algas Verde Azules .....	15
2.3.3 Dunaliella Salina – Algas Verdes o Clorofíceas .....	16
2.4 Formas de cultivo.....	16
2.4.1 Sistemas Abiertos.....	16
2.4.2 Sistemas Cerrados .....	17
2.4.3 Sistemas Mixtos .....	19
2.5 Cosecha de microalgas .....	20
2.5.1 Filtrado .....	20
2.5.2 Sedimentación y centrifugación.....	20
2.5.3 Floculación.....	21
2.6 Extracción del aceite .....	21
2.6.1 Prensa.....	21
2.6.2 Lixiviación con hexano .....	21
2.6.3 Extracción Supercrítica .....	22
2.7 Refinado del aceite.....	22
2.8 Industria de biodiesel de algas en Argentina.....	23

---

2.8.1 Características productivas de Oil Fox.....	25
3. Dinámica de Sistemas .....	26
3.1 Construcción de un modelo dinámico.....	27
3.1.1 Reconocer la problemática.....	27
3.1.2 Diagrama causal.....	28
3.1.3 Bucles de realimentación .....	29
3.1.4 Retardos .....	31
3.1.5 Paso de un diagrama causal a un diagrama Forrester.....	31
3.1.6 Diagrama de Flujo o de Forrester.....	31
3.1.7 Simulación por computadora .....	34
3.1.8 Validación del modelo .....	35
3.1.9 Análisis del modelo.....	36
4. Construcción del modelo.....	36
4.1 Diagrama causal.....	37
4.1.1 Causal versión 01 .....	37
4.1.2 Causal versión 02 .....	39
4.1.3 Causal versión 03 .....	40
4.1.4 Causal versión 04 .....	41
4.1.5 Causal versión 05 .....	43
4.2 Diagrama Forrester.....	44
4.2.1 Forrester versión 0.00.....	47
4.2.2 Forrester versión 0.01.....	48
4.2.3 Forrester versión 0.02.....	49
4.2.4 Forrester versión 0.03.....	51

---

4.2.5 Forrester versión 0.1.....	52
4.2.6 Forrester versión 0.2.....	54
4.2.7 Forrester versión 0.3.....	55
4.2.8 Forrester versión 0.4.....	57
4.2.9 Forrester versión 0.5.....	59
4.2.10 Forrester versión 0.6.....	60
4.2.11 Forrester versión 0.7.....	61
4.2.12 Forrester versión 0.8.....	62
4.2.13 Forrester versión 0.9.....	63
4.2.14 Forrester versión 1.0.....	64
4.2.15 Forrester versión 1.1.....	66
4.2.16 Forrester versión 1.1.a.....	67
4.2.17 Forrester versión 1.1.b.....	68
4.2.18 Forrester versión 1.1.c.....	69
4.2.19 Forrester versión 1.1.d.....	70
4.2.20 Forrester versión 2.0.....	71
4.2.21 Forrester versión 3.0.....	72
4.2.22 Forrester versión 4.0.....	74
4.2.23 Forrester versión 5.0.....	78
5. Simulación y resultados .....	81
6. Conclusiones .....	100
7. Glosario de variables.....	101
8. Bibliografía .....	106



---

## 1. Introducción

### 1.1 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es el diseño y la programación de un modelo de simulación asistido por computadora que permita representar el mercado de producción de biodiesel de algas en Argentina y analizar su comportamiento en el futuro, y de esta forma brindar las bases técnicas y matemáticas para la toma de decisiones relacionadas con esta industria.

### 1.2 Límites y alcances

- Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación que engloba todo el mercado energético argentino, y fue diseñado para su integración con este último.
- Este trabajo se limitará al análisis exclusivo del biodiesel a partir de microalgas. De aquí en más cada vez que recurramos a las palabras “algas” y “cepas” nos estaremos refiriendo a las microalgas.
- Nos limitaremos al análisis únicamente del biodiesel obtenido del aceite de algas. Decidimos no abarcar otros combustibles como el bioetanol para no complejizar el modelo de forma extrema.
- Se tendrán en cuenta para el análisis solamente tres especies de alga y tres métodos de extracción de aceite.
- No se tendrán en cuenta opciones de financiamiento externo a la industria. Nuestro análisis abordará el caso teniendo como punto de apoyo el autofinanciamiento de las actividades.
- Dado que se trata de un modelo de producción, la demanda real del biodiesel de algas no será abordada. El modelo incorporará parámetros de consumo esperado para agregar el factor económico que impulse la producción.
- No será abordado el proceso de almacenamiento de biodiesel. Nuestro análisis se limitará a las cantidades producidas y vendidas.

- 
- No serán tenidos en cuenta factores sociales o políticos puntuales que puedan afectar la producción.

## 2. Marco teórico

El biodiesel es un biocombustible que se obtiene a partir de aceites vegetales o de grasas animales mediante procesos de esterificación y transesterificación. El biodiesel obtenido a partir de aceites vegetales por el proceso de transesterificación de los triglicéridos fue desarrollado en 1853 por los científicos E. Duffy y J Patrick.

La diferencia con el Diesel obtenido del petróleo es que el biodiesel se obtiene de fuentes de energía renovables y biodegradables, así como también produce menores emisiones de CO<sub>2</sub>, hidrocarburos aromáticos policíclicos, óxido de azufre, nitrógeno y metales durante la combustión (Garibay Hernández *et al.*, 2009). El transporte y almacenamiento es más seguro ya que el biodiesel tiene una baja volatilidad y un elevado punto de inflamación, que varía entre 100°C y 170°C (Biodiesel B100 MSDS).

El biodiesel tiene las mismas propiedades del diesel obtenido del petróleo que se emplea como combustible para automotores por lo cual no se necesitaría hacer ninguna modificación de los motores, incluso el uso de biodiesel aumenta la vida útil de los mismos gracias a sus efectos de lubricante (Garibay Hernández *et al.*, 2009). El biodiesel también se puede mezclar en cualquier proporción con el diesel de petróleo, por lo cual la demanda de este producto aumentará en la medida que se incremente las normativas ambientales y los distintos Estados avancen en la implementación de fuentes de energía renovables.

Actualmente la principal materia prima para la producción de biodiesel son los aceites obtenidos de vegetales oleaginosos, entre ellos palma, maíz y soja. Sin embargo, el bajo rendimiento lipídico de estas fuentes, sumado al costo de la materia prima, los periodos de producción restrictivos y la gran extensión de tierras requeridas para su producción, provocan que el biodiesel no pueda suplantar a los combustibles fósiles (Schenk *et al.*, 2008).

Ante esta situación, surge la oportunidad de recurrir a las microalgas como una fuente alternativa del aceite necesario, ya que presentan múltiples ventajas respecto de otras materias primas:

- El rendimiento en términos de aceite obtenido es sustancialmente mayor que otros oleaginosos, como lo muestra la Tabla 2.1.
- Su cultivo no requiere de tierras fértiles, por lo que pueden producirse en lugares no aptos para la agricultura.
- No se ven afectadas por estacionalidad. Su producción puede realizarse durante todo el año, a diferencia de cultivos agrícolas que pueden explotarse solamente en determinados meses.
- La cantidad de agua necesaria para su crecimiento es menor que los vegetales antes mencionados. Además dependiendo de la especie pueden sobrevivir tanto en aguas saladas como dulces y hasta residuales.
- El residuo del proceso de obtención de aceite puede reciclarse para obtener subproductos.

(Chisti, 2007; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008).

Cultivo	Rendimiento de aceite (L/ha)
Maiz	172
Soja	446
Canola	1.190
Jatropha	1.892
Cocotero	2.689
Palma aceitera	5.950
Microalga (30% peso seco en aceite)	58.700
Microalga (70% peso seco en aceite)	136.900

Tabla 2.1: Comparación de algunas fuentes de biodiesel (Chisti, 2007).

La producción de biodiesel a partir de algas, en términos generales, por las etapas que se indican en la Figura 2.1.

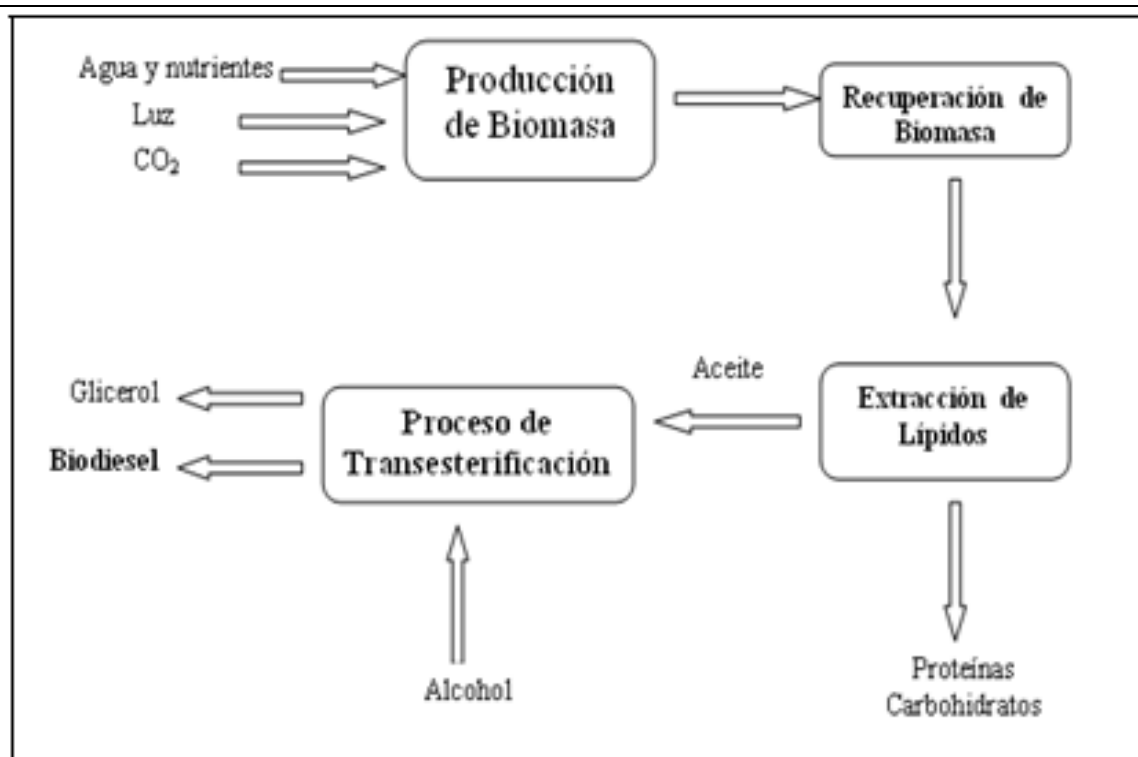


Figura 2.1: Etapas en la producción de biodiesel a partir de algas.

La primera etapa consta del cultivo de la cepa. En los sistemas destinados a esta acción se proporcionan los nutrientes, CO<sub>2</sub> y luz para el crecimiento del microalga. Una vez desarrollado el cultivo se extrae de su medio y se filtran el agua y los nutrientes, los cuales son recirculados hacia la etapa inicial. La biomasa de algas obtenida es sometida a un proceso para la separación del aceite, dejando como residuo una pasta libre de lípidos y rica en carbohidratos y proteínas, que sirve como materia prima para otras industrias. La etapa final es la transformación del aceite recuperado en biodiesel y glicerol mediante la transesterificación, en la cual intervienen catalizadores que facilitan el proceso (Chisti, 2008; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008).

## 2.1 Las microalgas como materia prima para la producción de biodiesel

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos unicelulares muy eficientes, con una elevada productividad, que se encuentran en varios hábitats como el

---

suelo, aguas residuales, aguas dulces y marinas, por lo cual se considera en base a estudios que pueden ser una fuente importante de biomasa para la obtención de energía y otros productos como moléculas químicas, biopolímeros y biocombustibles (Sheehan *et al.*, 1998; Huntley y Redalje, 2004).

Las microalgas viven en un amplio rango de pH y temperatura, requiriendo dióxido de carbono, agua, luz solar como componentes básicos para su crecimiento y otros nutrientes como fosforo, potasio y nitrógeno.

Encontrar una cepa de alga para cultivar no es un problema. Las dificultades aparecen por tener un procedimiento adecuado para el cultivo, ya que las cepas con mayor porcentaje de lípidos en su composición no son las cepas más resistentes o las que más rápido crecen. Es necesario además controlar el ambiente de crecimiento de la especie en cultivo para evitar que se contamine con otras cepas u otros microorganismos peligrosos, por lo que los cuidados del medio productivo son intensos hasta que se puede extraer el alga para su procesamiento (Chisti, 2008).

Determinar el contenido de lípidos de las microalgas tiene una alta dificultad causada por la variación ante condiciones de cultivo. El crecimiento en ambientes que no son favorables o bajo condiciones de estrés influye en el incremento de los lípidos (Huntley y Redalje, 2004). La composición de lípidos en las microalgas se encuentra en el rango del 20 al 50% del peso seco, pero se han encontrado valores superiores al 80% de lípidos en peso seco bajo cuidadosa selección de cepas y condiciones de cultivo estresantes por deficiencia de nutrientes (Chisti, 2007; Schenk *et al.*, 2008). La tabla 2.2 recopila el porcentaje del peso seco en aceite que se puede obtener de algunas cepas.

Microalga	Contenido de aceite (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25–75
<i>Chlorella sp.</i>	28–32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16–37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25–33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris sp.</i>	20–35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31–68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35–54
<i>Nitzschia sp.</i>	45–47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20–30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50–77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15–23

Tabla 2.2: Contenido de aceite de algunas microalgas (Chisti, 2007).

## 2.2 Producción de microalgas

La biomasa de microalgas, desde el punto de vista energético, se podría considerar como la materia orgánica que se origina de un proceso biológico, sea este espontáneo o por influencia del hombre. Es el resultado de la transformación de la energía radiante del sol, dióxido de carbono, y otros nutrientes, en energía química por el proceso de fotosíntesis, como se esquematiza en la figura 2.2. Entre los compuestos sintetizados por el alga se encuentran aceites, que luego de un proceso de refinación pueden ser transformados en combustibles.

Además de la aplicación en la industria del biodiesel, el cual es el motivo de nuestro estudio, existen cultivos de microalgas con la finalidad de obtener productos de gran valor para las industrias alimenticias y farmacéuticas, como pigmentos carotenoides, ácidos grasos esenciales como omega 3, omega 6, compuestos anticancerígenos, antibióticos y vitaminas. También se han explotado las algas como método para la purificación de aguas residuales y la producción de bioenergía (Sheehan *et al.*, 1998; Huntley y Redalje, 2004).

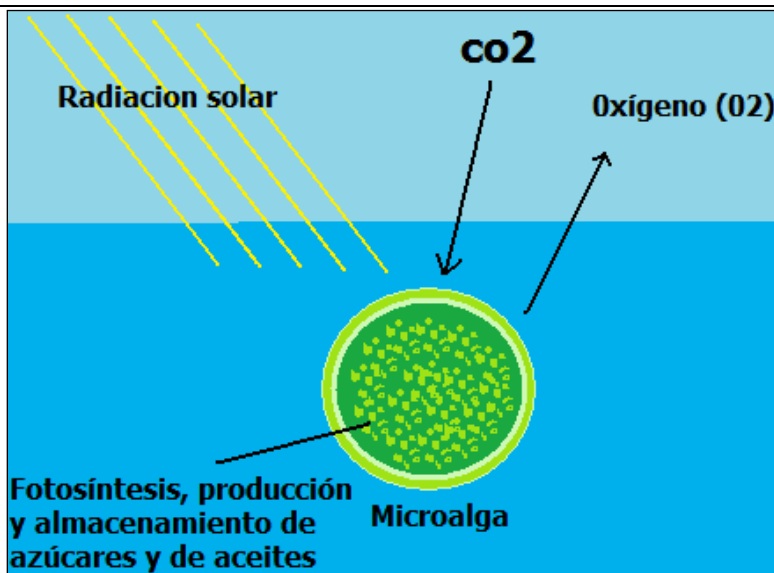


Figura 2.2: Fotosíntesis del alga.

## 2.3 Algunos tipos de microalgas estudiadas para la obtención de biodiesel

### 2.3.1 *Chorella Vulgaris*– Algas Verdes

Estas microalgas pertenecen al género *Chorella* de la clase Chlorophyceae, son muy abundantes especialmente en aguas continentales. Se multiplican rápidamente a través de la fotosíntesis, requiriendo dióxido de Carbono, agua, luz solar y cantidades mínimas de minerales. La producción de pigmentos como carotenoides en esta cepa ha sido estudiada desde la década del '50, con resultados que varían en función de las diferentes condiciones de estrés a los que se somete el cultivo, ya sea por alta intensidad de luz, salinidad o deficiencia nutricional (Mansson, 2012; Spoehr y Milner, 1948).

### 2.3.2 *Spirulina*– Algas Verde Azules

Es una cianobacteria que presenta mucho interés desde su descubrimiento en la década de los 60 como fuente de alimento. Tiene la forma pequeños filamentos en espiral, forma que facilita la cosecha. La *spirulina* tiene la particularidad de crecer mejor en ambientes alcalinos, hasta un pH de 10, en condiciones donde otros microorganismos no sobrevivirían, logrando así un cultivo muy higiénico. Su cultivo para industrias alimenticia

y farmacéutica se ve favorecido por su conveniente composición química y rápido crecimiento (Falquet, 2004).

### **2.3.3 *Dunaliella Salina* – Algas Verdes o Clorofíceas**

Es el alga eucariótica más tolerante a condiciones de alta salinidad. En cultivos con salinidades diez veces superior al agua de mar, se obtiene la máxima concentración de betacarotenos, muy preciados para en la elaboración de antioxidantes y alimentos para animales. El uso de esta alga también abarca fertilizantes y tratamientos de aguas residuales (Huntley y Redalje, 2004).

## **2.4 Formas de cultivo**

### **2.4.1 Sistemas Abiertos**

Es el tipo más frecuentemente utilizado. Consta de estanques diseñados para que en su interior las algas se encuentren con un flujo de agua en constante circulación por la acción de paletas giratorias. La Figura 2.3 muestra varios estanques de diferentes tamaños. En estos sistemas se tiene poco control en relación a las condiciones ambientales como la cantidad de CO<sub>2</sub> (siempre que no sea inyectado), temperatura del agua y la intensidad y cantidad de la luz solar. El cultivo quedará condicionado por las condiciones ambientales del lugar donde se encuentre la biorefinería.

Como se ha mencionado en la sección 2.3, las especies utilizadas en la obtención de biodiesel se desarrollan en condiciones que para otras cepas sería difícil sobrevivir, como concentraciones salinas elevadas. Esto añade a las ventajas que poseen los sistemas abiertos siendo procesos económicos y de construcción fácil. Sin embargo la productividad que pueden alcanzar son bajas, cercanas a 1 g/L. (Sheehan *et al.*, 1998; Huntley y Redalje, 2004; Schenk *et al.*, 2008).





Figura 2.3: Estanques para el cultivo de microalgas. (Fuente: <http://www.biodisol.com/>)

### 2.4.2 Sistemas Cerrados

Los sistemas cerrados para el cultivo de microalgas se denominan fotobiorreactores. Son sistemas para el crecimiento de microalgas desarrollados para solucionar los problemas de invasión de otras especies, evitar la pérdida de algas por muerte, baja productividad, etc. Son sistemas con un mayor costo por el uso de tecnologías para tener un alto rendimiento de microalgas. Su construcción puede ser de segmentos tubulares (Figura 2.4), columnas (Figura 2.5) o paneles planos (Figura 2.6), dispuestos en diferentes configuraciones. En el diseño de estos sistemas es importante que los factores como luz, temperatura, salinidad, pH, nutrientes y CO<sub>2</sub> sean controlados para mantener el ambiente óptimo de crecimiento y tratar que la proporción de oxígeno dentro del reactor sea mínima para evitar los procesos de fotorrespiración.

Los costos operativos en estos sistemas son elevados porque se tiene que mantener agitado el cultivo, lo cual implica una inversión importante de un sistema que proporcione la energía mecánica necesaria para evitar sedimentaciones y favorecer la transferencia de los gases. Otra desventaja a nivel económico que afecta a este tipo de cultivo es que se necesitan varios kilómetros de tubos para tener cantidades comerciales de aceite (Sheehan *et al.*, 1998; Huntley y Redalje, 2004; Schenk *et al.*, 2008).



Figura 2.4: Fotobiorreactor tubular en forma horizontal (Fuente: [www.biodisol.com](http://www.biodisol.com)).



Figura 2.5: Fotobiorreactores en columna (Fuente: [nanovoltaics.com](http://nanovoltaics.com)).

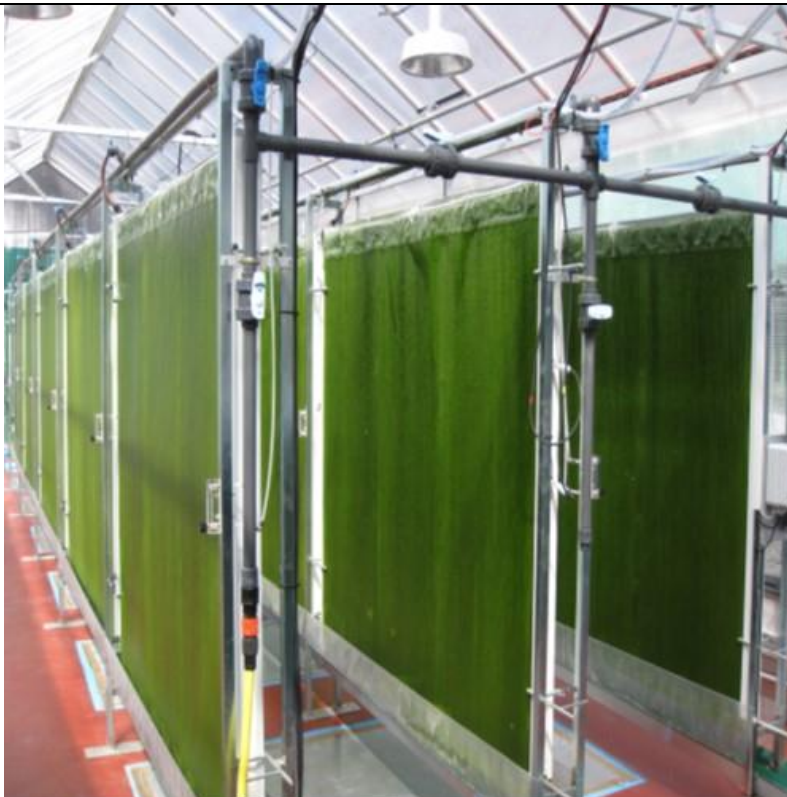


Figura 2.6: Fotobiorreactores de placas (Fuente: [www.upm.es](http://www.upm.es)).

### 2.4.3 Sistemas Mixtos

Los sistemas mixtos combinan características de los sistemas abiertos y de los cerrados presentando ventajas y supliendo las falencias individuales. Se traducen en invernaderos donde se instalan estanques de menores dimensiones que en los sistemas abiertos. Puesto que la estructura del invernadero se comporta como las paredes de los fotobiorreactores, solucionan algunos de los problemas de los sistemas abiertos como minimizar la probabilidad de contaminación con otras especies y mejorar la incidencia de factores como la temperatura y la luz en el cultivo. Al tener un mayor control de los componentes aumenta la tasa de crecimiento, y la productividad logra superar la de los estanques abiertos (Sheehan *et al.*, 1998; Huntley y Redalje, 2004; Schenk *et al.*, 2008).

La Figura 2.7 muestra un ejemplo de invernadero desde dos ángulos. Se puede observar el sistema de paletas que mantienen el medio en constante movimiento con el fin de que todas las microalgas reciban la misma cantidad de componentes básicos.

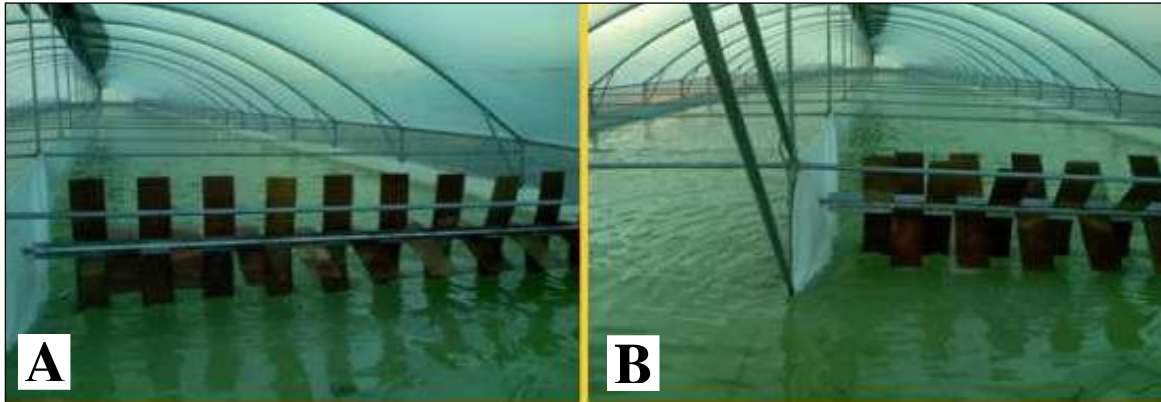


Figura 2.7: Invernadero para cultivo de microalgas (Fuente: [www.oil-fox.com](http://www.oil-fox.com)).

## 2.5 Cosecha de microalgas

Una vez que el cultivo de algas está listo para su cosecha se somete a un proceso para acumularlo, retirarlo de su medio de crecimiento y extraer el agua contenida. Es importante que tal proceso sea de alta eficiencia en costos y energía utilizada para contribuir a la rentabilidad de la producción del biodiesel.

### 2.5.1 Filtrado

El filtrado mediante micropantallas es un método muy útil para las colonias de algas filamentosas como la *Spirulina*, pero requiere un mantenimiento constante por la formación de obstrucciones (Chisti, 2007; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008).

### 2.5.2 Sedimentación y centrifugación

En algas con diámetros mayores a  $5\mu\text{m}$  y paredes celulares gruesas los métodos de centrifugación y sedimentación son posibles de implementar, sin embargo tienen desventajas que las convierten en opciones poco apropiadas para la elaboración de biodiesel: la sedimentación pura consume demasiado tiempo y espacio; por otro lado las



centrifugadoras actuales conllevan un alto costo monetario y energético. Aun así, son efectivas en su utilización para concentrar un pequeño lodo de algas (10 a 20 g/L) en una biomasa conformada (100 a 200 g/L), usándose en combinación con el proceso de extracción de aceite (Chisti, 2007; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008).

### **2.5.3 Floculación**

La floculación es otro método factible, que consta en aumentar el tamaño de las partículas de algas para acelerar su sedimentación. Esto puede lograrse mediante químicos inorgánicos agregados como alumbre o cloruro de hierro, muy efectivos aunque su costo es elevado. Una opción más accesible son polímeros orgánicos catiónicos, que además no contaminan el cultivo, pero cuya efectividad se reduce en ambientes muy salinos. La floculación espontánea es posible en algunas cepas mediante estimulación o estrés ambiental, con la desventaja de ser un proceso muy lento (Chisti, 2007; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008).

## **2.6 Extracción del aceite**

### **2.6.1 Prensa**

En este proceso la biomasa debe estar seca para luego ser prensada en un sistema de tornillo sinfín o tornillos de compresión. El rendimiento de este método es alrededor de un 75% del aceite presente en las algas, por lo que en algunos casos se podría utilizar un sistema combinado de prensado y extracción con solventes orgánicos (Barraza *et al.*, 2009).

### **2.6.2 Lixiviación con hexano**

Es un proceso de separación de aceite de la biomasa mediante un solvente orgánico, principalmente hexano. Desde el punto de vista químico los lípidos son escasamente solubles en agua pero pueden ser extraídos con solventes orgánicos que tengan baja polaridad.

Es necesaria la destilación del producto lixiviado para recuperar el solvente y reutilizarlo, proceso de un costo elevado y de alta necesidad energética, y con riesgo de contaminación de la biomasa remanente. Los procesos de extracción con hexano o sistemas combinados de prensado y solvente pueden llegar a obtener aproximadamente el 90% del aceite presente en las algas (Barraza *et al.*, 2009).

### 2.6.3 Extracción Supercrítica

Este método consiste en la obtención de producto mediante el uso de CO<sub>2</sub> en estado supercrítico. Este proceso tecnológico tiene ventajas como bajas temperaturas de extracción; no se utilizan disolventes orgánicos, por ende no hay emisión de productos orgánicos volátiles. El rendimiento de aceite es alrededor del 95% (Barraza *et al.*, 2009).

## 2.7 Refinado del aceite

El proceso por excelencia para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales es la transesterificación, ya que el biocombustible obtenido mediante este método reduce significativamente la corrosión dentro de los motores, extendiendo así su vida útil. Consta de reemplazar el glicerol de los triglicéridos que conforman el aceite por alcoholes de cadena corta, generalmente etanol y metanol, obteniendo por resultado moléculas de metil ésteres similares a los hidrocarburos, que forman el biodiesel, y glicerol. La figura 2.8 esquematiza el proceso.

Esta reacción química tiene la influencia de los siguientes factores:

- La calidad de la materia prima, en nuestro caso el aceite de microalgas.
- La cantidad, la calidad y el tipo de alcohol que usamos en el proceso.
- El catalizador usado.
- Las condiciones del proceso (T°, tiempo, etc.).

Los catalizadores más comunes son de tipo básico, entre los cuales encontramos: básicos heterogéneos (MgO, CaO, Na/NaOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), y básicos homogéneos (KOH, NaOH). También es posible recurrir a catalizadores enzimáticos: lipasas

intracelulares y extracelulares. (Barraza *et al.*, 2009; Chisti, 2007; Chisti, 2008; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Schenk *et al.*, 2008).

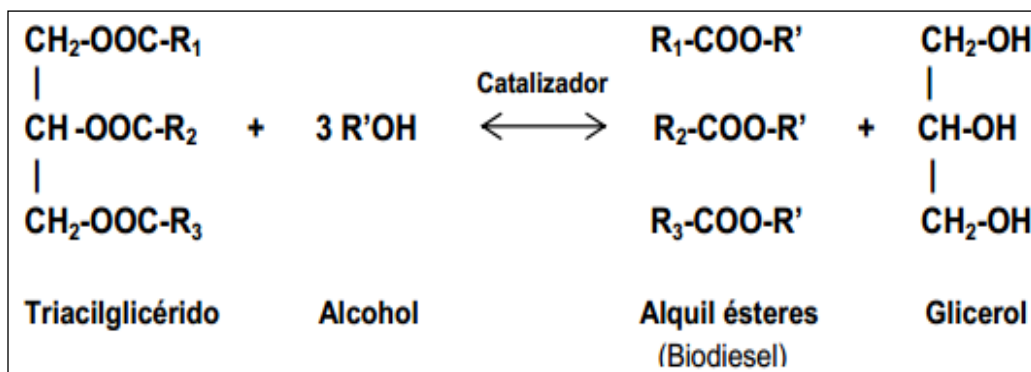


Figura 2.6: Transesterificación de aceite en biodiesel. R1 a R3 son grupos de hidrocarbonos. (Chisti, 2007).

## 2.8 Industria de biodiesel de algas en Argentina

En la Argentina el único emprendimiento nacional de producción de biodiesel de algas a gran escala es llevado a cabo por la multinacional Oil Fox S.A., empresa que cuenta con más de una década de participación en la industria de los biocombustibles.

Fundada en 1997, su primer fabrica, ubicada en la provincia de Santa Fe, producía biodiesel a partir de aceite de soja hasta que la crisis económica del 2002 llevo al cierre del proyecto. Años más tarde Oil Fox comenzó el cultivo de microalgas para fines alimenticios y farmacéuticos, y luego de realizar investigaciones en distintos puntos del mundo, ingresaron nuevamente al mercado del biodiesel en 2005, esta vez a partir del aceite extraído de las algas. En septiembre de 2010 funda la primera planta de biodiesel de algas del país. Comenzando con una relación de aceite de 90% soja – 10% algas, fue aumentando la capacidad productiva hasta lograr abastecerse únicamente del aceite de algas. Actualmente posee una capacidad productiva de más de 100.000 toneladas de biodiesel al año (Navarro y Loberza, 2011).

---

Al ser la única empresa en el país que cumple con los requisitos de nuestra investigación, es decir, que produce biodiesel de algas abarcando toda la cadena productiva, desde el cultivo del alga hasta la comercialización del biocombustible, nuestro modelo funcionará en base a la información recolectada del funcionamiento de Oil Fox. Sin embargo, la construcción del modelo permite la incorporación de nuevos datos, en tanto aparezcan en el futuro otras empresas que se incorporen a la industria.

Existe un proyecto de investigación llevado a cabo por especialistas de la Universidad Nacional de Cuyo y financiado por la empresa de soluciones energéticas Energy Traders S.A. para la producción de algas para biodiesel y alimentos proteicos en la provincia de Mendoza. Este emprendimiento, bajo el nombre de Algae-Oil, aún está en una etapa muy temprana de desarrollo, por lo que no contribuye al funcionamiento del modelo de simulación (Ponce, 2012). En caso de que el proyecto alcance el punto de producción a gran escala, sus resultados pueden incorporarse al simulador sin mayores dificultades.

Otra empresa que ha incursionado en el estudio de las microalgas como materia prima para biodiesel es la firma Biocombustibles del Chubut, que comenzó a operar en 1996 en estudio de formas alternativas de energía. Entre los años 2007 y 2010, en cooperación con el gobierno provincial, inicio la investigación para la producción de biodiesel de algas en Comodoro Rivadavia, en asociación con la ya mencionada Oil Fox (Guajardo, 2007; Diario Crónica, 2008). Sin embargo la información oficial del proyecto es muy contradictoria, a tal grado que es imposible determinar la veracidad de la misma y el estado real de desarrollo del proyecto, si existe producción a escala o aún se encuentra en etapa experimental. La falta de respuestas sobre este y otros proyectos ha llevado a la denuncia penal de su dueño (OPI Santa Cruz, 2009), pero no profundizaremos en este aspecto ya que escapa a los fines de este trabajo de investigación.

La última noticia publicada sobre el tema data de Febrero de 2011 y relata la absorción de Biocombustibles del Chubut por parte de la firma European Aeronautic Defence and Space Company N.V. (EADS), corporación industrial de desarrollo aeroespacial y de defensa, dueña de Airbus y Eurocopter (Cúneo, 2011). Dado que se desconoce si EADS produce biodiesel en el país o exporta el aceite de algas para su refinamiento en Europa, y sumado a la falta de información clara sobre el proyecto, hemos



---

decidido no tener en cuenta Biocombustibles del Chubut en la recopilación de datos para el modelo de simulación.

### **2.8.1 Características productivas de Oil Fox**

La mayoría de las investigaciones sobre biodiesel de algas aseguran que los elevados costos operativos en relación con las ganancias obtenidas tienen como consecuencia que la actividad sea poco rentable a nivel económico, y solo destacan las ventajas medioambientales. Oil Fox ha desarrollado diversos avances técnicos que contribuyen a que su estructura de costos sea tal que logra refutar lo antedicho, logrando rentabilidad en sus operaciones.

Algunas de estas mejoras se enumeran a continuación:

- El diseño de los invernaderos donde se cultivan las algas poseen tecnologías patentadas por los socios propietarios de la empresa que tienen como efecto un funcionamiento de fotobiorreactores, con lo que los costos se reducen y el rendimiento es mayor.
- La estructura de los invernaderos son fabricadas de plástico reciclado de botellas, de costo menor que el hierro galvanizado utilizado en ese tipo de instalaciones.
- La energía eléctrica necesaria para abastecer las instalaciones es generada dentro de la misma planta. Mediante biodigestores se procesan los desechos obtenidos en la zona para obtener gas metano, que a su vez hacen funcionar generadores eléctricos lo suficientemente grandes como para alimentar toda la planta.
- El compost producto de la digestión anaeróbica de los desechos es utilizado como nutrientes para alimentar las algas en cultivo, eliminando la necesidad de comprarlos.
- El dióxido de carbono necesario para el crecimiento de las algas es obtenido de una central termoeléctrica cercana. Hasta que la red de ductos para

---

transportar el CO<sub>2</sub> desde una planta a la otra esté finalizada, se utilizan tanques para inyectar el CO<sub>2</sub> en los invernaderos.

- Para iluminar las algas y contribuir a su fotosíntesis se utilizan luces LED, logrando una mayor concentración de lípidos en el alga con un bajo consumo eléctrico.
- Una vez extraído su aceite, las algas son sometidas a un proceso bromatológico para hacerlas aptas para el consumo, por lo que se venden a industrias farmacéuticas y alimenticias que fabrican suplementos dietarios ricos en proteínas.

Estas y otras características redundan en que los costos de Oil Fox no superen los U\$S 200 por tonelada de biodiesel producido (Navarro y Loberza, 2011).

### 3. Dinámica de Sistemas

La Dinámica de Sistemas es la metodología que se utiliza para estudiar y modelar el comportamiento y la relación de los elementos de un sistema en el tiempo.

Los sistemas se pueden entender como una unidad en la que sus elementos interactúan ligados entre sí, que constantemente afectan de forma recíproca su comportamiento a lo largo del tiempo y actúan con un propósito en común.

Jay Forrester, Ingeniero Eléctrico estadounidense y profesor del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT) desarrolla en los años 50 la Dinámica de Sistemas como un soporte informático para mejorar la comprensión de los procesos industriales en los que se encuentra una realimentación.

En la actualidad la Dinámica de Sistemas, con la ayuda de programas informáticos, permite una simulación eficiente de sistemas complejos reales. El valor de la simulación es la mejora en la comprensión de los comportamientos del sistema comparado con el sistema real, lo cual nos proporciona una información con un bajo costo y un entendimiento más rápido de las situaciones futuras que no se pueden observar en el sistema real.

La simulación de sistemas según el modelo puede ser catalogada de dos formas, modelos de predicción donde se desea obtener datos exactos de la situación futura del sistema, o los modelos de gestión donde se quiere conocer entre alternativas cual es la mejor, en estos modelos, la precisión no es necesaria puesto que la comparación es de utilidad. El tipo de simulación generada mediante la Dinámica de Sistemas corresponde a este segundo grupo. No se pretende predecir a cabalidad cómo se comportará el sistema, sino aportar información de gran utilidad para la toma de decisiones en el sistema real.

Son muchas los problemas reales en los cuales se pueden aplicar la Dinámica de Sistemas, como pueden ser cuestiones económicas, sociales, poblacionales, industriales, ambientales, energéticas, entre otros.

### **3.1 Construcción de un modelo dinámico**

#### **3.1.1 Reconocer la problemática**

Para identificar la problemática que se quiere simular es necesario realizar una descripción de lo que entendemos que es el problema, los antecedentes de ese problema y las causas que lo afectan.

Es necesario encontrar todos los elementos importantes que están presentes y los que están ausentes para alcanzar un análisis profundo de la situación, lo cual determinará la presunción de qué vínculo y comportamiento tienen con el problema.

Los elementos que se encontrarán van a formar el sistema y podrán estar ligados directa o indirectamente entre sí o con la problemática de una manera que no necesariamente se identifique con claridad.

El primer paso para definir el sistema es describir en 10 renglones lo que deseamos modelar añadiendo los aspectos relacionados directamente con el problema y los que se relacionan indirectamente con el problema. Este sistema será el que vamos a investigar para proponer soluciones.

### 3.1.2 Diagrama causal

Es una herramienta muy útil en Dinámica de Sistemas para ilustrar las relaciones básicas de realimentación de la estructura del sistema, esto es en definitiva un resumen de todas las relaciones importantes del sistema y no de todas las relaciones existentes. Los diagramas causales sirven de orientación para la comprensión y elaboración de modelos.

La elaboración de un diagrama causal debe tomar los elementos más importantes que se relacionan en el sistema, cuando se conocen las variables del sistema y la relación causal entre las mismas se representa gráficamente. Las relaciones entre diferentes variables se representan por medio de flechas, las cuales deberán ir acompañadas por un signo negativo o un signo positivo.

Cuando la flecha va acompañada de un signo positivo (+) decimos que a la variable donde se dirige la flecha sufrirá un cambio en el mismo sentido que la variable anterior. En este caso las variables actúan de la siguiente manera; cuando un incremento de **T** produce un incremento en **U**, o bien cuando disminuye **T** provoca una disminución de **U**.

Como ejemplo, en la Figura 3.1 tomamos de nuestro modelo las siguientes variables: un incremento del “Total biomasa obtenida” produce un incremento de “Biomasa para producción”.

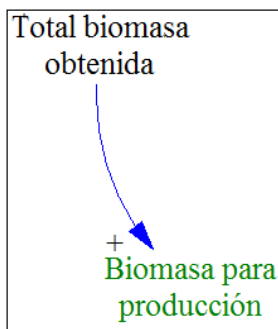


Figura 3.1: influencia positiva entre variables en diagrama causal.

Cuando la flecha va acompañada por un signo negativo (-) decimos que a la variable a donde se dirige la flecha tendrá sentido contrario a la variable anterior. En este

caso las variables actúan de la siguiente manera: ante un incremento de **T** se produce una disminución de **U**, o bien cuando disminuye **T** aumenta **U**.

Como ejemplo, en la Figura 3.2 se tomó de nuestro modelo las siguientes variables; un aumento de la “Tasa de impuestos” produce una disminución en los “Resultados del periodo”.

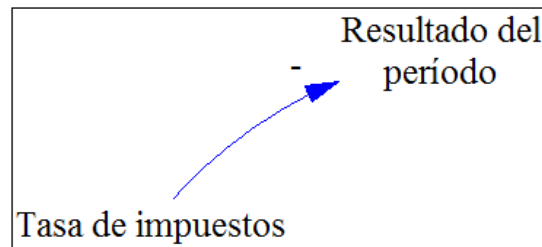


Figura 3.2: influencia negativa entre variables en diagrama causal.

### 3.1.3 Bucles de realimentación

La realimentación en la Dinámica de Sistemas simboliza el proceso dinámico que se desplaza por una serie de causas y efectos entre un conjunto de variables que terminan volviendo a la causa original.

Un bucle de realimentación es un conjunto de variables que se encuentran interconectadas por relaciones de influencia que pueden ser negativas o positivas, creando un camino cerrado que tiene su inicio en una variable inicial y que termina en la variable inicial.

Los bucles de realimentación que existen pueden ser de dos tipos, los bucles de realimentación negativa (estabilizadores) y los bucles de realimentación positiva (reforzadores).

Un bucle de realimentación es positivo (+) cuando todas las flechas dentro del ciclo tienen un signo positivo o si en el ciclo se encuentran un número par de flechas negativas. De no ocurrir esto el bucle de realimentación es negativo (-).

Los bucles de realimentación positiva generan un comportamiento de crecimiento o decrecimiento del sistema, este efecto genera que el sistema se aleje del punto de equilibrio. Esto quiere decir, que tienen una tendencia a desestabilizar los sistemas

de una forma exponencial. Con lo que conseguiremos que el sistema crezca de forma explosiva creando un “círculo virtuoso” o conseguiremos que el sistema decrezca en forma de remolino creando un “círculo vicioso”, estos bucles también son conocidos como de “bola de nieve”. La Figura 3.3 muestra un bucle de realimentación positivo.

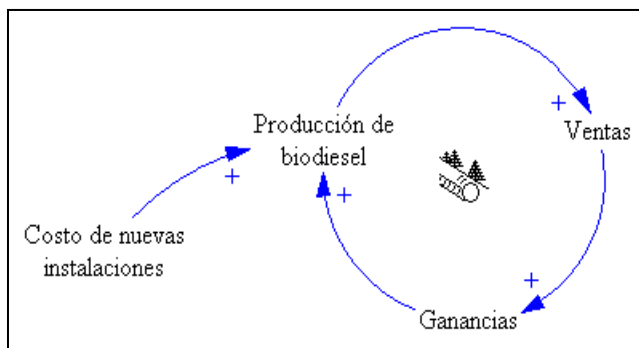


Figura 3.3: bucle de realimentación positiva.

Un bucle de realimentación negativa tiene un comportamiento en el cual una variación de un elemento se propaga por todo el bucle de manera que generara un efecto de oposición a la variación inicial. Estos bucles tienen tendencia a buscar autorregularse hasta llegar a un punto de equilibrio. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de bucle de realimentación negativa.

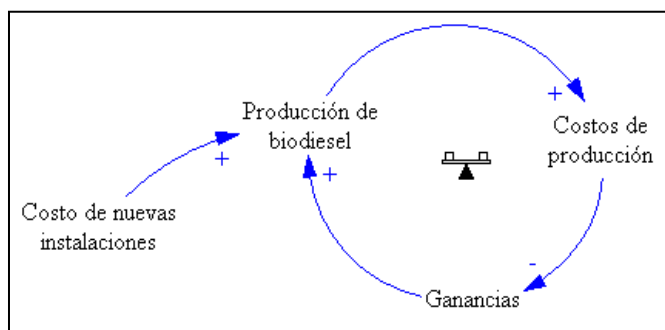


Figura 3.4: bucle de realimentación negativa.

El diagrama causal de un sistema no es compuesto exclusivamente por un bucle de realimentación positiva o negativo, sino por lo contrario engloba numerosos bucles positivos y negativos que comparten variables y relaciones causales. Esta combinación de bucles de realimentación puede conseguir numerosos resultados.

### **3.1.4 Retardos**

Los retardos son propios a la mayoría de los sistemas y podrían tener una influencia importante en el comportamiento de los sistemas. Los retardos simularan los lapsos de tiempo que se demora la transferencia de información o hasta que se produzca una acción. Sencillamente un retardo es el tiempo que pasará entre una causa y sus efectos.

En los bucles de realimentación positiva un retardo producirá que el crecimiento o decrecimiento del sistema no se produzca rápidamente como se esperaría. En el caso de los bucles de realimentación negativa un retardo no producirá una aproximación suave al equilibrio, revelara resultados que se excedan, por encima o por debajo del punto de equilibrio, induciendo a que el sistema oscile.

### **3.1.5 Paso de un diagrama causal a un diagrama Forrester.**

Un Diagrama Causal no es suficiente para distinguir el comportamiento de un sistema porque las trayectorias que describen las variables se necesitan observar con el transcurso del tiempo. Por lo cual es necesario que se incorporen los datos de tiempo y magnitudes de las variables.

Disponiendo de un modelo matemático del sistema y para poder simularlo de manera computacional, se tiene que traducir el Diagrama Causal a un Diagrama de Forrester en el cual se obtendrán las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del sistema.

### **3.1.6 Diagrama de Flujo o de Forrester**

El Diagrama de Flujo también se conoce con el nombre de Diagrama de Forrester por su creador Jay Forrester. Este diagrama está basado en que si estamos en la capacidad de controlar los flujos de un sistema, entonces podemos controlar su comportamiento.

Los niveles son elementos de acumulación que varían únicamente en función de los flujos. Por lo tanto tenemos que observar la evolución de los flujos y las formas que varían en el control del sistema.

Para la traducción del Diagrama Causal al Diagrama Forrester los elementos del diagrama causal se tienen que traducir, las cantidades (magnitud) como áreas o volúmenes son Niveles, los elementos que varían en función del tiempo como área/tiempo, volumen/tiempo son Flujos, los niveles que van a permanecer constantes como área/pileta se definen como Variables Auxiliares.

“Niveles” son los elementos que representan acumulación de material. Muestran en cada periodo de simulación la cantidad contenida, que varía en función de los elementos que se conocen como “Flujos”. Se representa con un recuadro que tiene escrito el nombre de la magnitud o material que acumula, como puede verse en el ejemplo de la Figura 3.5.

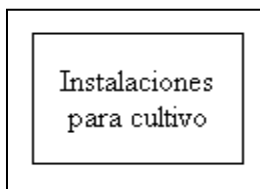


Figura 3.5: Representación de una variable de nivel.

“Nubes” son fuentes o sumideros de recursos para el sistema. El funcionamiento de este tipo de variable es similar a los “Niveles” con la diferencia que los recursos son inagotables, no existe un límite a lo que pueden acumular o vaciar. La forma de representar la variable Nube se observa en la Figura 3.6.

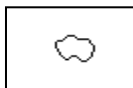


Figura 3.6: Representación de una nube.

“Flujos” son las variables que representan movimiento de material de una variable a otra. Muestran la cantidad de material que se transfiere durante una unidad de



tiempo entre variables de Nivel, entre Nubes, y de una Nube a un Nivel o viceversa. Se representa como se ve en la Figura 3.7, mediante una flecha gruesa con una válvula en el centro.

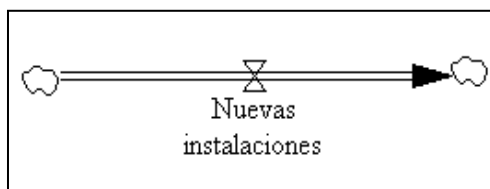


Figura 3.7: Representación de una variable de flujo.

“Variables Auxiliares” son elementos del sistema que pueden tomar valores constantes o modificables que condicionan el comportamiento de variables Flujo o de otras Auxiliares. Nunca influye sobre una variable de Nivel. Su forma gráfica es similar un Nivel, pero sin el recuadro, tal como aparece en la Figura 3.8.

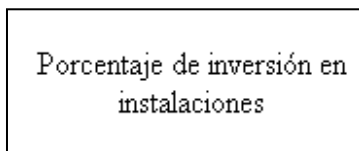


Figura 3.8: Representación de una variable auxiliar.

“Canal material” es un nexo entre variables que sirve para representar el flujo de transferencia de una magnitud física que se conserva. Puede vincular variables Auxiliares entre sí, Flujos entre sí, Auxiliares y Flujos o viceversa, y desde Niveles hacia Auxiliares o flujos. Consta de una flecha continua de punta sólida, como aparece en la Figura 3.9.



Figura 3.9: Representación de un canal material.

“Canal de información” son nexos que sirven para simbolizar el flujo de información que existe entre una variable del sistema y las variables sobre las que influyen. Vincula las mismas variables que el Canal Material, y su representación gráfica es una flecha discontinua, tal como se ve en la Figura 3.10.

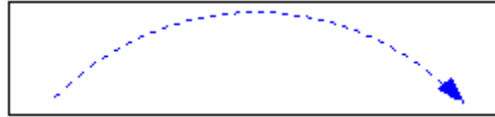


Figura 3.10: Representación de un canal de información.

“Retardos” son condicionantes que se agregan a los Canales Materiales o de Información e influyen en su tiempo de ejecución. Pueden existir elementos del sistema que retienen el paso de material o no revelen una respuesta inmediata entre una acción concreta y sus consecuencias. Un Retardo permite incorporar esos fenómenos al modelo. Se representa mediante dos líneas paralelas que cruzan el Canal Material o de Información, como muestra el ejemplo de la Figura 3.11.

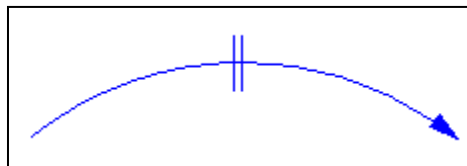


Figura 3.11: Representación de un retraso en un canal de información.

### 3.1.7 Simulación por computadora

Una vez logrado el diagrama de flujo es necesario transcribirlo a un programa computacional especializado, que permite incorporar las ecuaciones y datos que definirán el comportamiento de cada variable. De esta forma se hace posible una simulación del modelo teórico del sistema. Estos programas a su vez pueden configurarse para que la información obtenida de cada corrida de simulación sea visualizada según los requerimientos del usuario.

---

En la actualidad existen en el mercado diferentes programas idóneos para la simulación de sistemas dinámicos. Algunos de ellos son PowerSim, Stela, IThink y Vensim PLE. Este último es que hemos elegido para la realización de nuestro Trabajo de Investigación.

Vensim PLE es un software desarrollado por la compañía Ventana Systems Inc., que fue fundada en 1985 por el propio Jay Forrester y otros profesores del MIT. Los factores que influyeron en nuestra elección fueron que es gratuito para uso académico, tiene muchos servicios que otros productos no ofrecen en sus versiones gratuitas y se adapta muy bien a nuestros requisitos por ser una herramienta computacional idónea para la disciplina de modelado y simulación de escenarios con base en la Dinámica de Sistemas.

### **3.1.8 Validación del modelo**

En esta etapa se evaluará y validará el modelo, determinando si mediante su utilización en simulaciones se pueden probar las hipótesis y los comportamientos que sirvieron para construir el modelo. Puesto que en Dinámica de Sistemas un modelo posee cierto nivel de detalle en mayor o menor medida dependiendo de lo establecido por su diseñador, la validez del modelo recae en la utilidad y credibilidad que represente para su usuario, según establece Shreckengost (1985). Con esto en mente existen diversos criterios para validar un modelo que relegan los datos históricos o los resultados obtenidos a un segundo plano, poniendo al modelo mismo en el centro de atención.

El primero de estos criterios es de correspondencia de estructuras. Dado que es la estructura del sistema lo que condiciona su funcionamiento, es correcto razonar que si cada componente de la estructura del modelo tiene su contraparte en el sistema real en estudio, y cada aspecto importante del mundo real está reflejado de algún modo en el modelo, el comportamiento de ambos será similar.

Un segundo criterio tiene que ver con la correspondencia entre comportamientos. En casos donde hay evidencia de evolución del sistema real en el tiempo, si se ajustan las condiciones del modelo para imitar las del mundo real en algún momento pasado, los datos obtenidos deben replicar los propios del mundo real en ese momento hasta el presente, incluyendo el periodo de estudio. Como usualmente la calidad de esta

información es pobre, sobre todo si se utilizan variables cualitativas que carecen de información.

Otro criterio, relacionado con testeos de implicación de políticas, es analizar si ante determinadas políticas tomadas el modelo responde de igual forma a como lo haría el sistema del mundo real si se llevan a cabo esas mismas políticas.

Se debe destacar que los modelos de Dinámica de Sistemas no desean ser proyecciones de alta exactitud, sino herramientas para diseñar alternativas de acción ante un escenario más o menos detallado por el usuario, por lo cual la validación debe contemplar esta apreciación.

### **3.1.9 Análisis del modelo**

Para el análisis de los modelos de Dinámica de Sistemas se debe evaluar dos aspectos primordiales: Estructura de realimentación y Sensibilidad.

La estructura de realimentación se analiza observando cómo las variaciones en los bucles llevan a diferentes resultados, accediendo a las relaciones entre las variables que más se acercan al comportamiento del sistema.

Para el análisis de sensibilidad del modelo se describe cuáles son los parámetros que estimularán las variaciones considerables en los resultados. Estos deben estimarse cuidadosamente, así como las hipótesis de los escenarios propuestos.

## **4. Construcción del modelo**

Al momento de comenzar a construir el modelo de simulación, mucho tiempo antes de descubrir que actualmente existe un único participante del sector, nos planteamos cómo sería el funcionamiento de una sola fábrica de producción de biodiesel de algas, para luego extender la aplicación a toda la industria. De esta forma el modelo concluido concibe a la industria como una única planta productora de biodiesel de algas, independientemente de la cantidad de empresas la compongan.

Desde el mismo inicio tuvimos en cuenta los pasos primordiales para la obtención del biodiesel, a saber, el cultivo de las algas, la extracción del aceite y la transesterificación del mismo, por lo que esta sucesión de procesos constituyen el eje

principal del modelo. La comercialización del biodiesel y de la biomasa remanente añade el factor económico al modelo. La estructura de costos del proceso productivo y la infraestructura es tomada en cuenta para el cálculo de las ganancias del mercado, que a su vez permiten concebir la idea de una reinversión en la industria. Esta conexión de nuevo con la parte productiva representa la realimentación necesaria para que el modelo pueda analizarse desde el punto de vista de la dinámica de sistemas.

Los datos que alimentan el modelo fueron obtenidos de diversas fuentes. En cuanto a los datos técnicos y científicos relacionados a las especies de algas, sus características, y los procesos industriales llevados a cabo, se obtuvieron gracias a la información de libros de biología, *papers* científicos y otros trabajos de investigación académicos: las publicaciones de Barraza *et al.* (2009), Chisti, Y. (2007 y 2008), Falquet, J. (2004), Garibay Hernández *et al.* (2009), Huntley M. E. y Redalje, D. G. (2007), Miyamoto, K. (1997), Mansson, S. (2012) Schenk *et al.* (2008), Sheehan *et al.* (1998), Shreckengost *et al.* (1985), y Spoehr, H. A. y Milner, H. W. (1948). La información del mercado nacional de biodiesel y del funcionamiento de Oil Fox fue obtenida de artículos periodísticos de Cúneo, C. (2011), Guajardo, C. (2007), Navarro, A. A. y Loberza, F. V. (2011), Ponce, G. (2012), y OPI Santa Cruz (2009), además de páginas de internet como el sitio oficial de Oil Fox S.A. y el sitio de la Secretaría de Energía.

A continuación describiremos paso a paso la construcción del modelo hasta llegar a la versión final.

## 4.1 Diagrama causal

En primera instancia se plantea un diagrama de influencias, cuyo propósito es enumerar las variables implicadas en el fenómeno que deseamos describir, dentro de los límites establecidos, y cómo influyen unas sobre otras.

### 4.1.1 Causal versión 01

La primera versión del diagrama causal incluye las primeras variables que representan factores observados en las fuentes consultadas, a saber, la especie de alga, la

productividad de la misma, el terreno disponible para su cultivo, el dióxido de carbono necesario para el cultivo, la cantidad de biodiesel fabricado y vendido, y costos asociados, entre otras.

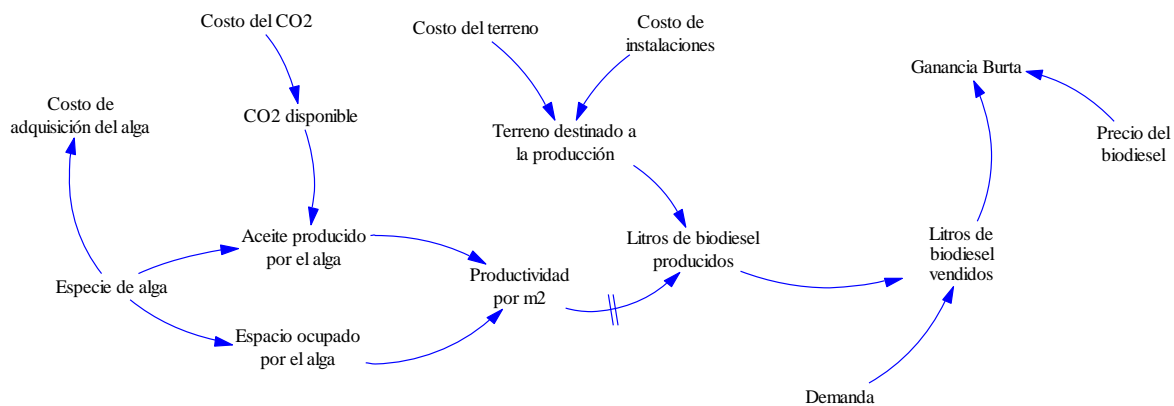


Figura 4.1: diagrama causal versión 01.

### 4.1.2 Causal versión 02

Se incorpora el primer lazo de realimentación, concibiendo la incorporación de más terreno para producción a partir de las ganancias por las ventas de biodiesel. Surge el concepto de rentabilidad del negocio.

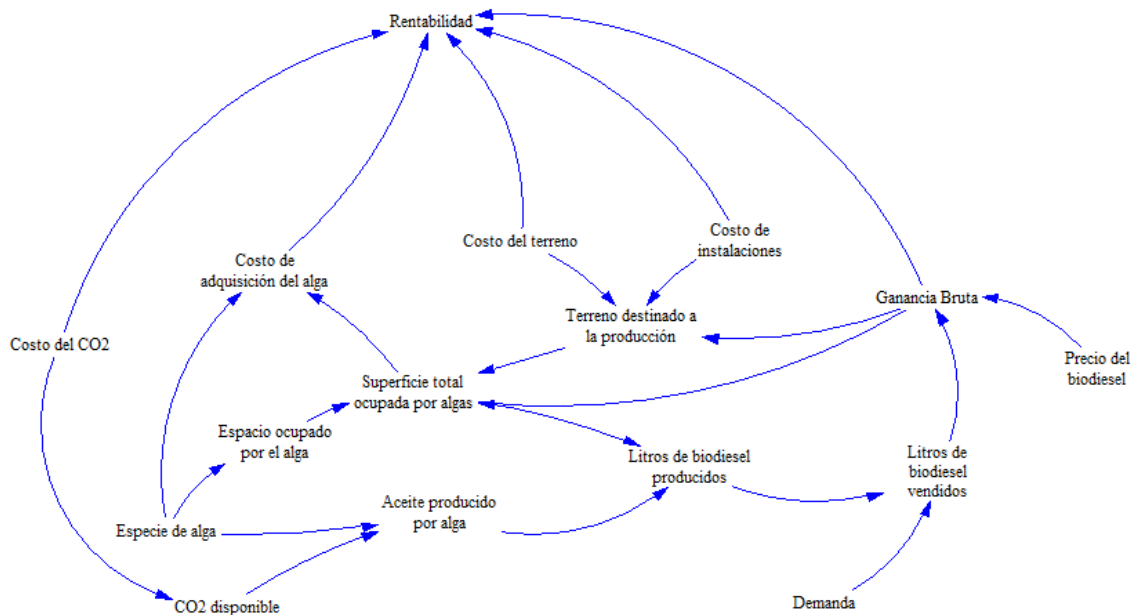


Figura 4.2: diagrama causal versión 02.





#### 4.1.4 Causal versión 04

El diagrama de influencias va adquiriendo una distribución cíclica de las variables en función del lazo realimentador principal formado por las variables relacionadas a la producción. Agregamos más variables que influyen en las actualmente existentes, como precios y relaciones porcentuales.

Se incorpora el aumento en instalaciones como variable que afecta a la disponibilidad actual, afectado por una variable de reinversión. Esta ya no se basa en la ganancia bruta para luego calcular la rentabilidad final, sino que en base a un resultado del periodo libre de costos se calcula la rentabilidad, y de esta surge el capital para nuevas inversiones.

Se agregan las distintas variantes de especie de alga y de método de extracción de aceite que servirán para el manipuleo por parte del usuario una vez pasado al modelo computacional. Momentáneamente se identificaran con nombres genéricos.

Se identifican aquellas variables que tienen una influencia recíproca, por lo que consideramos que algunas de ellas cumplirán el papel de niveles en el diagrama Forrester.

Se elimina la variable de relación de refinado, puesto que en la práctica el total del aceite obtenido se convierte en biodiesel, no existe un porcentaje apreciable de aceite que no sea transesterificado.

Se esquematiza y clasifica de forma más clara la red de costos.

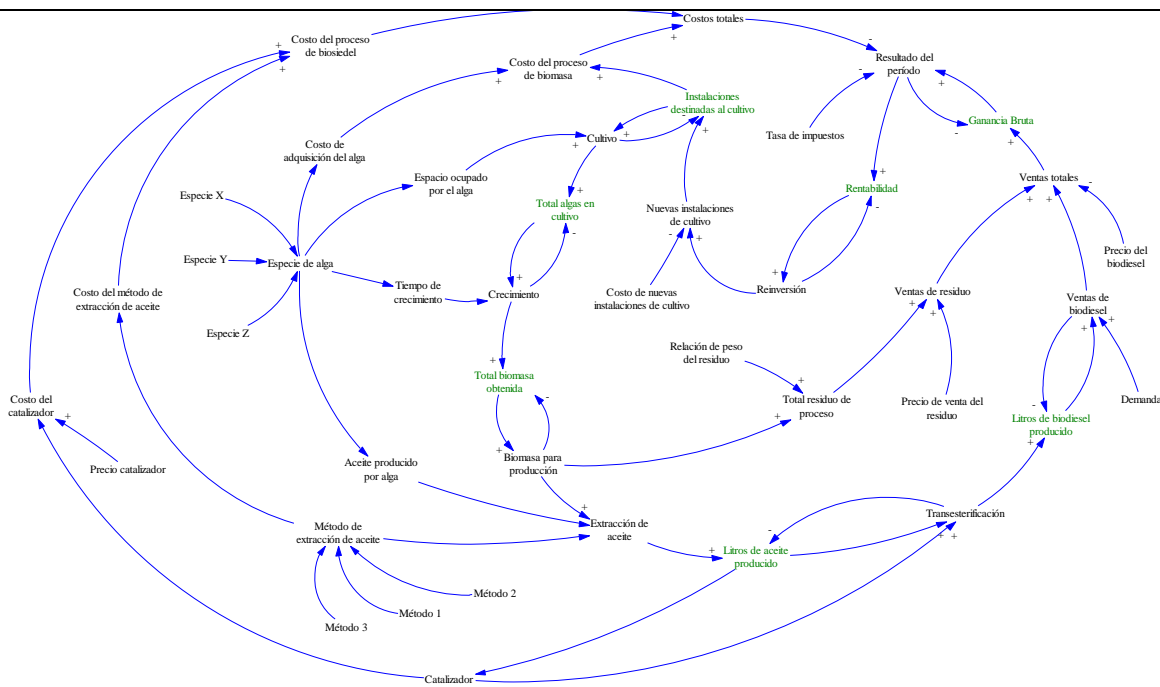


Figura 4.4: diagrama causal versión 04.



## 4.2 Diagrama Forrester

A partir del diagrama causal, donde se establecieron las variables que explican el comportamiento de la industria y las influencias que existen entre ellas, se da el paso al diagrama computacional de flujos y niveles, que permitirá la programación de las ecuaciones y la simulación. La Figura 4.6 muestra cuáles son las herramientas para insertar variables en el programa Vensim.

La incorporación de datos y ecuaciones en el modelo se realiza mediante la herramienta “Ecuaciones”, identificada en la Figura 4.6. Se selecciona esta herramienta y luego se clickea en la variable deseada. Aparecerá la ventana de operaciones que se observa en la Figura 4.7. El casillero inmediatamente debajo del nombre de la variable es en el cual se ingresará la ecuación correspondiente. Mediante esta ventana también pueden detallarse otras características de la variable, como unidades, valor inicial, valores máximo y mínimo que puede adoptar, entre otros. Posee además una opción para comprobar la sintaxis de la fórmula incorporada, lo que permite anticipar errores que podrían generar fallos en la simulación.

Las fórmulas que se ingresarán dependerán de cada variable. Las variables de flujo o auxiliares serán resultado de operaciones simples entre variables auxiliares que influyen sobre la variable en cuestión. Un ejemplo de esto es la fórmula (04) del Anexo A:

Biodiesel producido= Aceite producido\*Eficiencia del catalizador.

En el caso de las variables de nivel, al seleccionar la herramienta de ecuaciones y clickear en la variable se genera automáticamente la ecuación, que no es más que la diferencia entre los flujos que ingresan y los flujos que egresan. Sí deberá ser ingresado el valor inicial que toma la variable al comienzo de la simulación. Ejemplo de la fórmula (03) del Anexo A:

Biodiesel acumulado= INTEG (Biodiesel producido-Biodiesel vendido,8.22037)

En el caso de las variables auxiliares que representen constantes, será simplemente el dato del valor numérico de la constante.

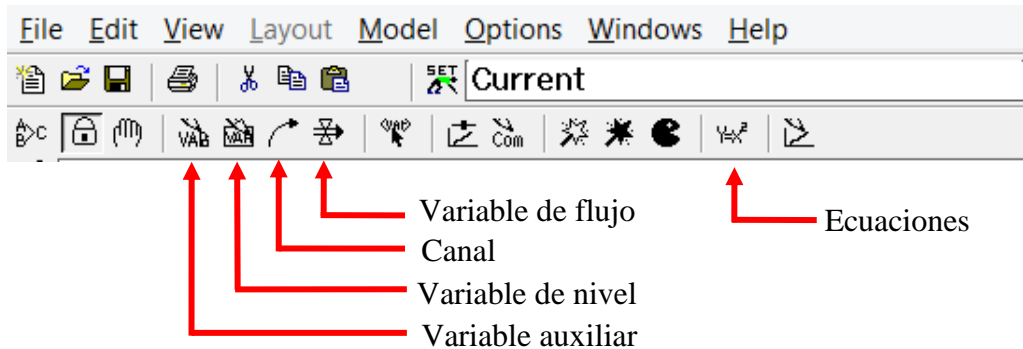


Figura 4.6: Botón de ecuaciones en la barra de tareas.

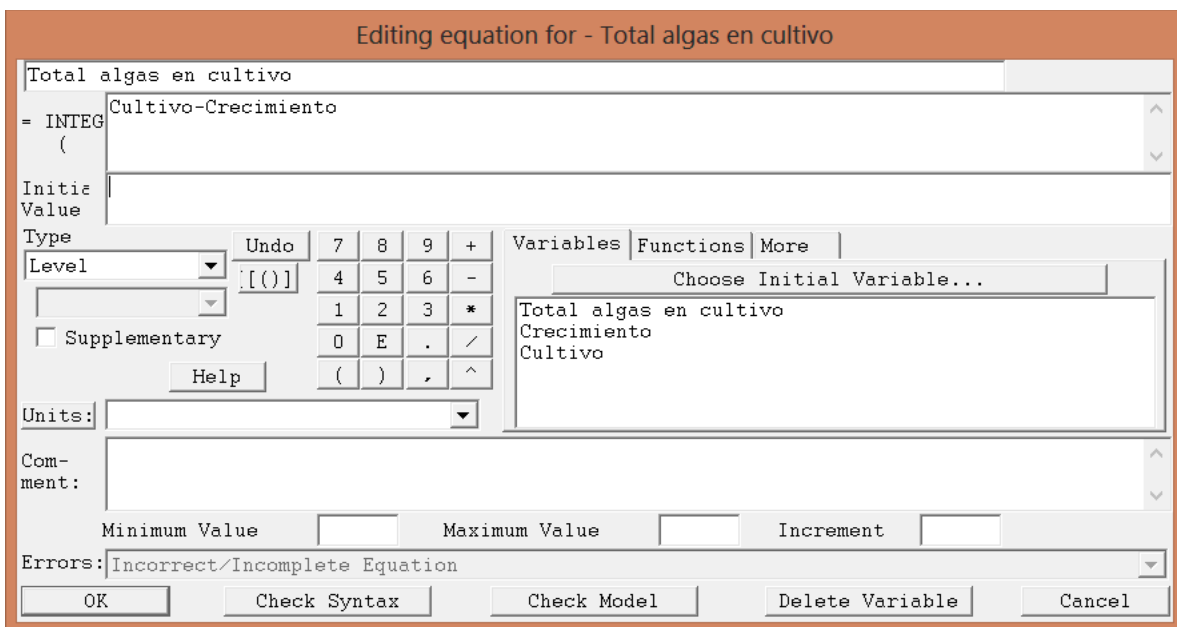


Figura 4.7: Ventana de edición de ecuaciones.

Es importante destacar que, mientras el diagrama de Forrester aun esté en proceso de construcción, la estructura del modelo puede sufrir grandes variaciones: al aumentar el nivel de complejidad muchas variables cambian de tipo, cambian su red de influencia o incluso se vuelven inadecuadas para el funcionamiento del modelo y son

removidas. Es por esto que incorporar muchas ecuaciones en las primeras versiones del modelo computacional no es recomendable. Teniendo esto en mente, solo incorporamos al modelo en los primeros pasos el mínimo número de ecuaciones que nos permitan evaluar si las variables creadas hasta el momento se comportan de la forma que las concebimos, en contraparte con el proceso del mundo real. En otras palabras, contribuyen a un proceso de validación parcial del modelo a medida que es actualizado. En vista de la gran variación que sufren las ecuaciones a lo largo del proceso de diseño del modelo, no detallaremos en este trabajo todas las ecuaciones utilizadas en cada versión. Todas las fórmulas y valores que incluye la versión final del simulador se encuentran detalladas en el Anexo A.

Para introducir los ajustes temporales del simulador, en la barra de menús, seleccionamos Model > Settings. Aparecerá la ventana de configuraciones que se muestra en la Figura 4.8. Consideraremos el tiempo medido en meses, por lo que cada paso de simulación significará lo ocurrido durante un mes de producción. El intervalo a analizar será de 5 años, por lo tanto observaremos 60 períodos de simulación. Por lo tanto en la variable “FINAL TIME” (Tiempo Final) ingresamos 60, y en la variable “Units for Time” (Unidades de tiempo) seleccionamos “Month” (Mes). De esta forma el simulador ya está configurado para evaluar lo que sucede en cada mes de ensayo.

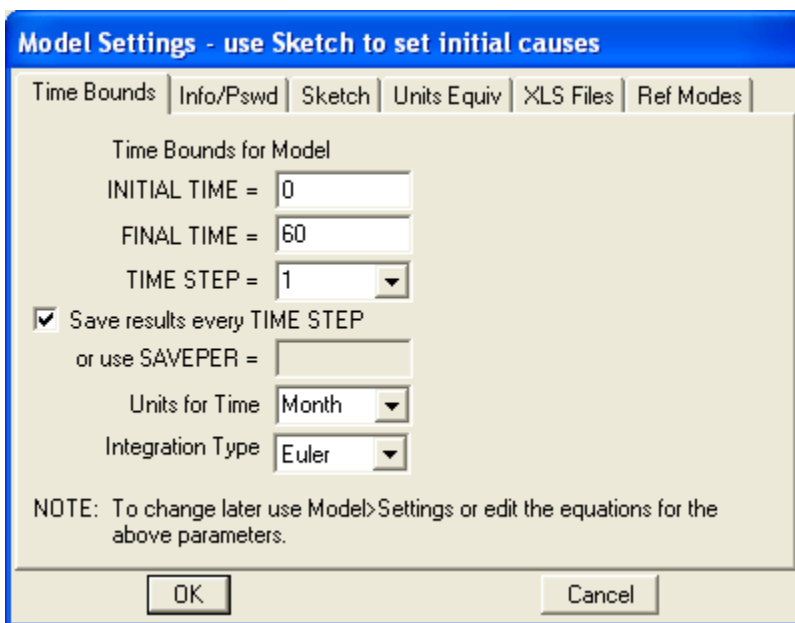


Figura 4.8: ventana de ajustes del modelo de simulación.

### 4.2.1 Forrester versión 0.00

La primera esquematización del modelo. Incluye las variables correspondientes al producto de cada etapa de la producción del biodiesel de algas, a saber, el cultivo de algas, la biomasa, el aceite y el biodiesel. Cada una de estas es identificada como variable de nivel. Los flujos que intervienen para el movimiento del material corresponden a los procesos necesarios para llevar a cabo cada transformación.

También se consideran niveles las ganancias brutas y netas de la comercialización del biodiesel, con flujos que aplican las sustracciones de capital para cubrir los distintos costos, que luego se incorporaran al modelo.

Las variables se encuentran agrupadas en subsistemas de acuerdo a la unidad en que se expresa el material en flujo, sean toneladas de algas, litros de aceite o dinero.

Esta versión no posee ninguna ecuación ni dato, ni las variables auxiliares que condicionan las de flujo.

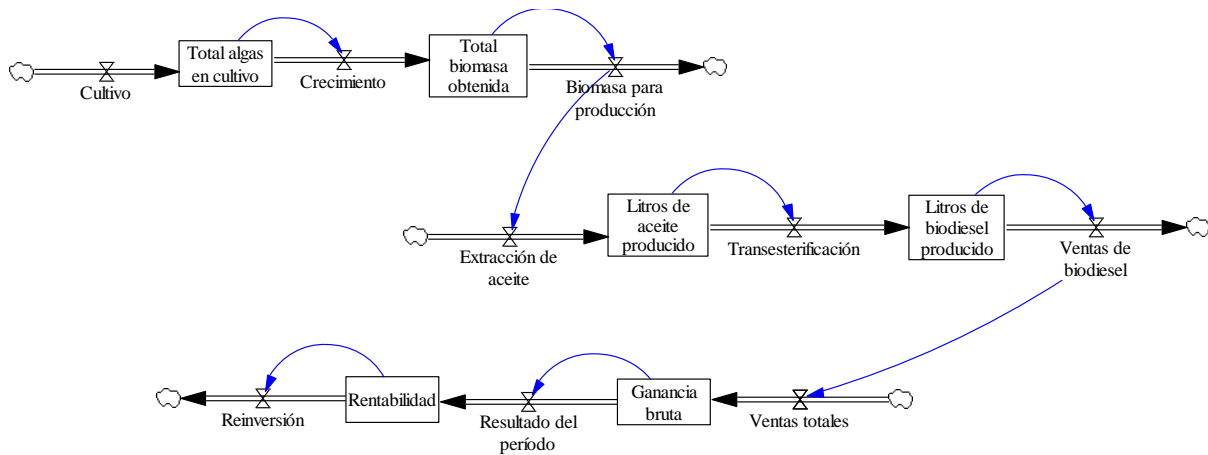


Figura 4.9: modelo de simulación versión 0.00.

### 4.2.2 Forrester versión 0.01

Esta versión completa la circulación abierta de la 0.00, incorporando las variables que logran la realimentación del modelo, a saber, las instalaciones de cultivo como variable de nivel, y el flujo de reinversión que incrementará esas instalaciones, formando un nuevo subsistema.

Aun no existe ninguna ecuación, dato o variable auxiliar en el modelo.

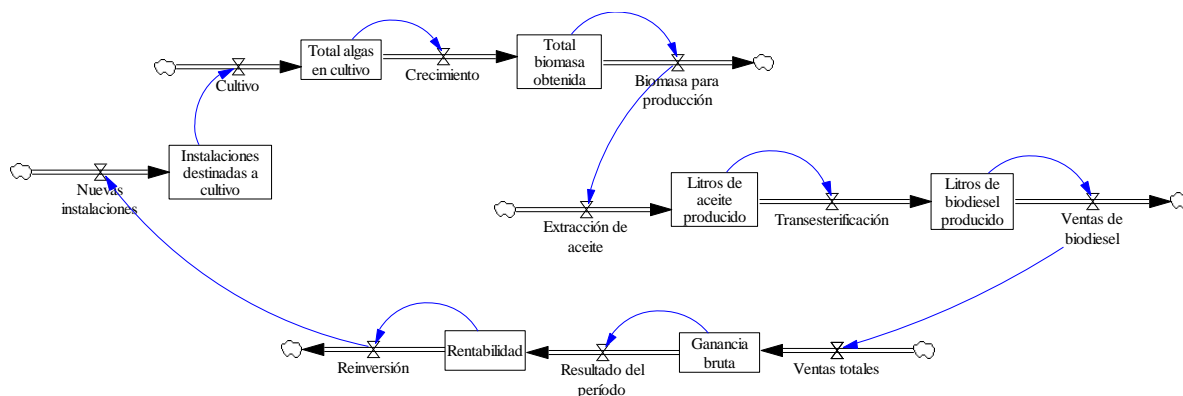


Figura 4.10: modelo de simulación versión 0.01.



---

### 4.2.3 Forrester versión 0.02

En esta versión se reacomodan los subsistemas para unificar flujos y simplificar cálculos.

Se incorporan al modelo de simulación las primeras variables auxiliares en la rama superior, donde se ubica el subsistema de producción. Estas incluyen:

- Las variables correspondientes a las características biológicas y químicas del alga, que influyen en el desarrollo del cultivo. Estas se ven condicionadas por la especie de alga utilizada. Se crea una variable para cada especie considerada, cuyo funcionamiento será similar a un interruptor, es decir, activar una inhabilita la influencia de las demás. Los nombres de las variables en esta versión son genéricos. Una vez realizada la investigación de las especies a incorporar al modelo serán renombradas.
- Los procesos de extracción de aceite. Una variable para cada método, que se comporta de manera similar a las de especies de algas.
- El consumo de biodiesel del mercado, con un componente fijo y uno ajustable al nivel deseado para el análisis de escenarios.
- En nivel de utilización de las instalaciones.
- El costo de nuevos invernaderos.

Esta versión comienza a incluir ecuaciones, principalmente las de entradas y salidas de las variables de nivel, y algunas de los cálculos internos de los flujos, solo aquellos que cuentan con influencia de las variables auxiliares que consideramos suficientes.

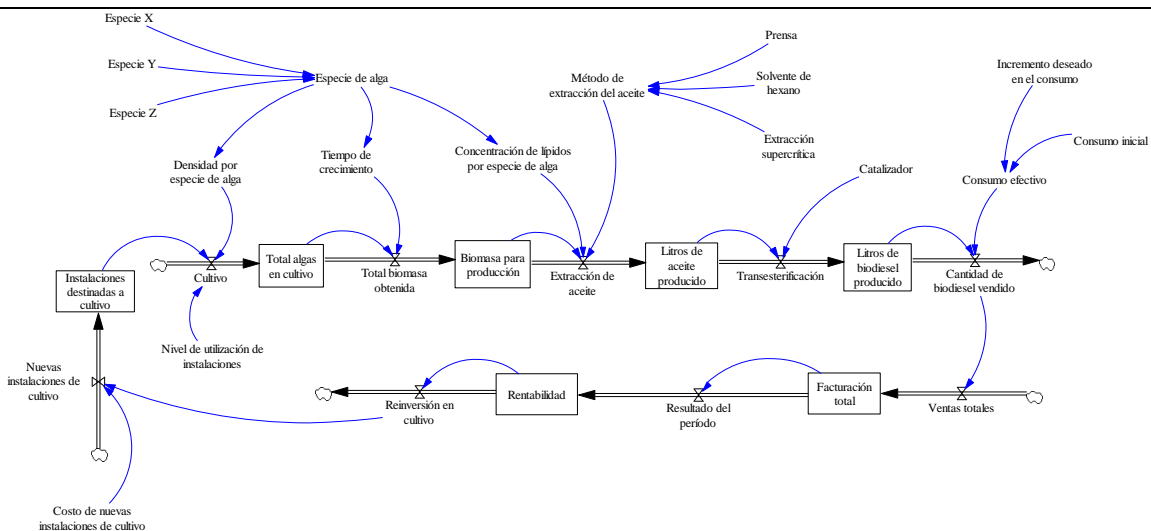


Figura 4.11: modelo de simulación versión 0.02.

### 4.2.4 Forrester versión 0.03

Se incorpora al modelo una serie de variables auxiliares que conforman la generación y comercialización de la materia orgánica sub producto de la extracción del aceite. Estas variables conforman una conexión secundaria entre el subsistema de producción y el subsistema de ventas.

También se incluyen variables de cargas impositivas que afectan al flujo de ganancias de la actividad comercial.

Las ecuaciones y datos ingresados se mantienen respecto de la versión anterior, a la espera de una mejor esquematización de la rama de materia orgánica.

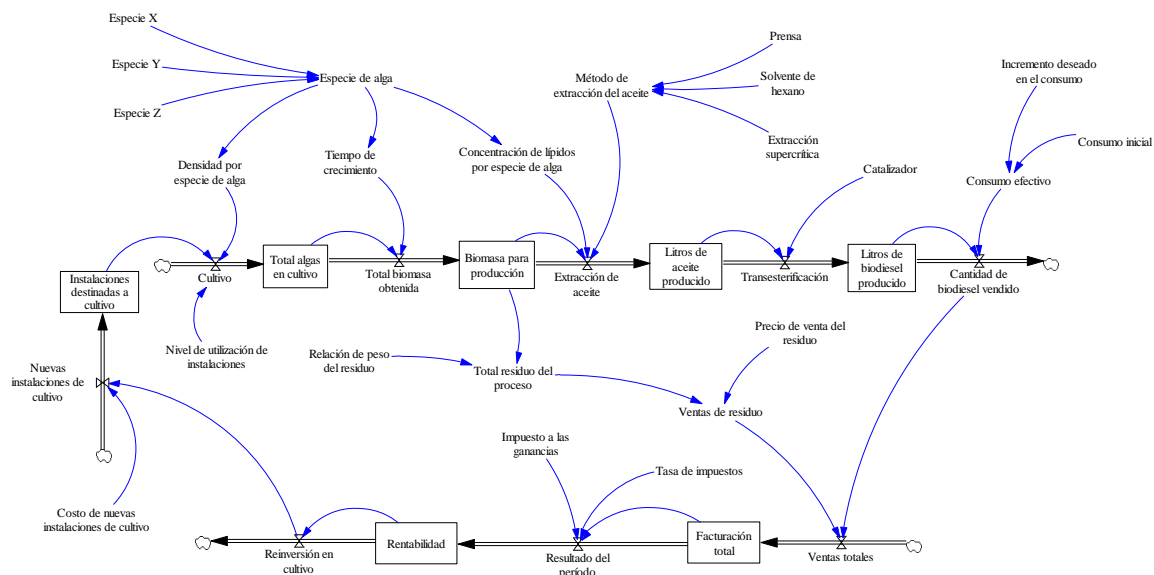


Figura 4.12: modelo de simulación versión 0.03.

#### 4.2.5 Forrester versión 0.1

La versión 0.1 contiene todos los subsistemas contemplados en nuestro análisis de la problemática. Se incorporaron las variables correspondientes a todos los costos involucrados en la actividad, clasificados según la etapa de proceso a la que correspondan. Una variable de agregación engloba todos estos costos y afecta directamente al resultado económico, cerrando otro circuito de realimentación con un tercer vínculo entre las ramas productivas y de ventas.

Otro cambio respecto a la versión anterior es la incorporación de la decisión de reinvertir capital en nuevas instalaciones. Esta es una variable que aplica una relación porcentual sobre las ganancias de cada período, determinada por la diferencia entre el biodiesel necesario en el mercado y el actualmente producido, calculada dentro de la “Variable informe”.

Se incorporan algunas ecuaciones simples en las variables auxiliares de costos, por ejemplo en las variables “Costos totales” y “Costo del catalizador”:

Costos totales = Costo del proceso de biomasa + costo del proceso de biodiesel

Costo del catalizador = Catalizador \* Precio del catalizador

Aun no se ingresan datos reales.

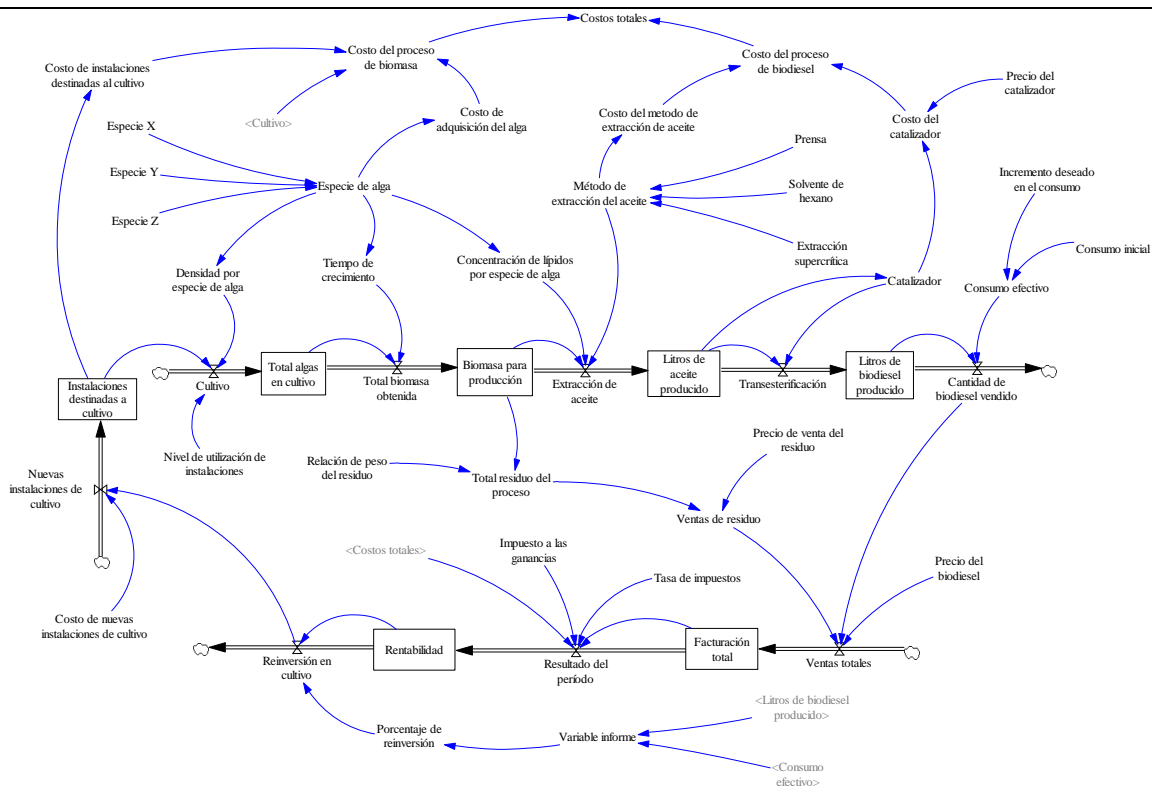


Figura 4.13: modelo de simulación versión 0.1.

### 4.2.6 Forrester versión 0.2

En esta versión se modifica el subsistema de costos, reconsiderando el costo total como una variable de nivel, y los costos globales de cada proceso como flujos. Una nueva variable de flujo llamada “Costos del período” se encarga de tomar el valor acumulado de costo y aplicarlo al resultado comercial de cada período. La intención detrás de esta modificación es tener una mejor visualización de cada costo.

Se corrige la influencia sobre la materia orgánica obtenida, que en la versión anterior figuraba como condicionada por una variable de estado en lugar de la variable que representa el proceso de extracción de aceite.

Se modifican las ecuaciones afectadas por los cambios mencionados.

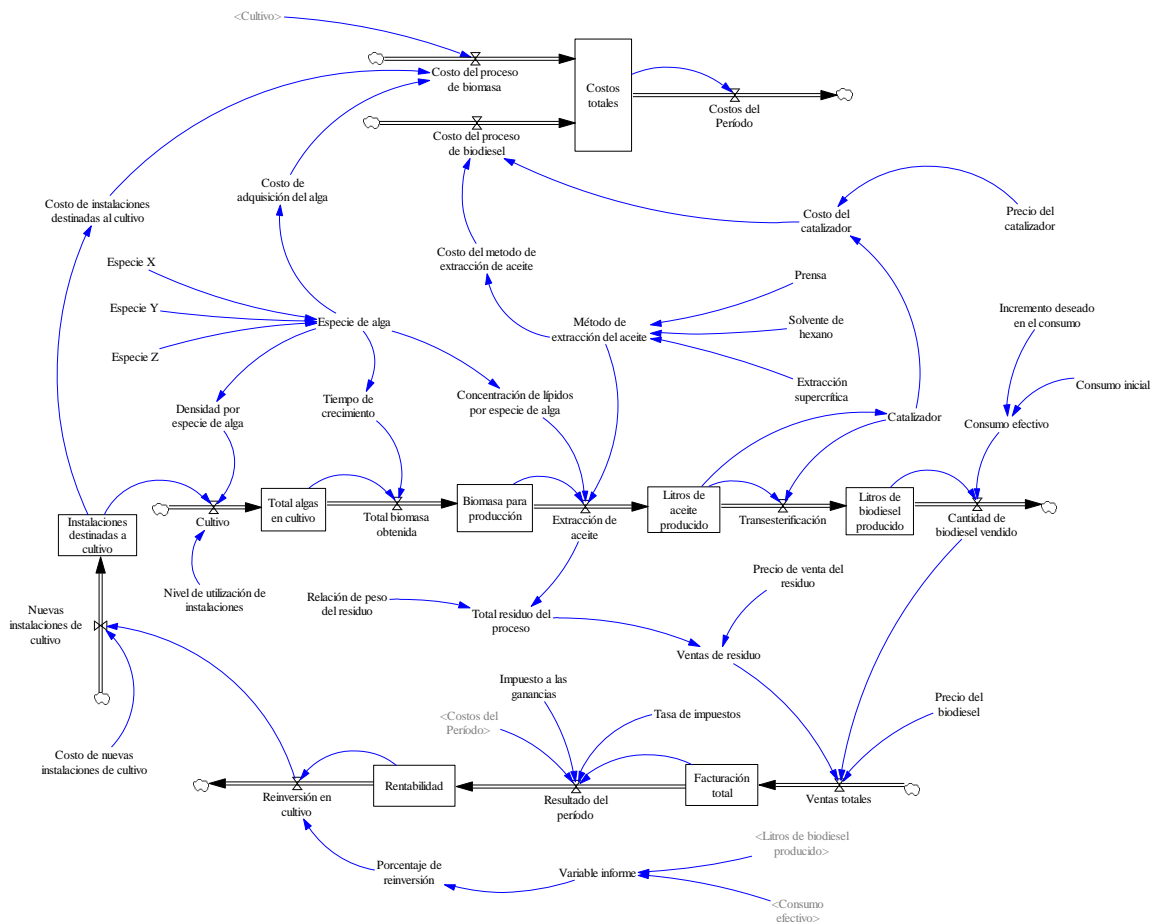


Figura 4.14: modelo de simulación versión 0.2.

### **4.2.7 Forrester versión 0.3**

Se trabaja sobre la sección del modelo que realimenta la simulación. A partir de la variable de estado “Rentabilidad”, que acumula la ganancia libre de costos de cada período, se diferencian dos flujos. El primero es el responsable de la reinversión, y está influenciado por las mismas variables de agregación de versiones anteriores. El segundo flujo recolecta las utilidades libres de inversión y las acumula en una nueva variable de estado. Este cambio permite apreciar el capital monetario que queda en manos de los participantes de la industria a nivel global.

Un pequeño cambio en el subsistema de producción de biodiesel es la incorporación de la variable “Eficiencia del catalizador”, que informa al modelo cuánto del aceite llega a transformarse en combustible. La variable “Catalizador” se utiliza entonces para calcular la cantidad de metilato de sodio que es necesaria en cada período.

Se modifican las ecuaciones e influencias de los subsistemas en los que se aplicaron los cambios.

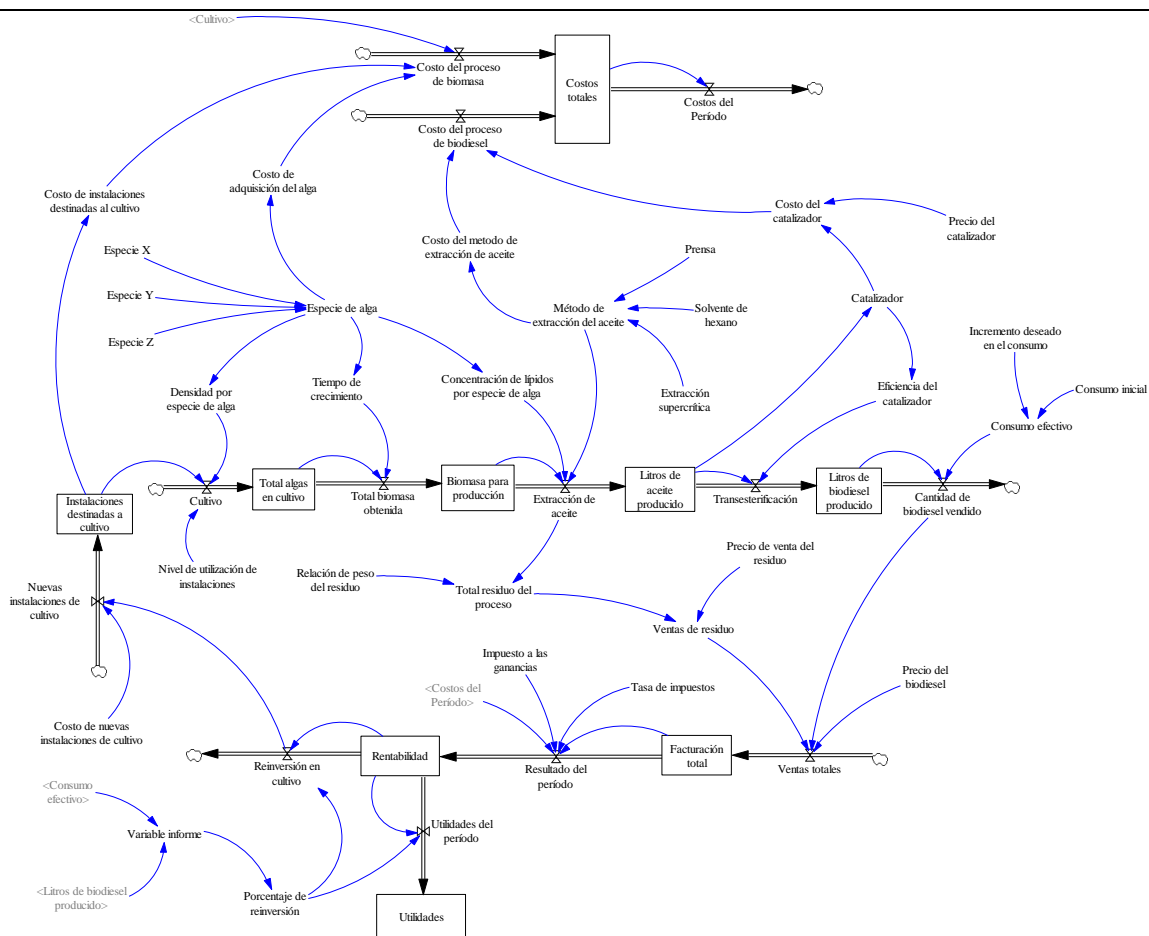


Figura 4.15: modelo de simulación versión 0.3.



#### **4.2.8 Forrester versión 0.4**

La versión 0.4 representa un cambio importante en la concepción del modelo. En vías de lograr un funcionamiento más eficiente del simulador, se reconfiguraron los subsistemas.

La cadena formada por variables de estado y variables de flujo del subsistema productivo fue cambiada por una configuración más sencilla: variables de agregación que representan el producto de cada etapa. La única variable de estado que se conserva aquí es la de cantidad de biodiesel producido, afectadas por los mismos flujos de la versión anterior.

En cuanto al subsistema de ventas y utilidades, descubrimos que los modelos anteriores basaban su funcionamiento en una mala interpretación del concepto de rentabilidad. Por este motivo se eliminó tal variable, conservando como único nivel las utilidades. Se reconfiguraron los flujos para que esta variable “Utilidades” calcule la diferencia entre las entradas producto de las ventas y la salida por la cobertura de los costos.

Los flujos y niveles incorporados en el subsistema de costos son eliminados y el modelo vuelve a adquirir la estructura representada en la versión 0.1. Luego de un análisis de la teoría de Dinámica de Sistemas reconocimos que esta modificación no dificultaría la apreciación de cada costo en particular, como creímos que sucedería al plantear el cambio en la versión 0.2. “Costos totales” pasa a llamarse “Costos productivos”.

Bajo este esquema la reinversión queda desligada del subsistema de ventas y utilidades, pero se mantiene el bucle de realimentación puesto que aún se ve afectado por el nivel de producción y de consumo. Sin embargo nuestro interés en versiones siguientes sería optimizar esta sección del modelo para ajustarla a los procesos reales.

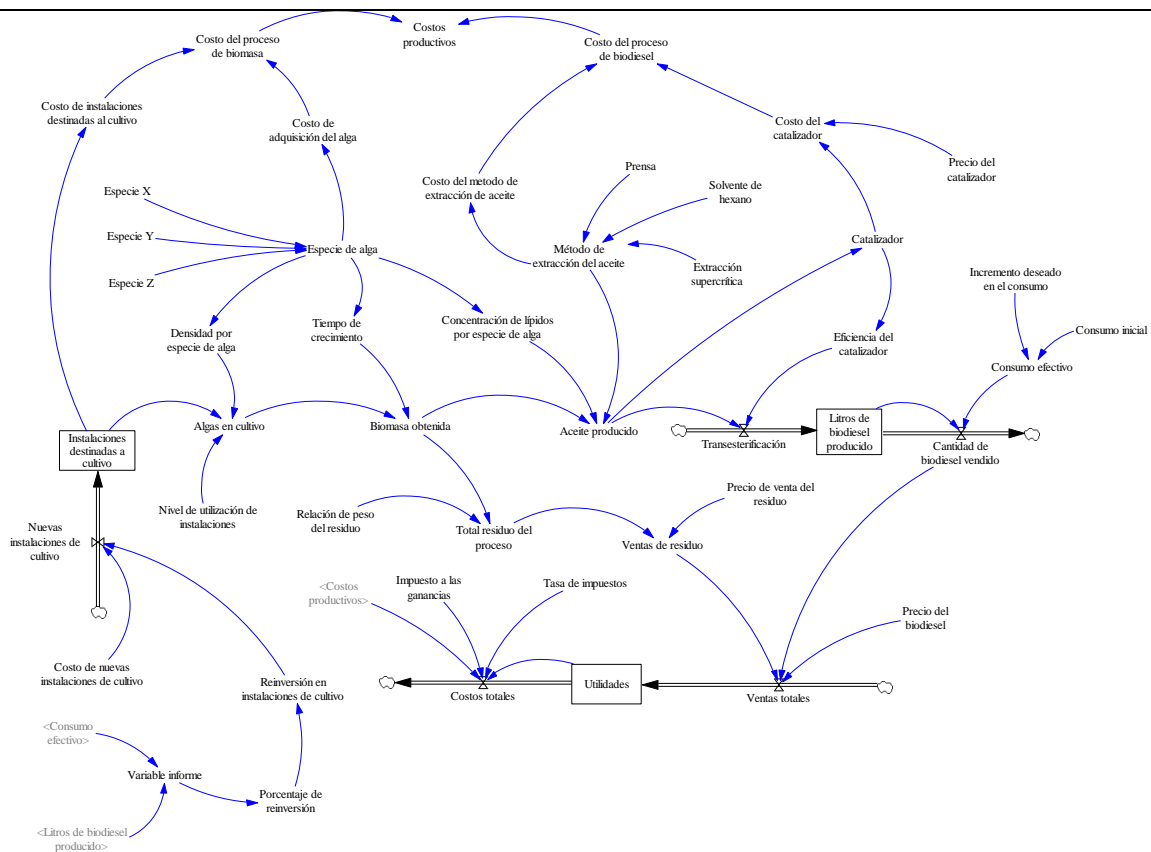


Figura 4.16: modelo de simulación versión 0.4.

### 4.2.9 Forrester versión 0.5

Se replantea el subsistema de ventas.

La variable de nivel “Utilidades” es convertida en una de agregación, por lo que ahora representa las ganancias libres de costo de cada período. Esta afecta directamente a la reinversión en invernaderos.

Una nueva variable de nivel llamada “Ganancia neta” acumula las ganancias de cada periodo, representadas por un flujo. Este último se vale de la influencia de las dos variables mencionadas en el párrafo anterior para realizar el cálculo de utilidad neta.

Se cambia la expresión “residuo del proceso” por “materia orgánica” en algunas variables, y se elimina la expresión “Litros de” en otras variables. Se modifican todas las ecuaciones pertinentes.

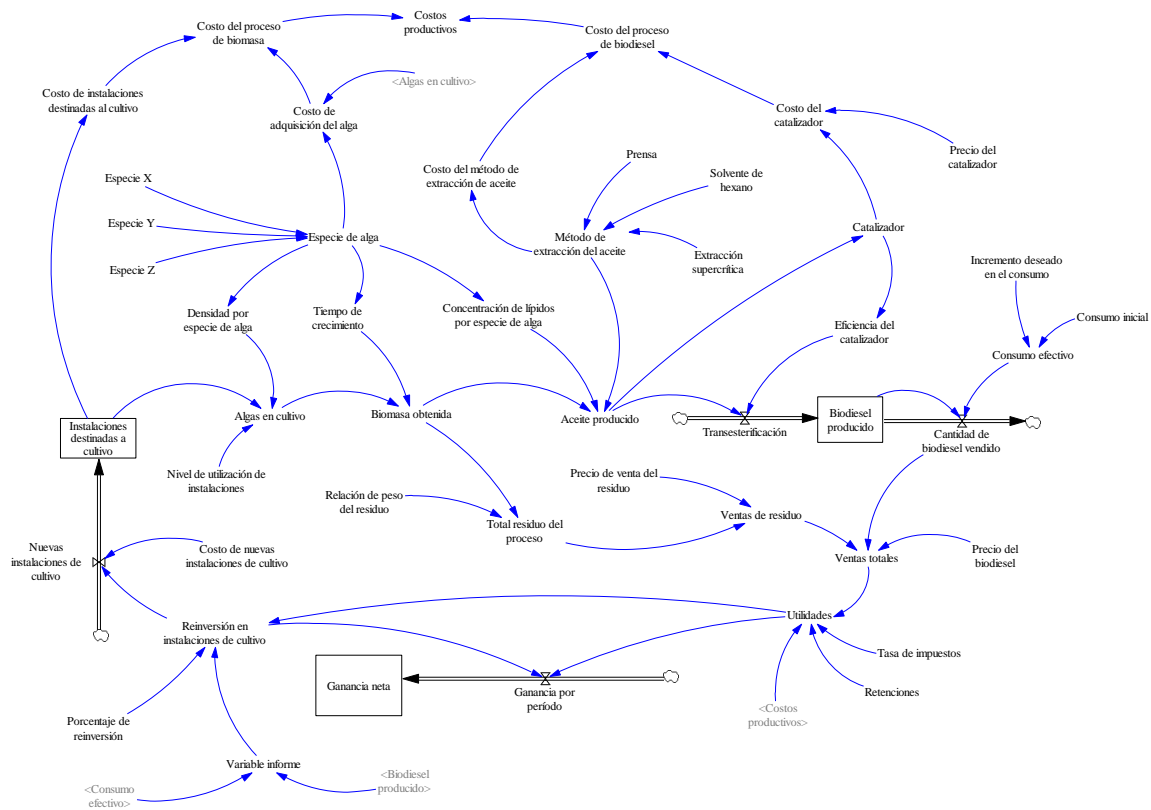


Figura 4.17: modelo de simulación versión 0.5.

### 4.2.10 Forrester versión 0.6

Esta versión enfoca la realimentación del modelo de otra forma.

La reinversión ahora es considerada como un flujo que modifica el nivel de “Ganancia neta”, y se ve afectada por las mismas variables de agregación de versiones anteriores, a las cuales se les suman los costos de construcción de invernaderos y una nueva variable llamada “Rendimiento de las instalaciones”, que informa la relación entre la cantidad de biodiesel obtenido y las instalaciones disponibles.

La ecuación de reinversión ahora calcula con exactitud la cantidad de superficie necesaria para suplir el consumo sin abastecer, y cuánto cuesta tal instalación. En base a esto sustrae de la ganancia neta lo necesario para realimentar la simulación.

Se elimina la influencia de la cantidad de catalizador sobre su eficiencia ya que no depende una de la otra, al utilizarse toda el metilato de sodio necesario para transesterificar todo el aceite obtenido.

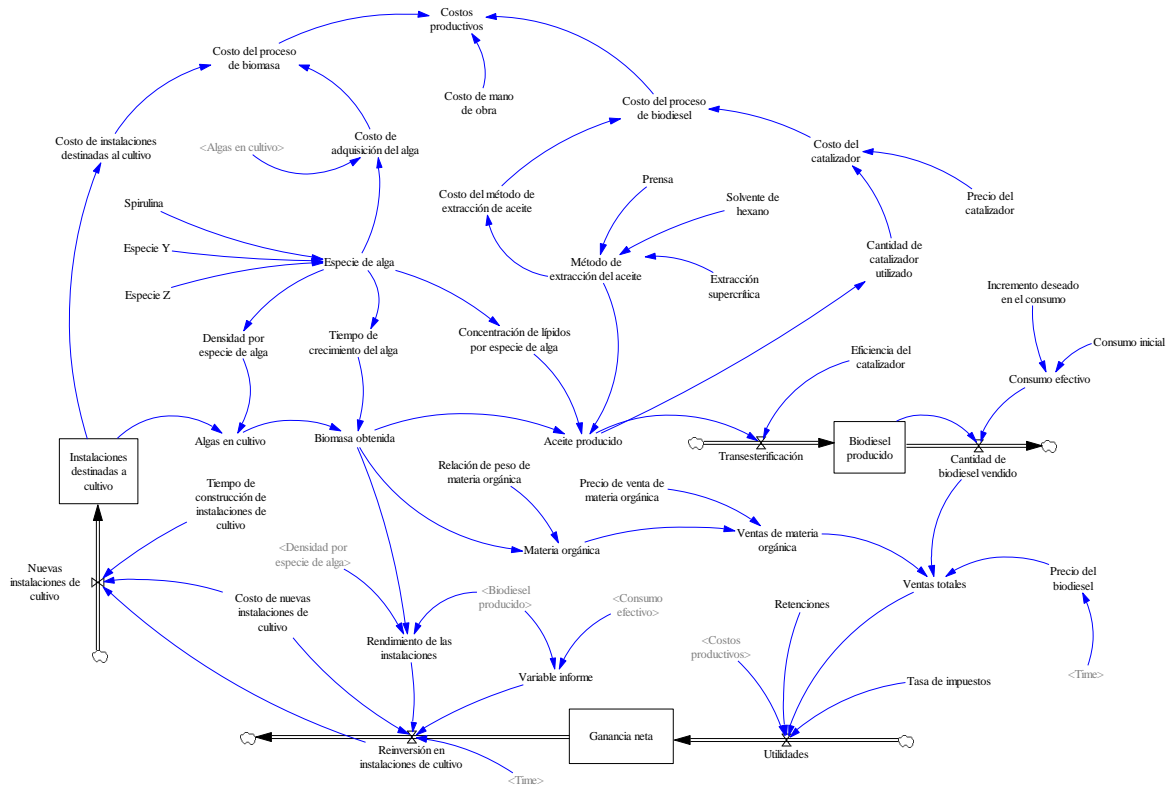


Figura 4.18: modelo de simulación versión 0.6

### 4.2.11 Forrester versión 0.7

Cambios menores.

Se incorpora la variable “Bonos de carbono” que incrementa las ganancias del período. Esta depende de la cantidad de biomasa obtenida, ya que es una expresión del dióxido de carbono que se absorbió en lugar de ser liberado al medio ambiente.

Se coloca una nueva influencia en la variable “Relación de materia orgánica”, que calcula el porcentaje de proteínas y vitaminas que se obtienen del alga luego de extraer el aceite. A partir de esta versión esta variable depende de la especie elegida para la simulación.

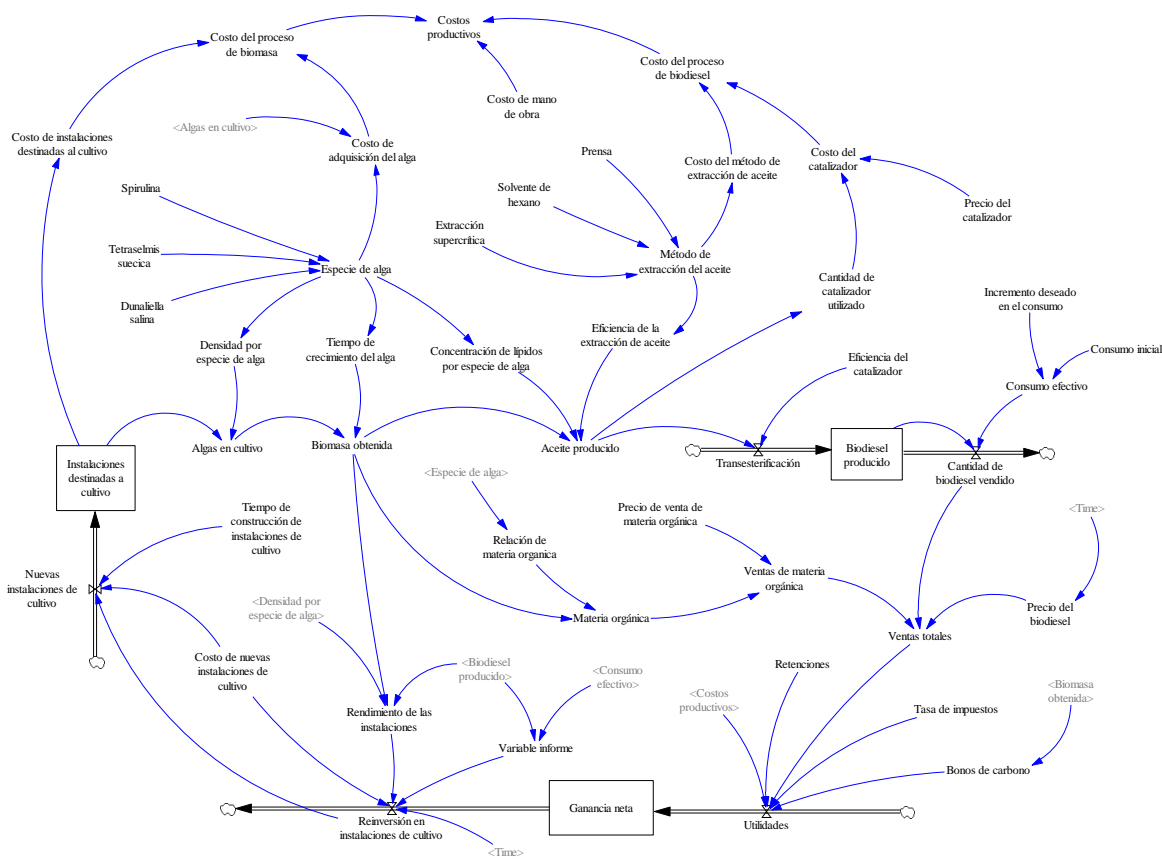


Figura 4.19: modelo de simulación versión 0.7.

### 4.2.12 Forrester versión 0.8

En la versión 0.8 se descompone las ventas de biodiesel en dos tipos, “Exportaciones de biodiesel” y “Venta interna de biodiesel”, cada una influenciada por su propio precio de venta, y por una variable común “Nivel de exportación” que indica el porcentaje de la producción que se vende al exterior.

En cuanto a la estructura de costos, basándonos en nuestra investigación de la industria eliminamos el “Costo de adquisición del alga”, puesto que una vez establecido un cultivo de algas no es necesario la adquisición de más cantidad, sino que la misma población al reproducirse mantiene el volumen.

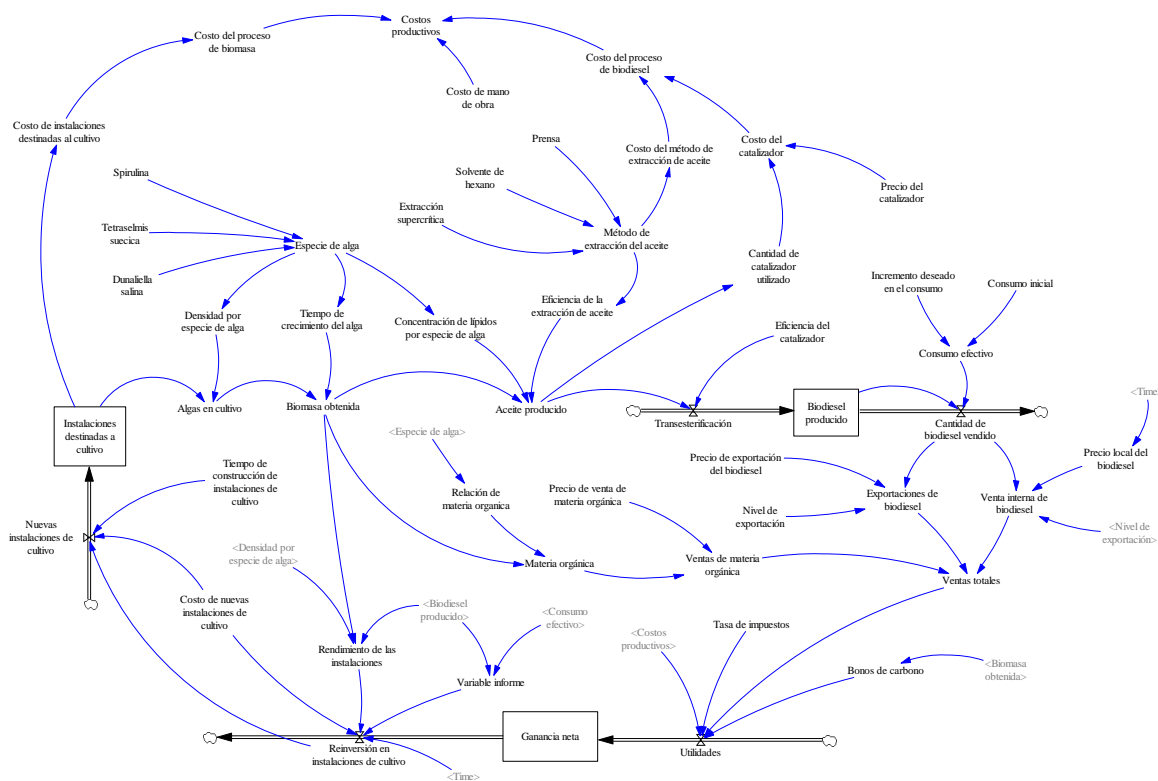


Figura 4.20: modelo de simulación versión 0.8.



#### 4.2.14 Forrester versión 1.0

Esta versión es un hito en nuestro modelo, ya que contiene todas las variables y se programaron todas las ecuaciones y datos necesarios para realizar una simulación.

Los únicos datos que no se pudieron obtener son los relativos a los costos puntuales de cada proceso. Sin embargo, dado que conocemos el costo total por tonelada de aceite, se ingresa este dato en la ecuación de “Costos productivos”.

Para evitar problemas de duplicación de valores anulamos la influencia de cada costo en la variable “Costos productivos”, ingresando una multiplicación por cero en cada ecuación. La única excepción es la elección del método de extracción de aceite, cuya influencia porcentual si es conocida y por ende se considera en la ecuación programada en “Costos productivos”. Si futuras investigaciones sobre el tema permiten un conocimiento más profundo de la estructura de costos de la actividad, las ecuaciones de las variables anuladas se pueden reconfigurar fácil y rápidamente para incorporarlas en el cálculo global.

Se agrega una variable llamada “Necesidad de instalaciones”, que actúa como paso intermedio entre “Reinversión en instalaciones de cultivo” y la “Variable informe”, eliminándose la necesidad de calcular el rendimiento de las instalaciones.

Dos variables adicionales que se agregan en esta versión son “límite de instalaciones a construir”, un parámetro de manejo libre para establecer un máximo de invernaderos que se construyen por período, y “Estado de inversión”, que detecta si en la simulación hay una construcción en curso. También influyen sobre “Reinversión en instalaciones de cultivo”.

Mediante estas decisiones se simplifican los cálculos de la ecuación del flujo de reinversión, haciendo más eficiente el simulador.

Las primeras corridas de simulación arrojan errores menores de integración, por lo que en las siguientes versiones se trabaja sobre el modelo para simplificar ecuaciones innecesariamente complejas y dar con la causa del error.



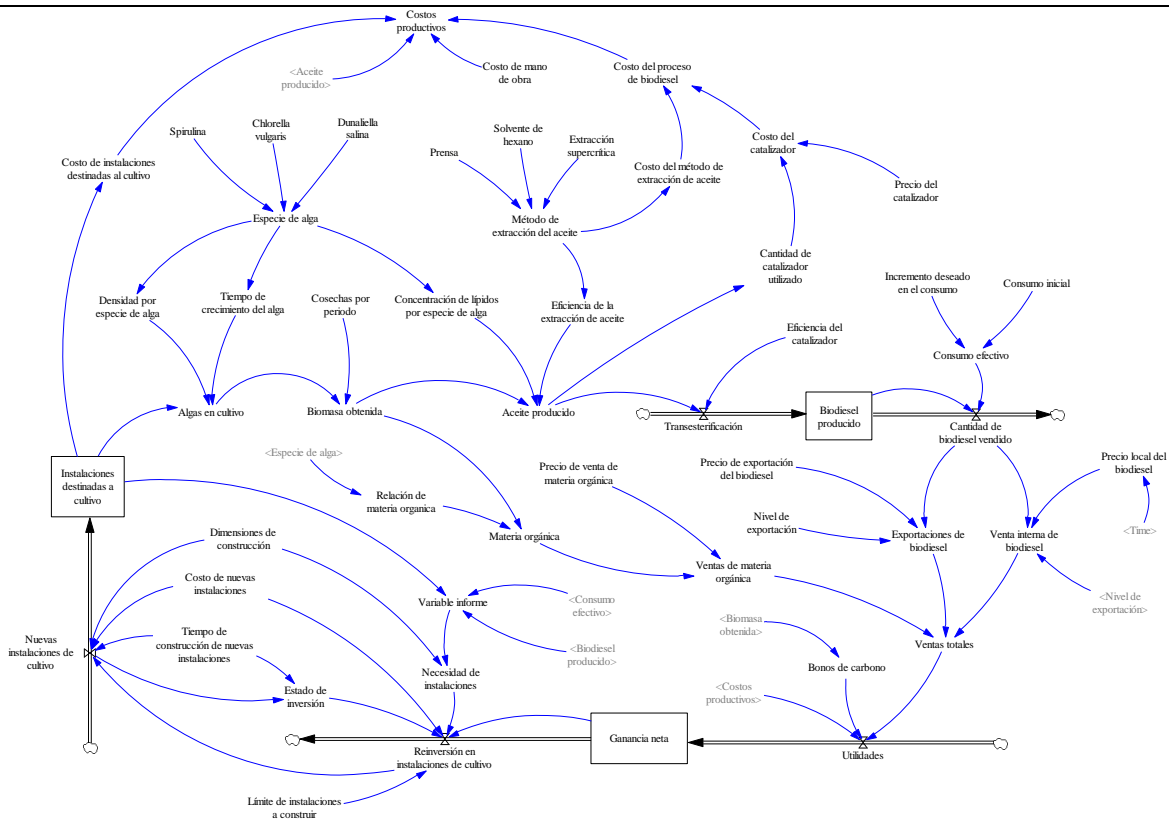


Figura 4.22: modelo de simulación versión 1.0.

### 4.2.15 Forrester versión 1.1

Se reacomodan las variables que afectan al flujo de reinversión, se modifican las relaciones y se ajustan las ecuaciones. El objetivo con este cambio es simplificar aún más el cálculo que realiza “Reinversión en instalaciones de cultivo”. Se subsanan algunos errores pero el software arroja advertencias de mal funcionamiento en las variables modificadas.

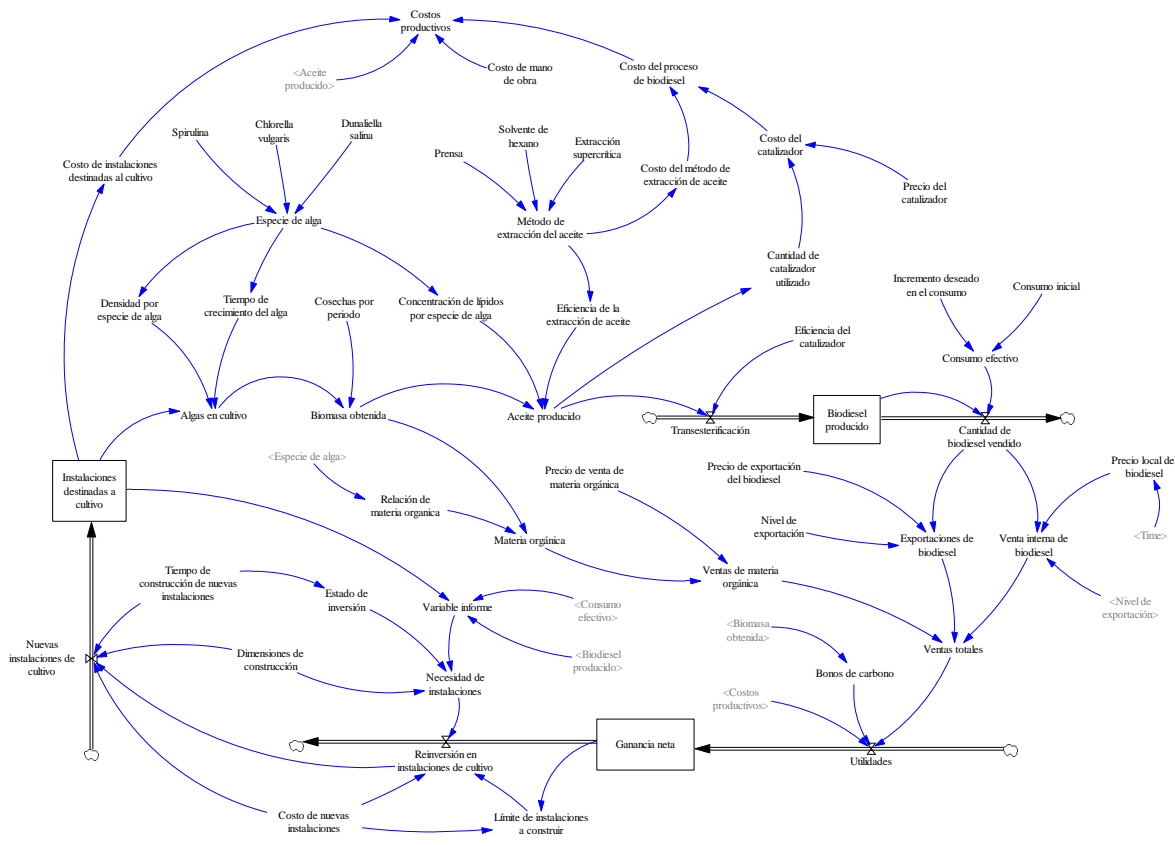


Figura 4.23: modelo de simulación versión 1.1.

### 4.2.16 Forrester versión 1.1.a

Se realiza un análisis integral del modelo para identificar aquellas variables que presenta errores en sus cálculos. Para eso se toma una porción de la versión 1.1 y se la ajusta para que funcione como un modelo independiente. Al ir descartando variables se consideran otras porciones del modelo.

La versión 1.1.a toma las primeras variables del ciclo del modelo. Las pruebas indican que este sub modelo funciona perfectamente.

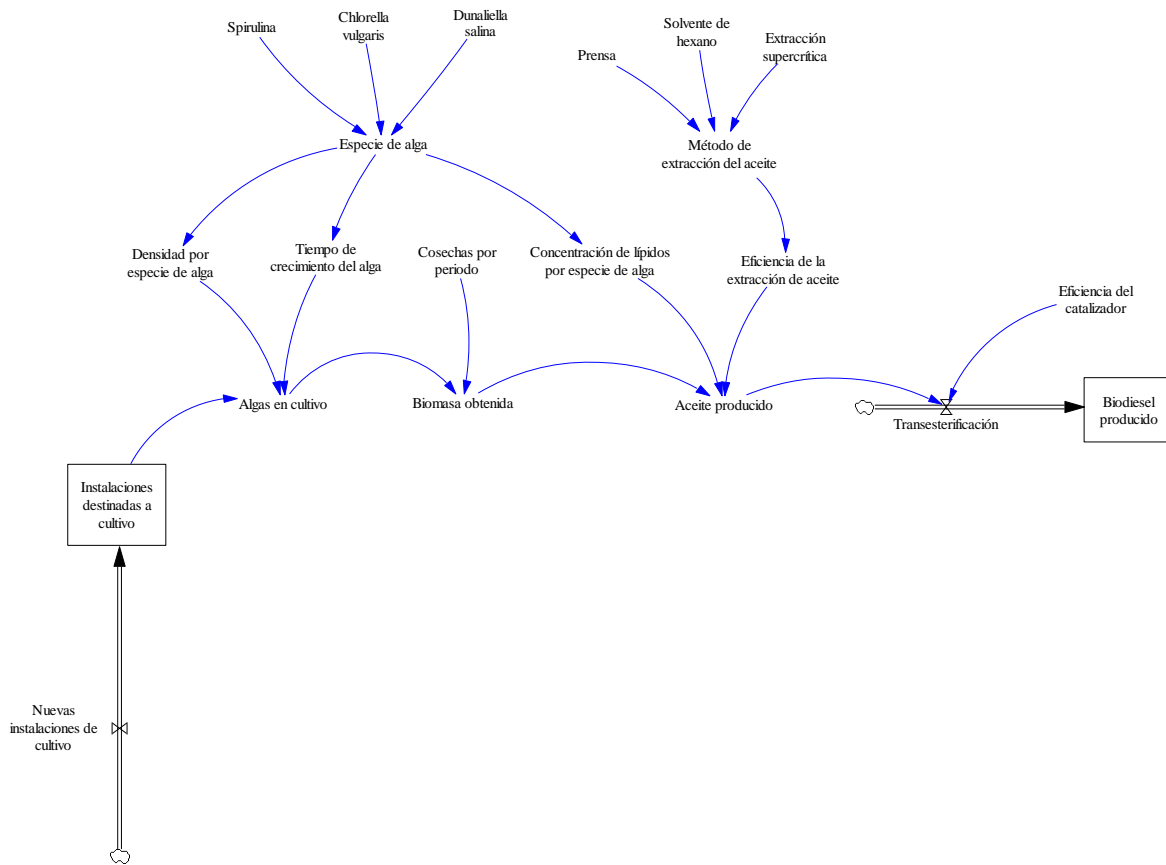


Figura 4.24: modelo de simulación versión 1.1.a.



### 4.2.18 Forrester versión 1.1.c

Se toma de la versión 1.1 casi todas las variables, extrayendo únicamente todas aquellas relacionadas con la realimentación del modelo.

La prueba fue exitosa, no hubo errores. Esto lleva a la conclusión que el error de cálculo se encuentra en el proceso de realimentación, en las variables de inversión en nuevos invernaderos.

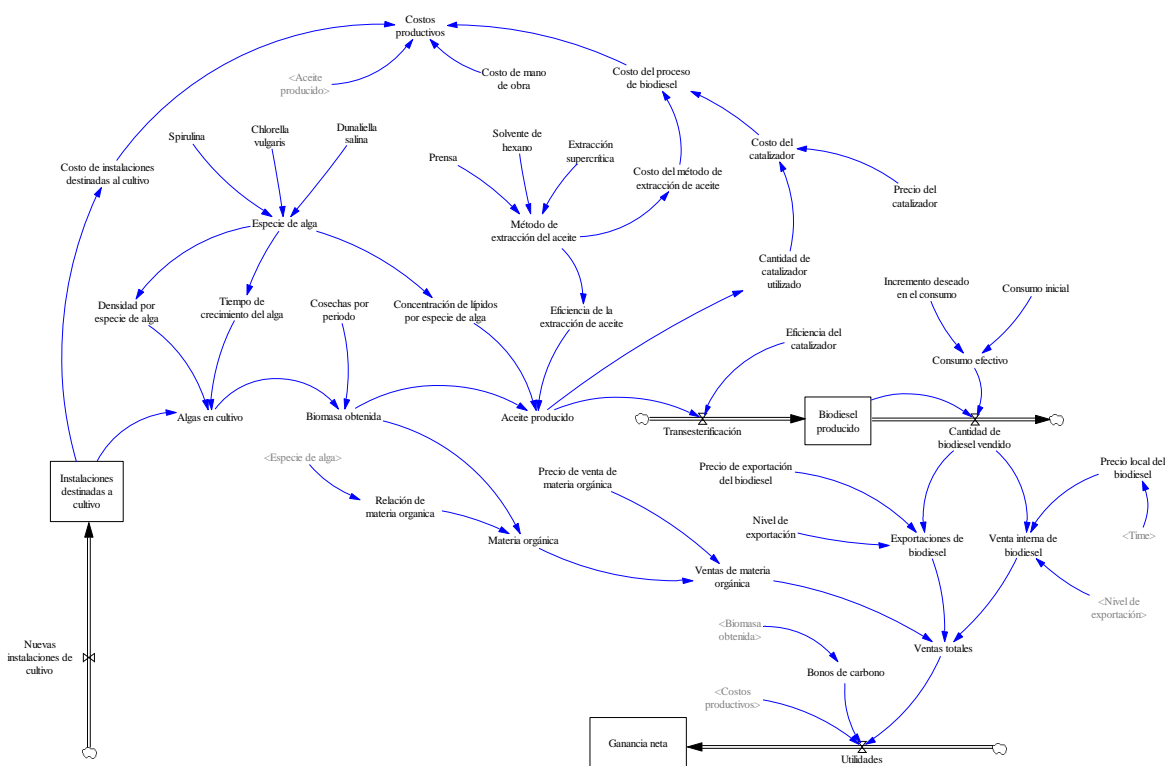


Figura 4.26: modelo de simulación versión 1.1.c.

### 4.2.19 Forrester versión 1.1.d

Aquí se analiza el flujo de reinversión independiente del resto del modelo. Nuevamente se reconfiguran las ecuaciones en los extremos del sub modelo para que funcione de forma autónoma.

Se descubre una problemática con la forma actual de cálculo de nuevos invernaderos. La complejidad de la ecuación hace que algunas variables excedan los límites impuestos por otras variables influyentes, por lo que el modelo se comporta de una forma no esperada.

Se procede a idear mejoras para subsanar los errores y advertencias.

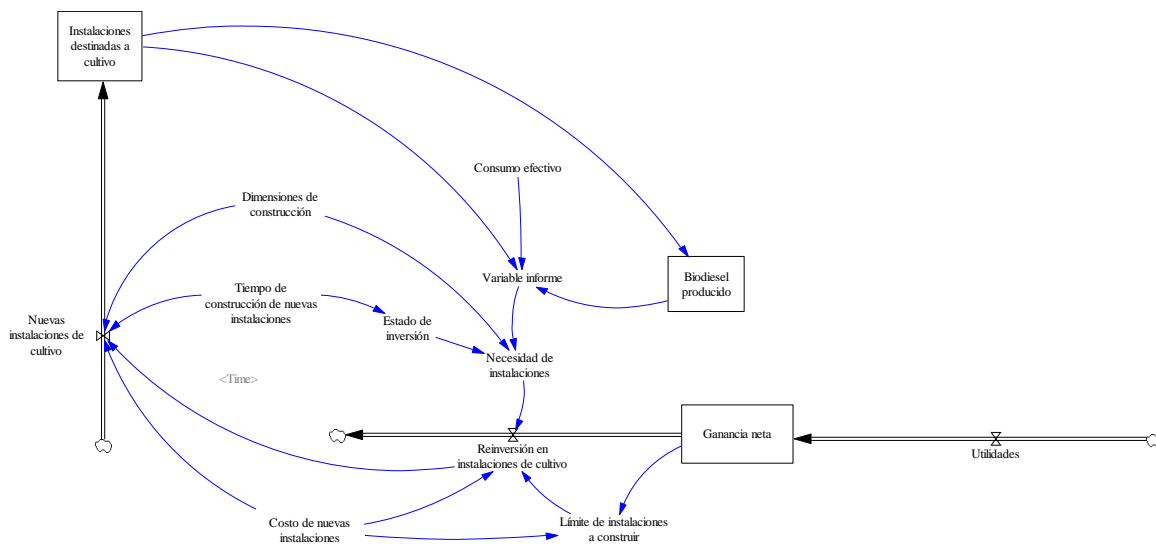


Figura 4.27: modelo de simulación versión 1.1.d.



### 4.2.21 Forrester versión 3.0

Se añade al modelo una pantalla de resultados para visualizar de forma más clara y sencilla los gráficos de comportamiento de las variables, con botones para modificar los parámetros de simulación en tiempo real, y un botón para alternar entre esta pantalla y la del modelo.

Se reincorpora al modelo la variable “Retenciones”, eliminada en la versión 0.9, puesto que se encontraba incluida en la ecuación de “Precio de exportación de biodiesel”, pero vimos pertinente considerarla una variable aparte. Influye sobre “Exportaciones de biodiesel”.

En el cálculo de la reinversión se añade una variable llamada “Instalaciones a construir”, un parámetro ajustable que indica cuantos invernaderos se construyen por cada proyecto de inversión. Influye directamente sobre “Reinversión en instalaciones de cultivo”.

Se agrega una variable auxiliar llamada “Switch materia orgánica”, cuya función es, al realizar una corrida de simulador, dar la opción de no considerar las ventas de materia orgánica, y analizar únicamente la comercialización del biodiesel. Esta nueva variable influye directamente sobre “Ventas de materia orgánica”.

Se modifica la ecuación “Precio local del biodiesel” para no depender más del periodo de simulación, y se elimina la influencia de ese parámetro sobre la variable.



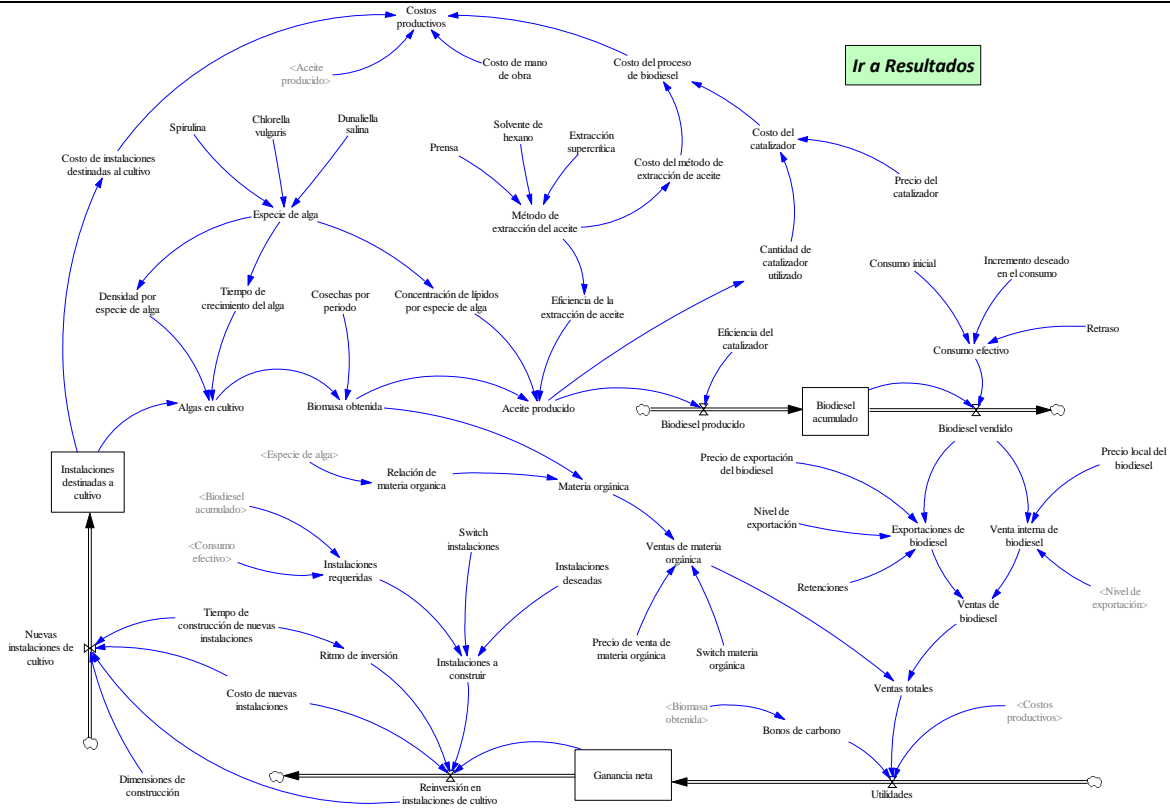


Figura 4.29: modelo de simulación versión 3.0.

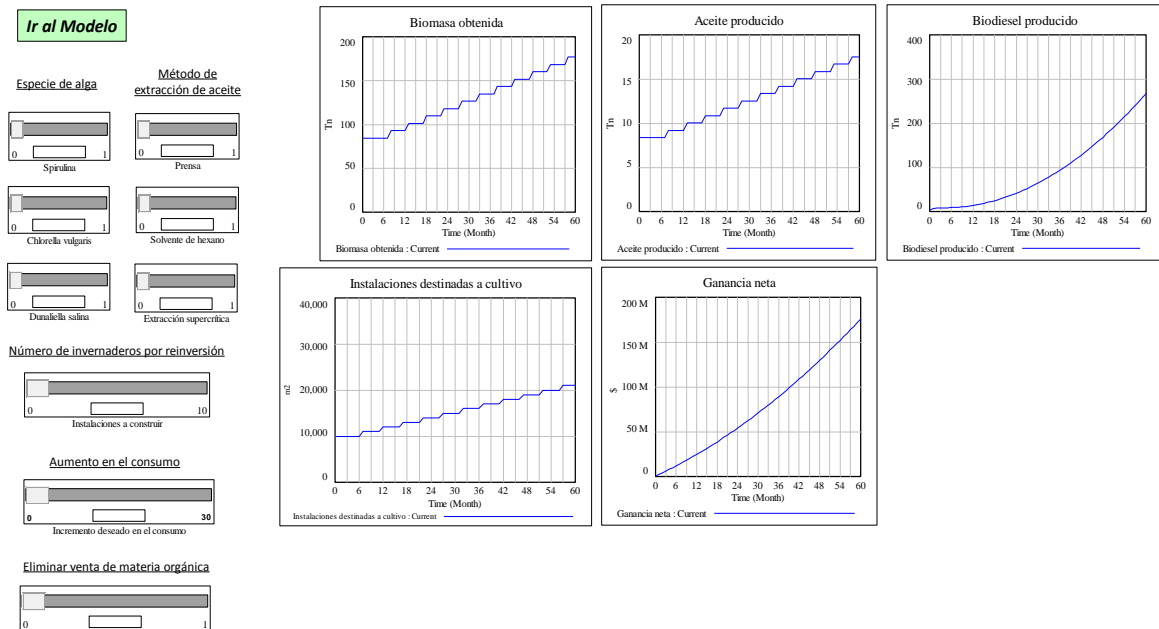


Figura 4.30: pantalla de resultados de la versión 3.0.

### 4.2.22 Forrester versión 4.0

La versión 4.0 es la versión final del modelo, que permite evaluar el caso base y todos los escenarios deseados para este análisis.

Se vuelve a vincular la realimentación del modelo directamente con el subsistema de producción. La variable “Instalaciones a construir” deja de ser una variable controlable por el usuario y recibe la información de tres nuevas variables:

- “Instalaciones requeridas”, que similar al funcionamiento de “Variable informe” de otras versiones, calcula la diferencia entre el biodiesel consumido y el producido, y en base a ese número devuelve una cantidad de invernaderos determinada por una función descrita por la Figura 4.31.

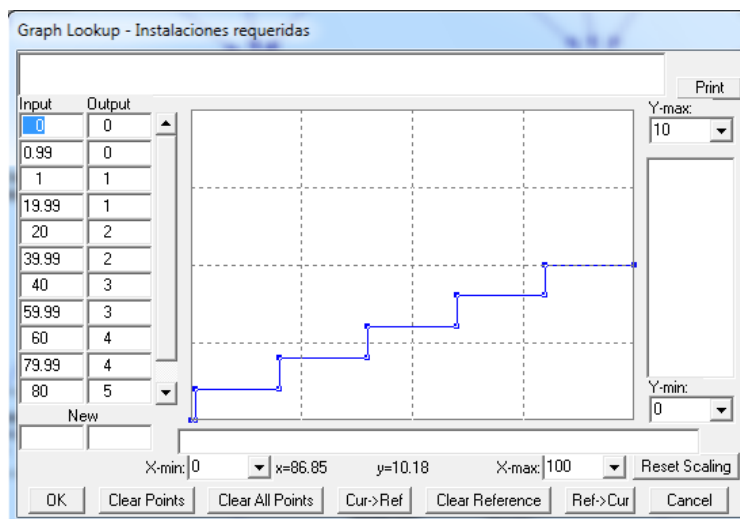


Figura 4.31: distribución de la variable “Instalaciones requeridas”.

- “Instalaciones deseadas”, que cumple la antigua función de “Instalaciones a construir”, permitiendo al usuario ingresar una cantidad determinada de invernaderos.
- “Switch instalaciones”, cuyo funcionamiento es dar al usuario la opción de alternar entre los dos métodos anteriores: o bien el modelo calcula cuantas instalaciones se requieren, o bien construye en base a una cantidad impuesta por el usuario. Esta variable también afecta el “Consumo efectivo”,

habilitando la influencia de un nivel de consumo relativamente grande para evitar que el modelo se estanque.

Se agrega al modelo la variable “Ventas de biodiesel” que funciona como cálculo intermedio de la suma del biodiesel exportado y el biodiesel vendido a nivel local antes de incorporar el ingreso por ventas de materia orgánica. Se modifica la pantalla de resultados para incorporar este parámetro y el de ventas de materia orgánica como gráficos para análisis.

Se incorpora la variable “Retraso” que influye sobre “Consumo efectivo” y determina el período de simulación en que tendrá el efecto el “Incremento deseado en el consumo” en el cálculo total. Se agrega a la pantalla de resultados un botón para habilitar al usuario la modificación de este tiempo de retraso.

Se agrega una nueva relación de influencia entre “Método de extracción del aceite” y “Materia orgánica”. Previamente si se anulaba la extracción de aceite el modelo no se anulaba, sino que continuaba vendiendo materia orgánica sin costo alguno. Esta nueva relación soluciona tal incoherencia.

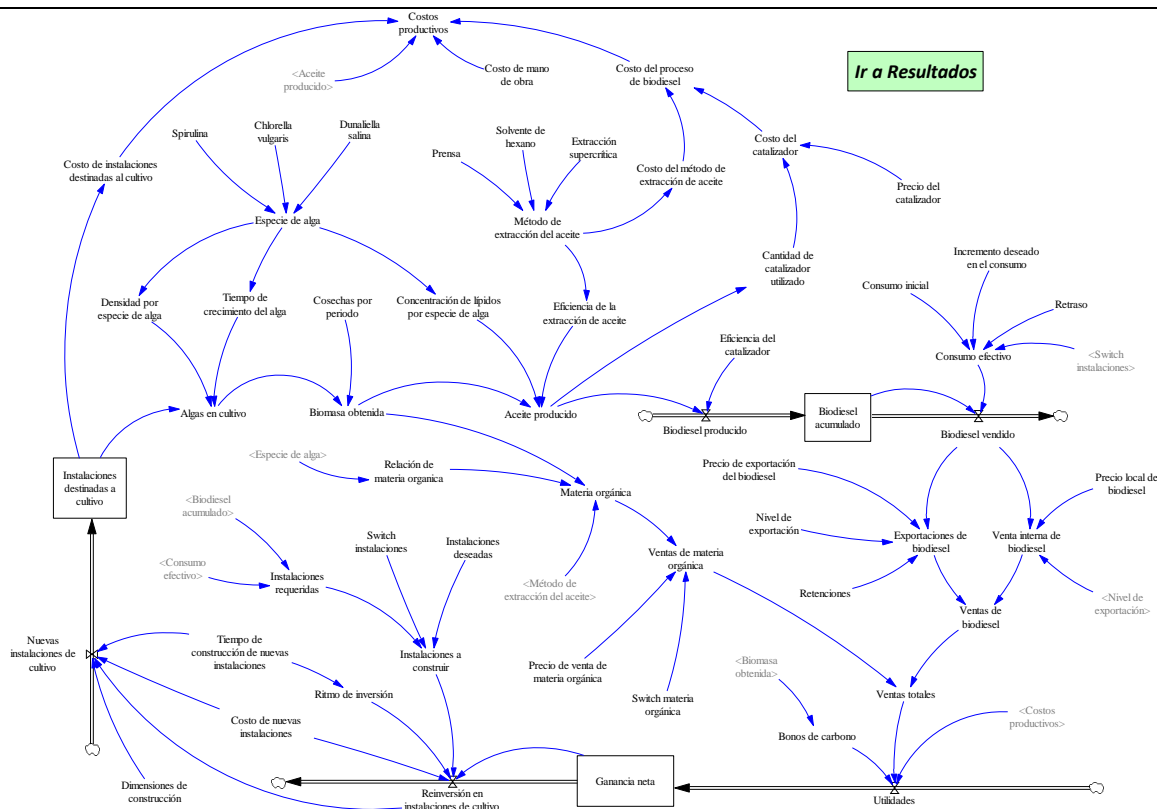


Figura 4.32: modelo de simulación versión 4.0.

Además de los cambios mencionados, se reacomodan los elementos de la pantalla de resultados para facilitar la visión de los gráficos al evaluar los distintos escenarios.

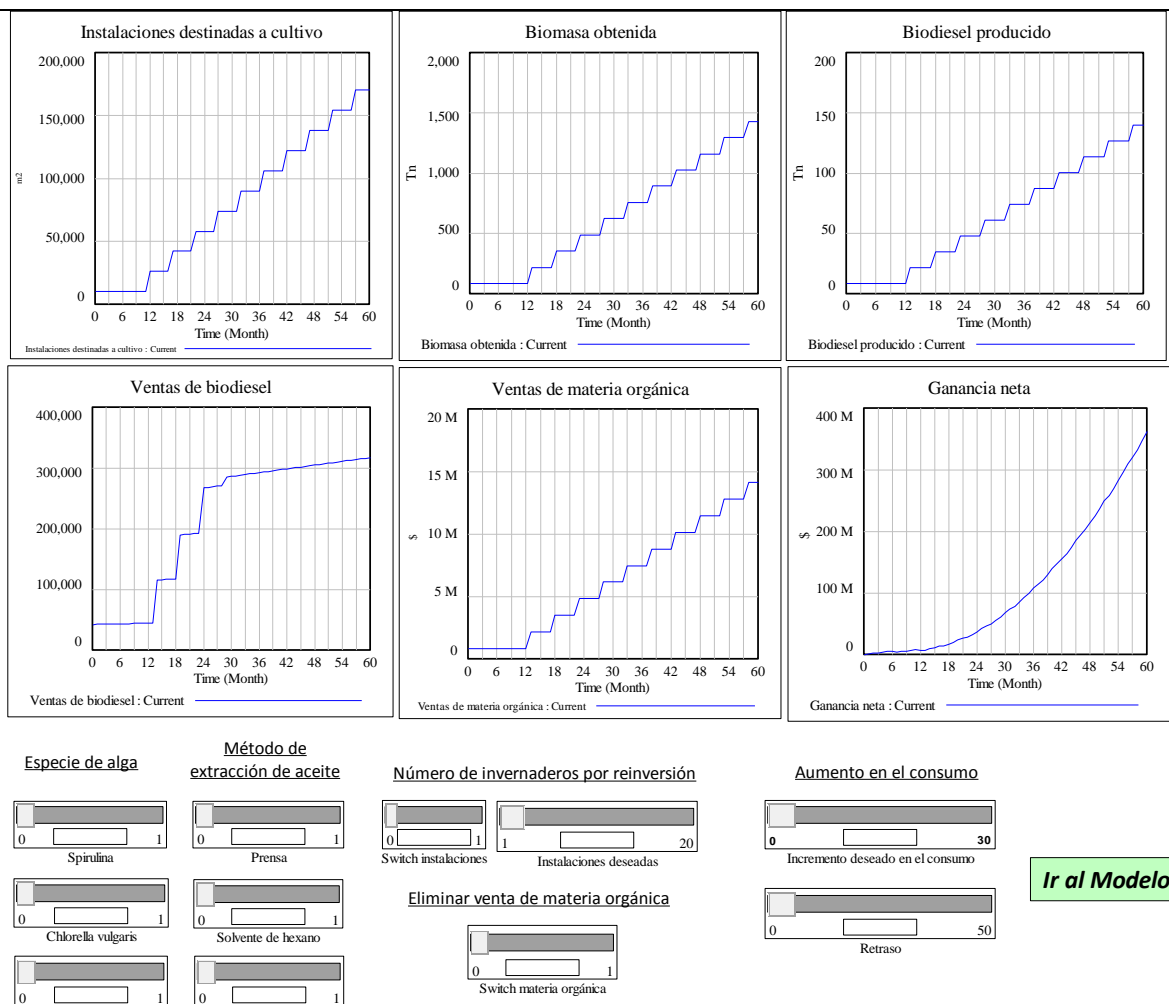


Figura 4.33: pantalla de resultados de la versión 4.0.



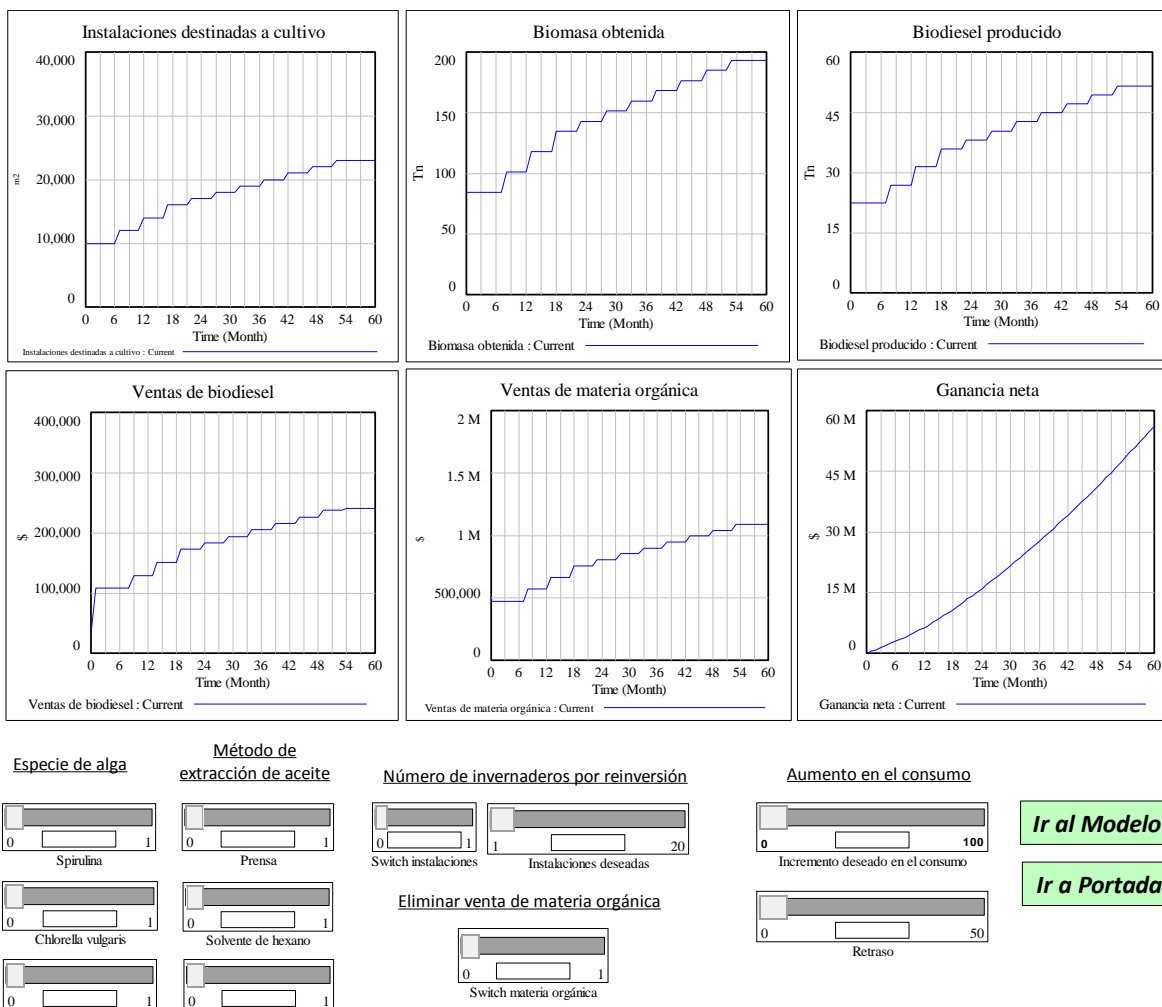


Figura 4.35: pantalla de resultados de la versión 5.0.

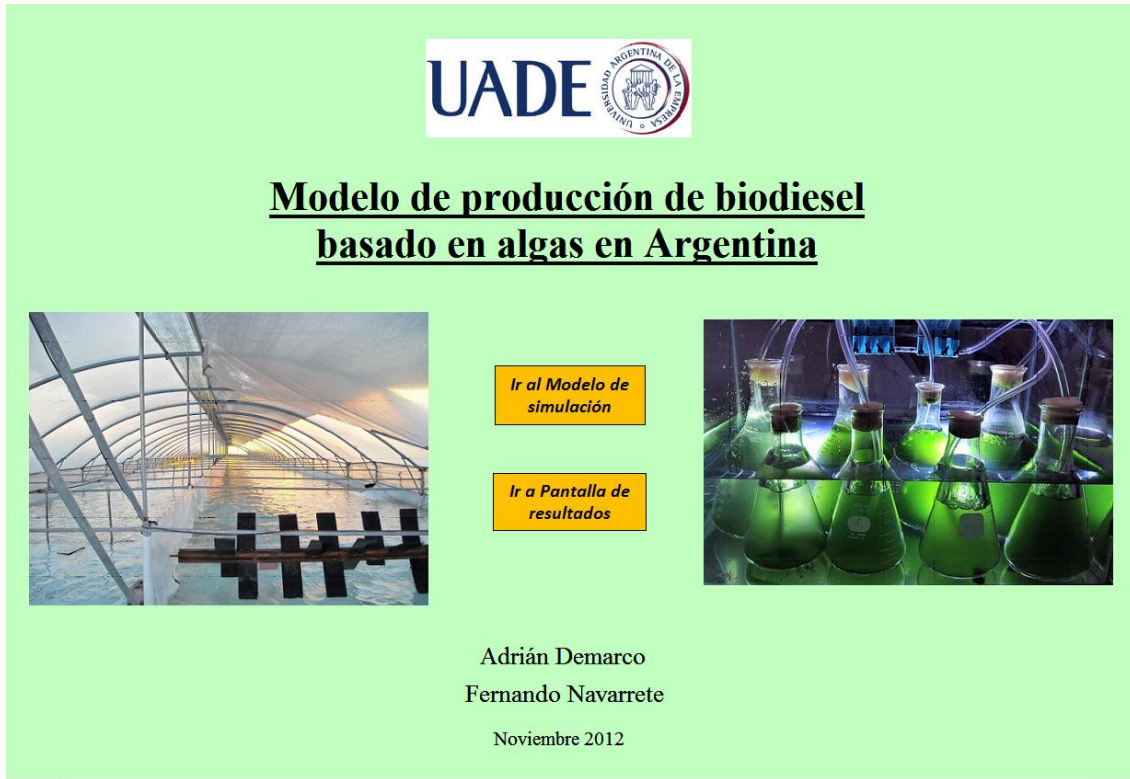


Figura 4.36: portada de la versión 5.0.



## 5. Simulación y resultados

Como hemos planteado anteriormente, nuestro objetivo mediante la construcción de este modelo de simulación fue representar la realidad de la industria de biodiesel de algas en nuestro país, para luego analizar lo que sucedería en el futuro bajo determinadas condiciones.

La primera evaluación del modelo es su perspectiva a 5 años en condiciones normales. Para esto localizamos el simulador en la pantalla de resultados, y luego corremos la simulación, sin modificar la configuración por defecto de ninguna de las variables. Se observa que, con la especie actualmente cultivada y el método actual de obtención de aceite, sin incrementos en el consumo, y ajustando la reinversión en invernaderos sólo a las cantidades necesarias para suplir el consumo, el mercado tiene un marcado crecimiento.

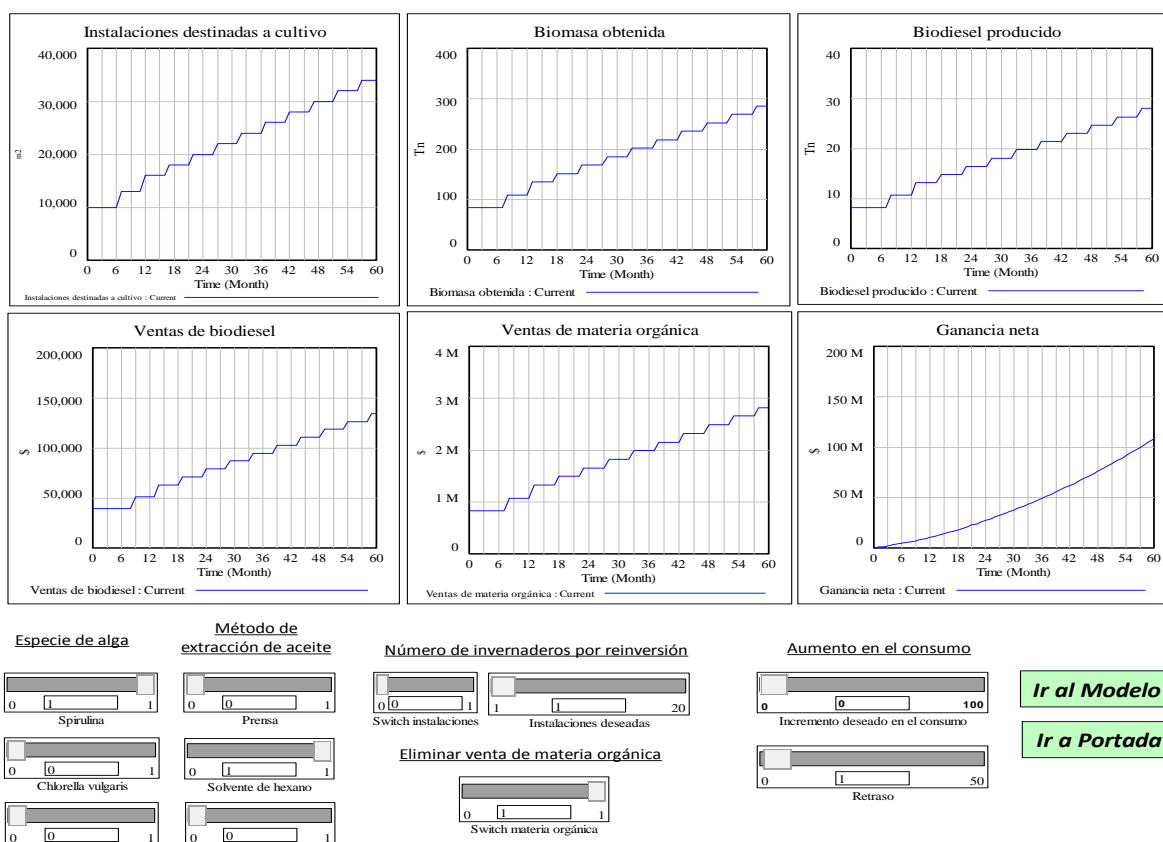


Figura 5.1: pantalla de resultados. Evaluación caso base.

Como se ve en la Figura 5.1, la producción de biodiesel de algas por mes pasa de 8,22 Tn a 27,9 Tn para fines del quinto año, dando una ganancia neta de \$110 millones, y con costos que no llegan a superar los \$35.000 mensuales. El espacio ocupado por los invernaderos llega a las 34000 m<sup>2</sup> (3,4 hectáreas), con lo que se demuestra cuán eficiente es el uso del suelo mediante el cultivo de algas en lugar de otros oleaginosos más comúnmente sembrados en Argentina.

Algo que deseamos probar antes de evaluar escenarios es cuan influyente es la comercialización de la materia orgánica remanente de la extracción del aceite sobre la ganancia neta. Para esto movemos el dial que ofrece la opción de eliminar del cálculo las ventas de materia orgánica (Figura 5.2) y corremos nuevamente la simulación.

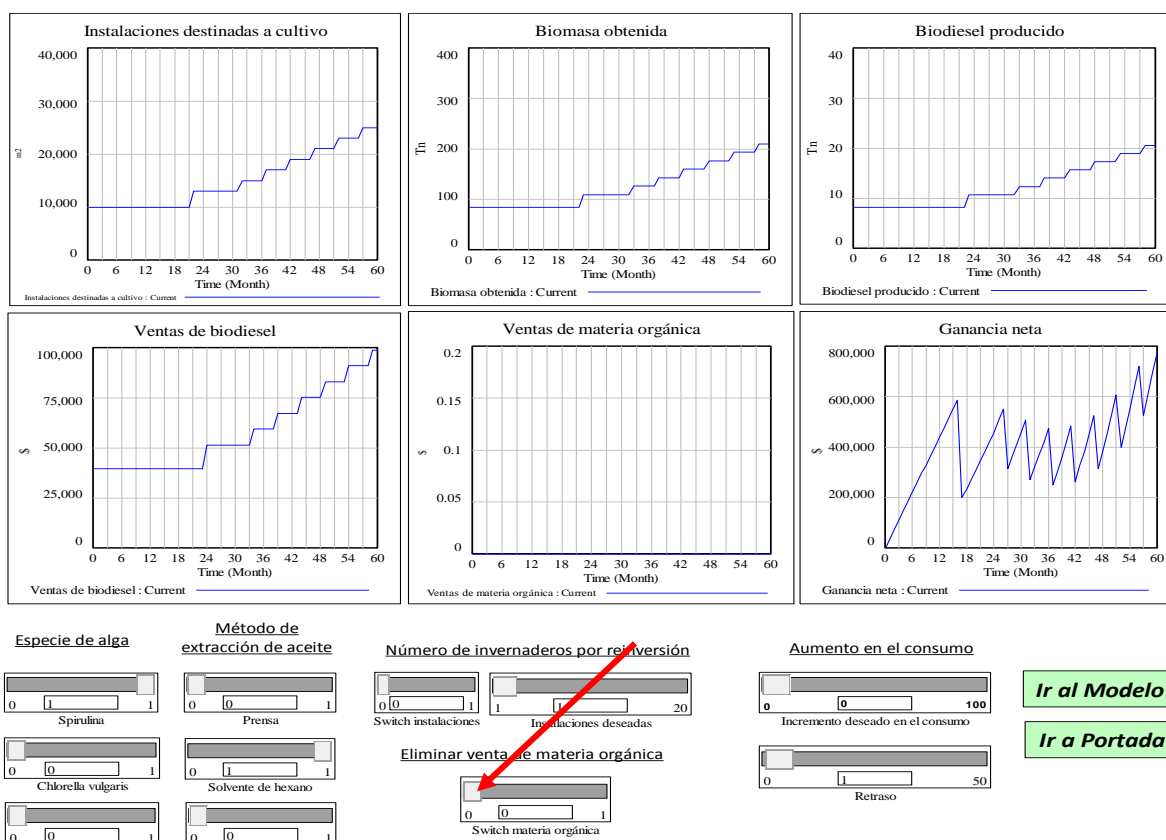


Figura 5.2: pantalla de resultados. Se anula venta de materia orgánica.

El resultado es contundente: las ganancias presentan un crecimiento muchísimo menor, por lo que las construcciones de invernaderos también caen, y junto con ellas la producción de biodiesel. Esto demuestra que en la práctica la verdadera industria rentable es la de proteínas de microalgas, siendo el aceite y sus posibles usos como combustible el subproducto de esta industria, y no a la inversa como se consideró al plantear el modelo. Otra conclusión que puede observarse es que, si bien las ganancias son menores, en ningún momento son negativas, por lo que el negocio nunca deja de ser rentable, a diferencia de lo que afirman muchas investigaciones sobre el tema. Esto es debido al nivel de costos que se manejan en la industria, producto de los avances técnicos de Oil Fox mencionados anteriormente. Si estos costos fuesen más altos, como mínimo U\$S1000 por Tn, el resultado económico sería negativo.

Analizamos el comportamiento del modelo conservando la misma especie de alga pero utilizando otro método de extracción de aceite. Para eso utilizamos los botones de elección del método. Primeramente se realiza la simulación con el método de prensa. Se coloca el dial rotulado “Solvente hexano” en la posición “0” para anular su efecto y se mueve el botón correspondiente a “Prensa” en la posición “1” tal como lo ilustra la Figura 5.3. Se observa que hay una variación de entre 3 y 4 Tn/mes menos producidas con este método que con el de solvente hexano, y por lo tanto las ventas también serán menores, reduciéndose hasta aprox. \$19.000 mensuales menos en el último período simulado.

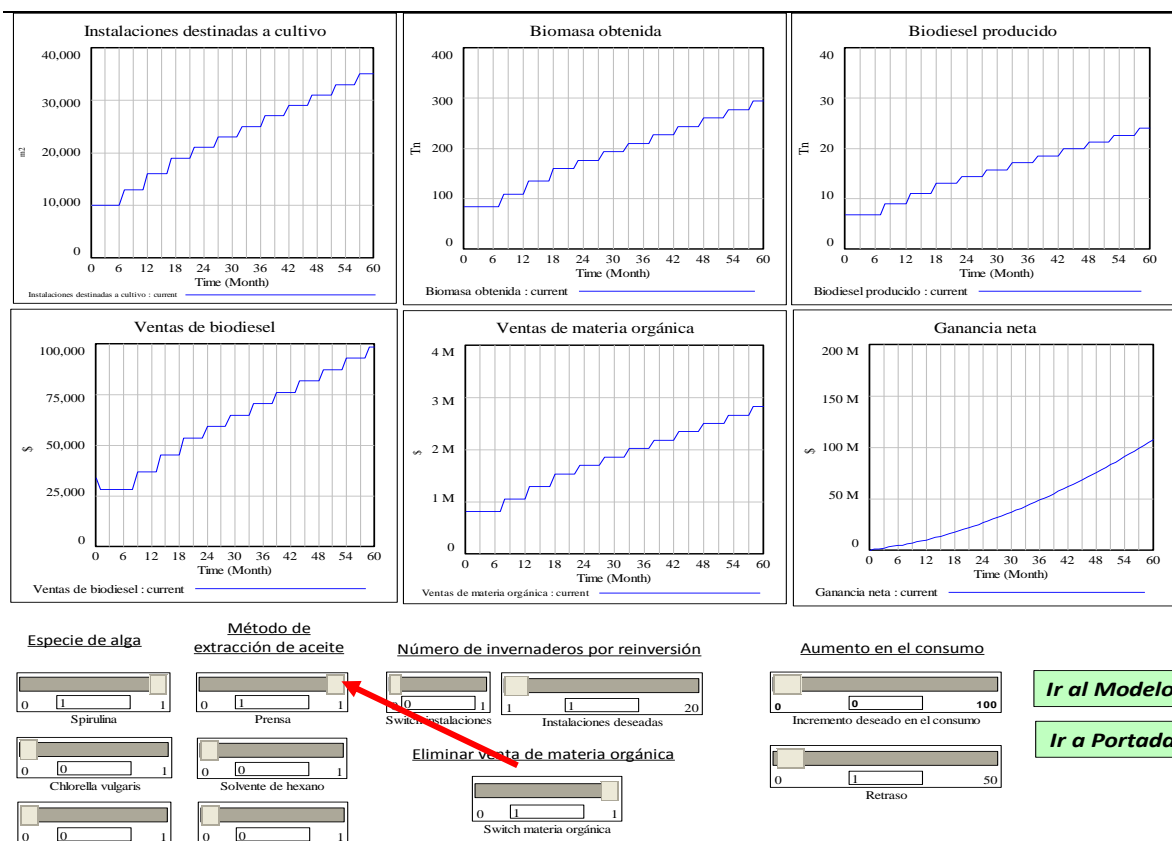


Figura 5.3: pantalla de resultados. Alga *Spirulina* – Método Prensa.

Seguidamente se prueba el tercer método de obtención de aceite, la extracción supercrítica. Reposicionamos el botón de “prensa” a su lugar por defecto y luego utilizamos el botón de “Extracción supercrítica”, señalado en la Figura 5.4. La producción de biodiesel resulta superior en 1 a 3 Tn/mes, y la diferencia en ventas es aprox. \$15.000 mayor.

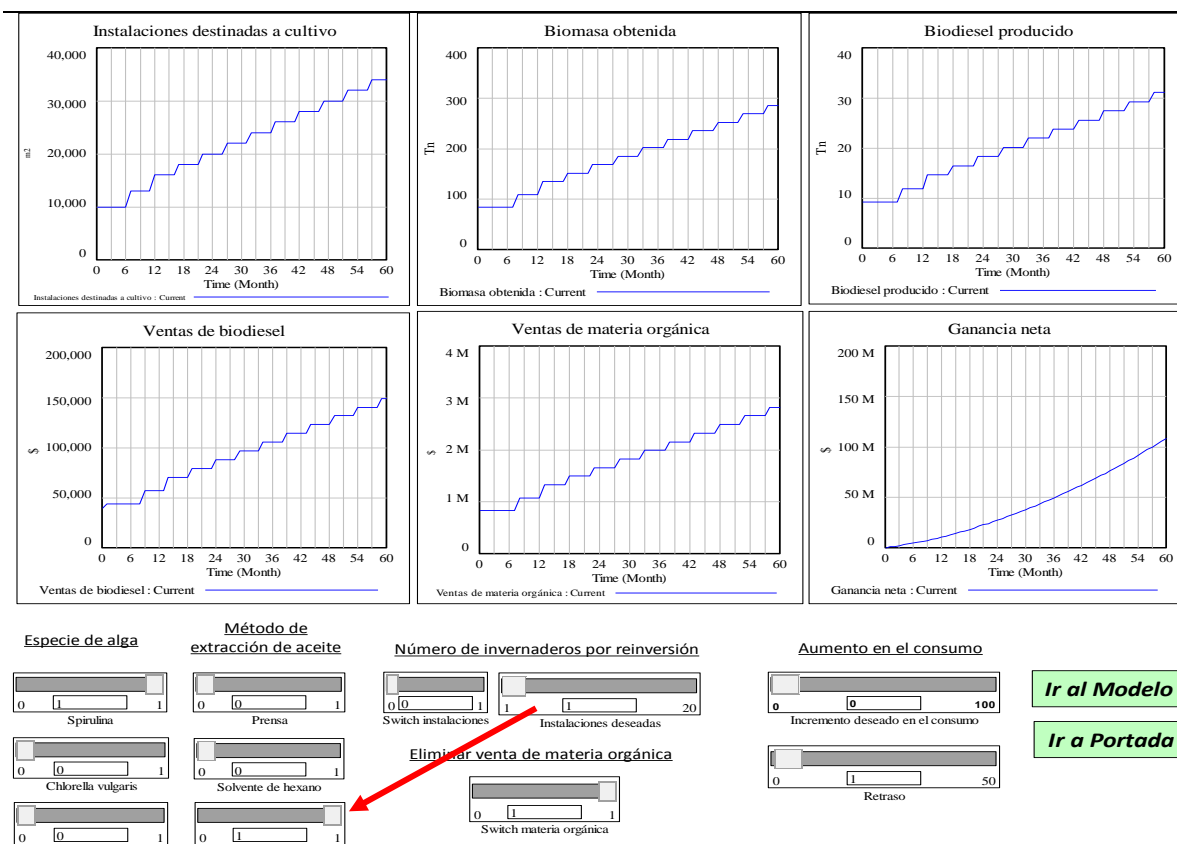


Figura 5.4: pantalla de resultados. Alga *Spirulina* – Método Extracción supercrítica.

Los Gráficos 5.1 y 5.2 comparan la producción y la venta de biodiesel respectivamente con cada método. Se observa el comportamiento creciente en los escenarios ensayados, aunque con una diferencia que favorece el método de extracción supercrítica. Aun así, en el Gráfico 5.3, que compara las ventas de materia orgánica, se puede observar que las curvas se superponen casi en todos los periodos, indicando que no se presentan grandes variaciones en los tres escenarios. Este mismo comportamiento se puede apreciar en la ganancia neta del ejercicio de la industria, representada en el Gráfico 5.4. En los tres casos se aprecia un crecimiento exponencial de las ganancias, sin mucha diferencia con respecto a los otros métodos. El Gráfico 5.5 compara los m<sup>2</sup> construidos en cada período en los tres escenarios. El método “prensa” presenta una hectárea más a partir del periodo 17 puesto que el menor costo de este método permite un ahorro inicial mayor. De todas formas ese invernadero extra no impacta positivamente en la producción final de biodiesel, a pesar de que el volumen de algas cultivadas sea mayor.

### Biodiesel producido

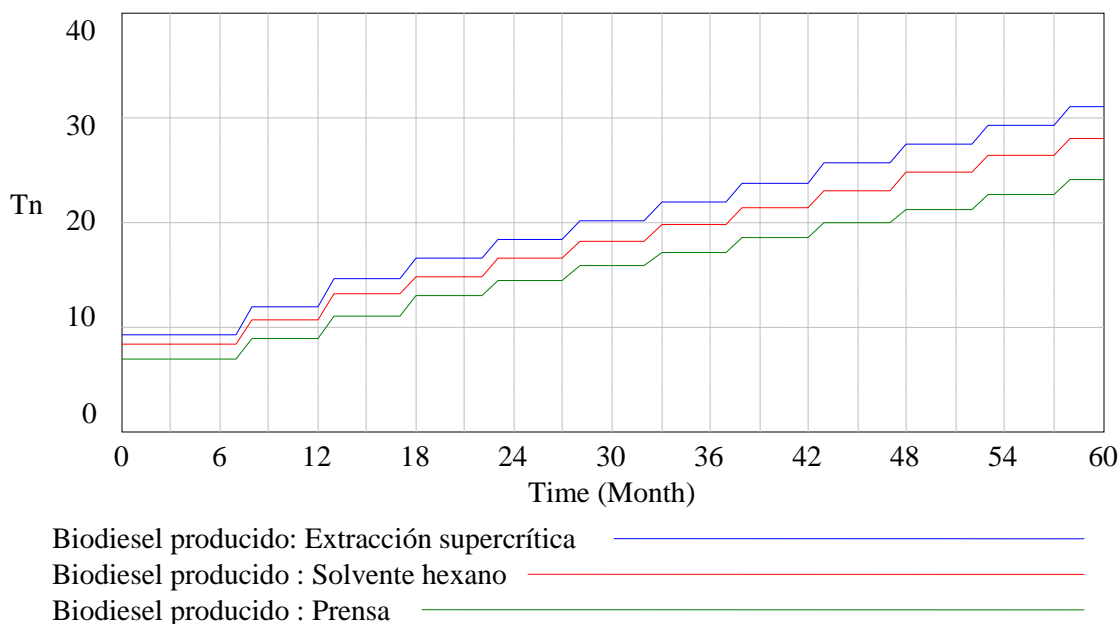


Gráfico 5.1: Biodiesel producido por período. Comparación métodos de extracción.

### Ventas de biodiesel

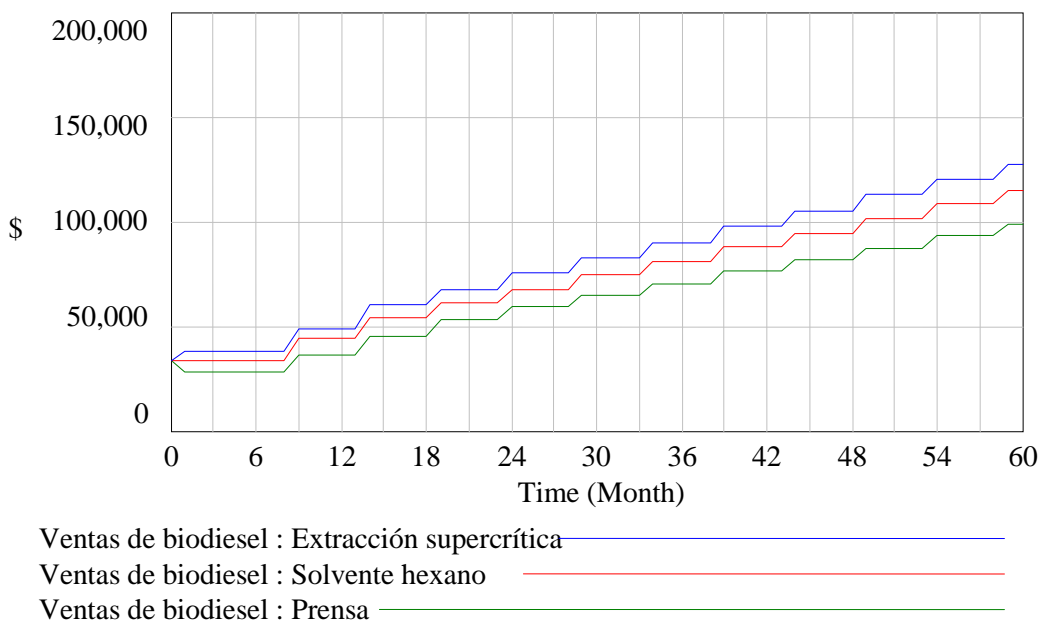


Gráfico 5.2: Biodiesel vendido por período. Comparación métodos de extracción.

### Ventas de materia orgánica

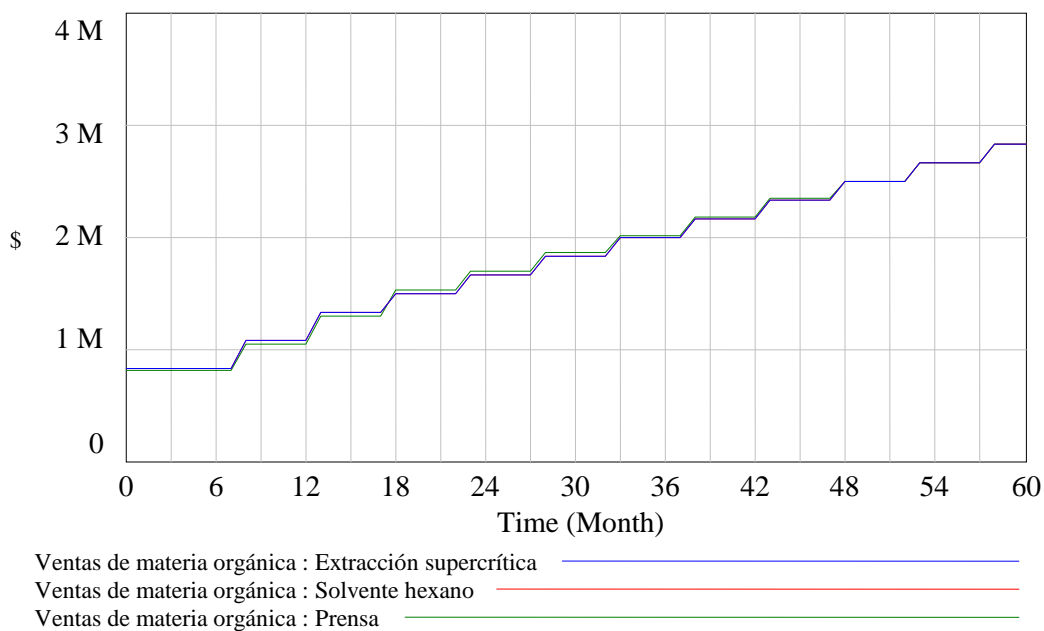


Gráfico 5.3: Materia orgánica vendida por período. Comparación métodos de extracción.

### Ganancia neta

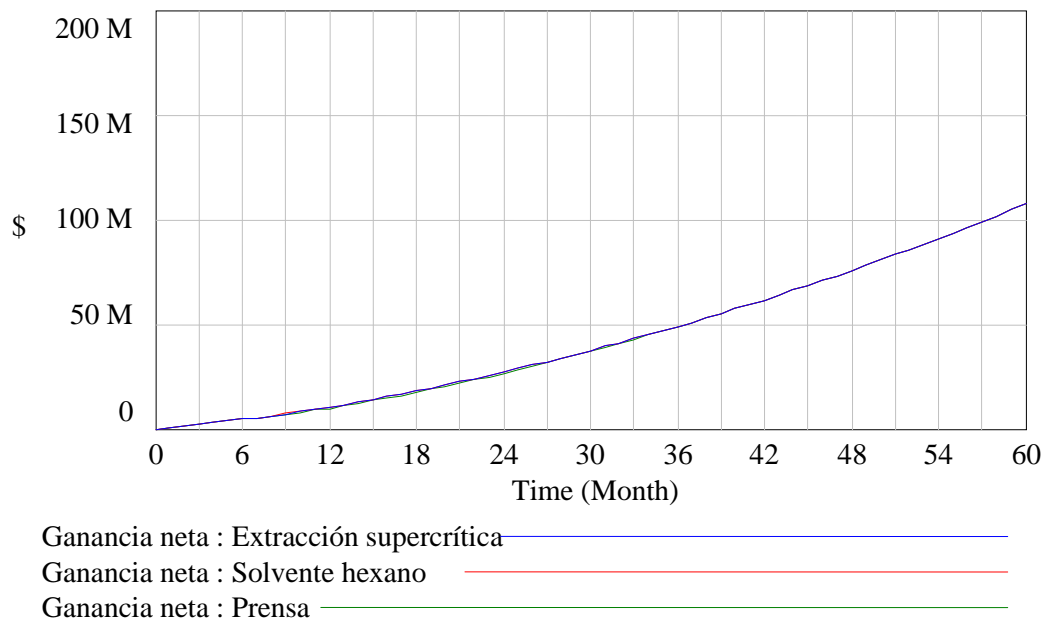


Gráfico 5.4: Ganancia neta por período. Comparación métodos de extracción.

### Instalaciones destinadas a cultivo

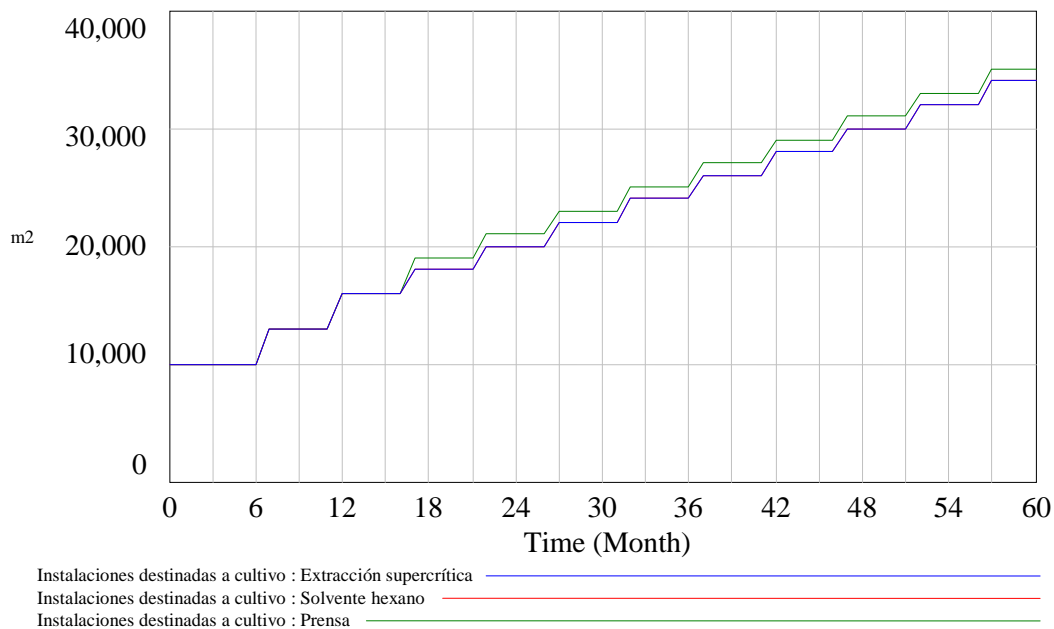


Gráfico 5.5: Área destinada a instalaciones por período. Comparación métodos de extracción.

Esta serie de ensayos evidencia que no existen mayores ventajas a nivel económico en la elección del método. En las dos pruebas anteriores, ni la ganancia neta ni la construcción de nuevas instalaciones se movieron de forma considerable, debido a que la principal influencia sobre la ganancia está en la venta de materia orgánica, la cual funciona indistintamente de cómo se extraiga el aceite. Si se desea lograr un máximo de producción y comercialización de biodiesel, el método supercrítico es el indicado, aunque se deberían evaluar otros aspectos como la rentabilidad económica del método en sí o la infraestructura requerida para su implementación con el fin de determinar si es factible su uso en el país.



La siguiente variable que se va a evaluar es la especie de alga. Para esto colocamos el botón del método de extracción en su posición básica (Solvente hexano) y manipulamos los botones de especie de alga. Primero analizamos el comportamiento del modelo con la especie *Chlorella vulgaris*. Posicionamos el dial de este método como figura en la Figura 5.5, previamente colocado el botón del método por defecto, *Spirulina*, en la posición “0” para anular su efecto.

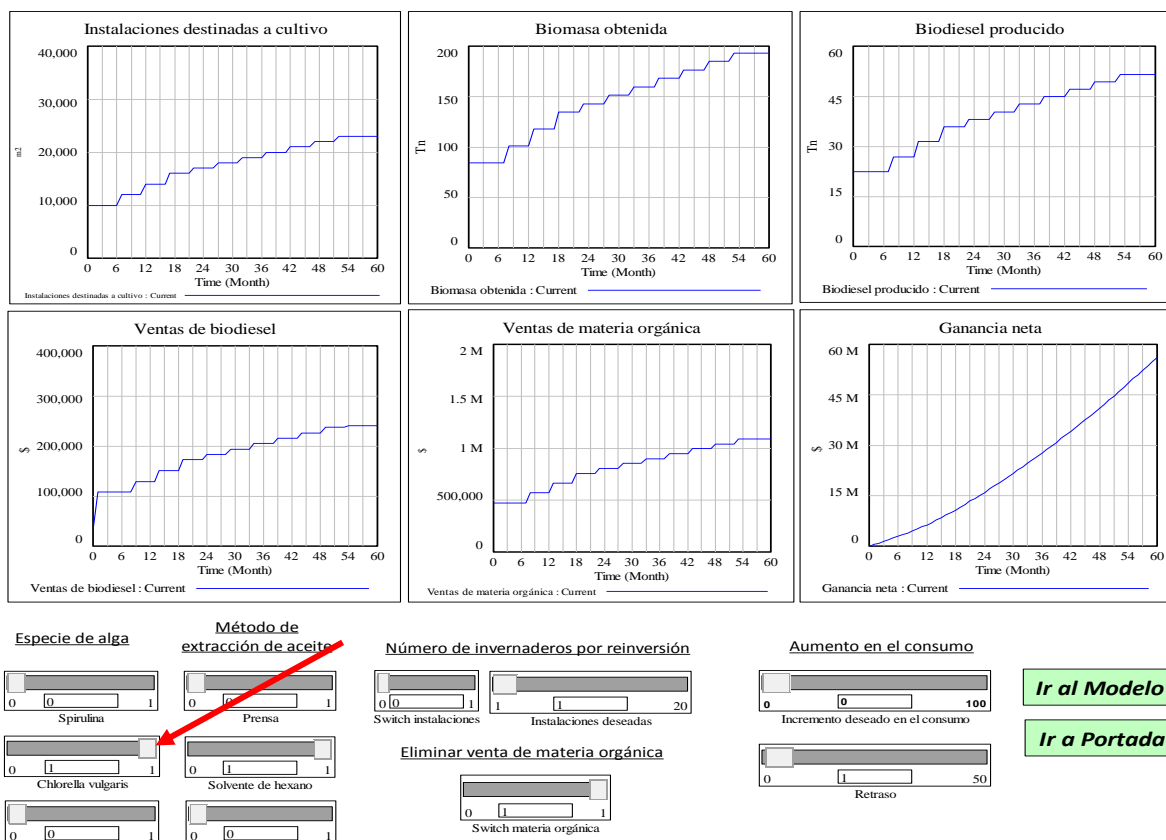


Figura 5.5: pantalla de resultados. Alga *Chlorella vulgaris* – Método Solvente hexano.

Como puede observarse, la producción de biodiesel se incrementa hasta llegar al fin del intervalo simulado a 51,5 Tn/mes, casi el doble de lo producido con la *Spirulina*, ya que en su composición química el porcentaje de lípidos es mayor, lo que da a lugar a un mayor nivel de aceite para extraer. Sin embargo dentro de esa composición química el porcentaje de proteínas es menor, por lo que se reduce la materia orgánica obtenida y comercializada. Esto tiene un efecto en la ganancia neta, que cae a \$56,1

millones, cifra sensiblemente menor que en el caso de la *Spirulina*. Esto confirma lo anteriormente afirmado de la focalización en la producción de proteínas de alga como negocio más rentable que el de biodiesel. Los invernaderos construidos también sufren una caída, llegando solo a 23.000 m<sup>2</sup> (2,3 hectáreas).

Ahora analizaremos la tercera especie de alga ingresada en el modelo, la *Dunaliella salina*. Retornamos el dial correspondiente a *Chlorella vulgaris* a la posición pasiva y colocamos el botón señalado en la Imagen 5.6, en la posición activa.

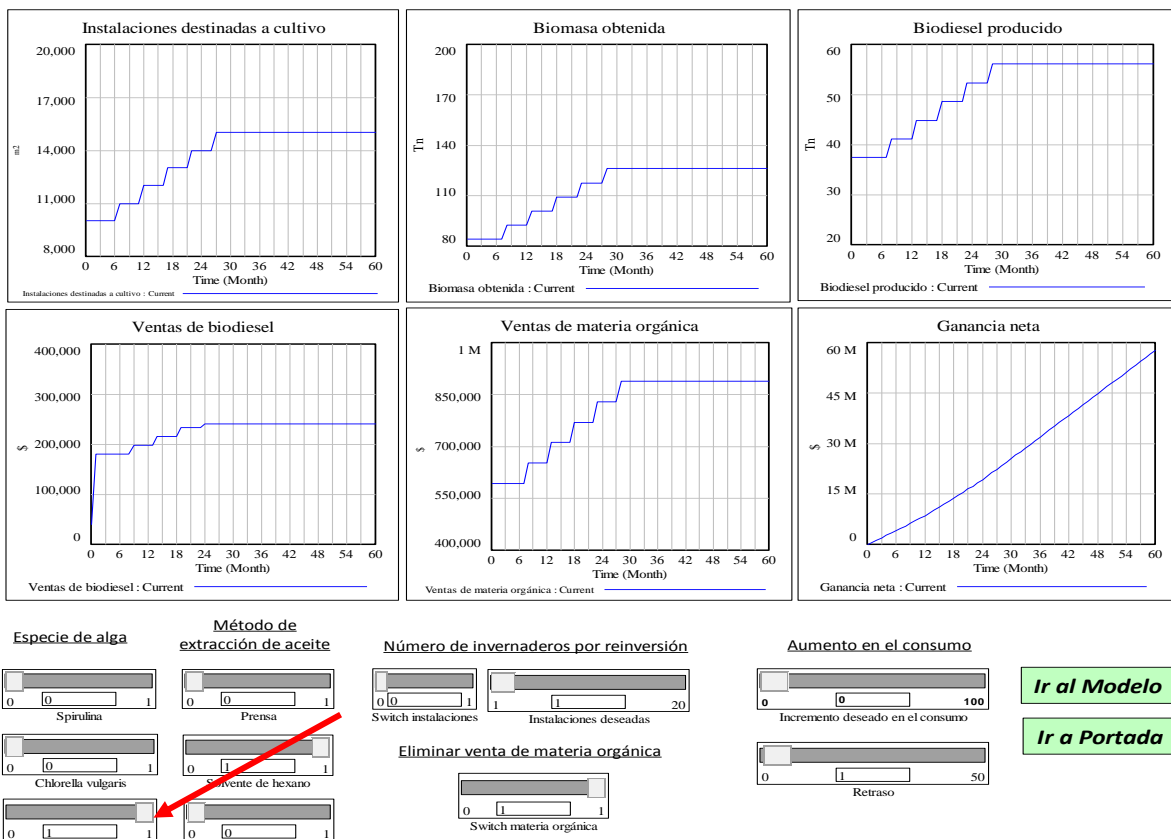


Figura 5.6: pantalla de resultados. Alga *Dunaliella salina* – Método Solvente de hexano.

Esta vez la producción de biodiesel crece rápidamente hasta los 56 Tn/mes en el periodo 28, ya que la concentración de lípidos de la *Dunaliella* es una de las mayores que se encuentran en la naturaleza. Las ventas de biodiesel crecen hasta alcanzar a satisfacer el consumo actual, entonces el simulador deja de vender (Gráfico 5.7) y de construir invernaderos. Todas las variables adquieren un comportamiento constante, y el

remanente de biodiesel empieza a acumularse, como puede observarse en el Gráfico 5.6. Si se modifican los botones de “Incremento deseado en el consumo” y “Retraso” señalados en la Figura 5.7, para aumentar el máximo de biodiesel a vender, vemos que la linealidad es adquirida en periodos posteriores del intervalo evaluado, lo que indica que el limitante es el consumo efectivo, parámetro que utilizamos en este análisis como una referencia del nivel de comercialización de este tipo de biodiesel. Debemos tener en cuenta que este límite es teórico, concebido para el correcto funcionamiento del simulador en lo relacionado con producción, sin explorar las variables de consumo reales. Si en la práctica se desplazara la demanda de biodiesel de otras fuentes por el obtenido a base de esta especie de alga, la producción simulada se vendería en su totalidad, sin acumulaciones como la observada en esta corrida del simulador.

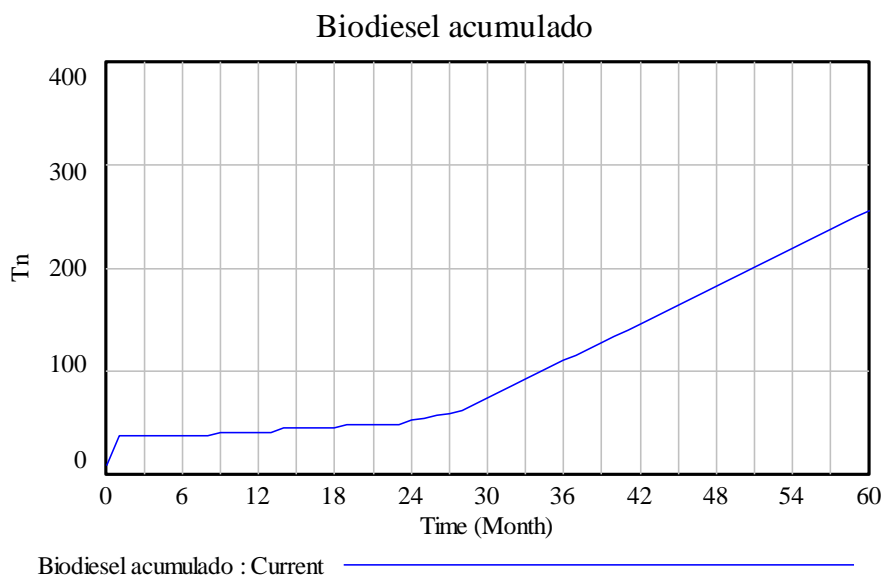


Gráfico 5.6: Biodiesel acumulado por periodo. *Dunaliella salina* – Solvente hexano.

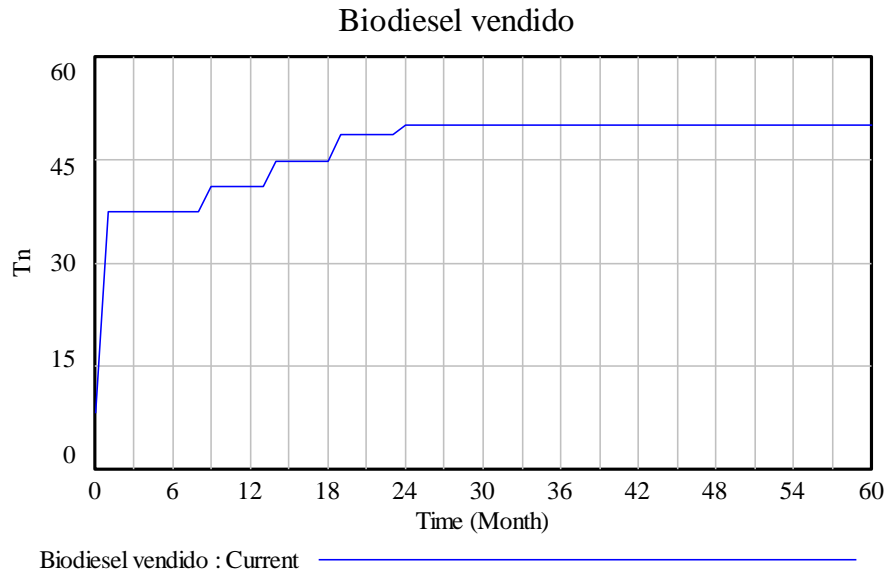


Gráfico 5.7: Biodiesel vendido por periodo. *Dunaliella salina* – Solvente hexano.

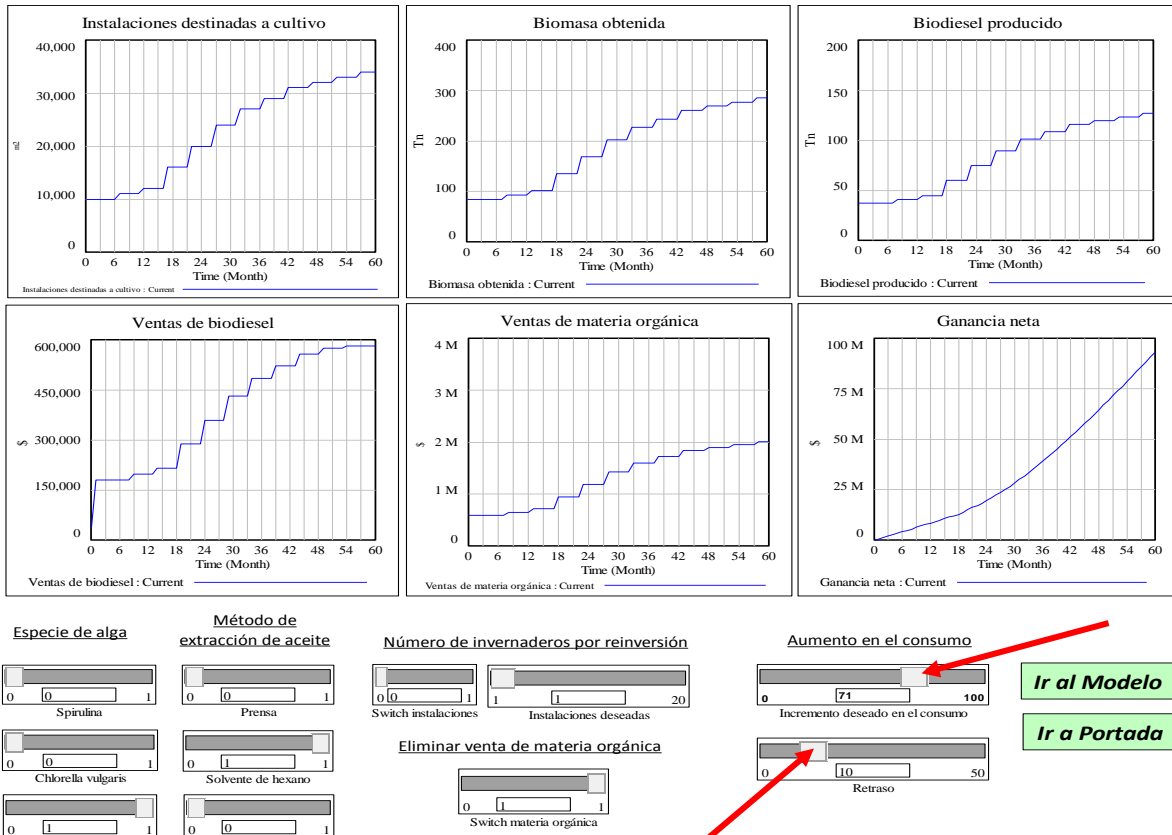


Figura 5.7: pantalla de resultados. Alga *Dunaliella salina* – Método Solvente hexano.

Consumo incrementado.

El Gráfico 5.8 representa los niveles de producción de biodiesel de acuerdo a la especie de alga cultivada, manteniendo el consumo esperado por defecto. Como puede observarse comparativamente las cantidades alcanzadas con la especie *Dunaliella* salina superan el cuádruple de lo obtenido con la especie explotada actualmente. Debido a lo mencionado sobre la expectativa de consumo teórica, pueden apreciarse los estancamientos en los tres gráficos en periodos diferentes. Este mismo comportamiento lo describen las curvas de ventas del biodiesel por periodo, representadas en el Gráfico 5.9. La venta de materia orgánica, por otro lado, sigue un comportamiento incremental en el caso de la *Spirullina*, como lo muestra el Gráfico 5.10, debido a la mayor concentración proteínica de esta especie. Las otras variantes siguen un crecimiento mucho menor, con un comportamiento más estable a lo largo de todos los periodos en el caso de la *Dunaliella*. En vista de esto, la ganancia neta y la reinversión en mayor estructura, representadas en los Gráficos 5.11 y 5.12, son mayores con la *Spirullina*.

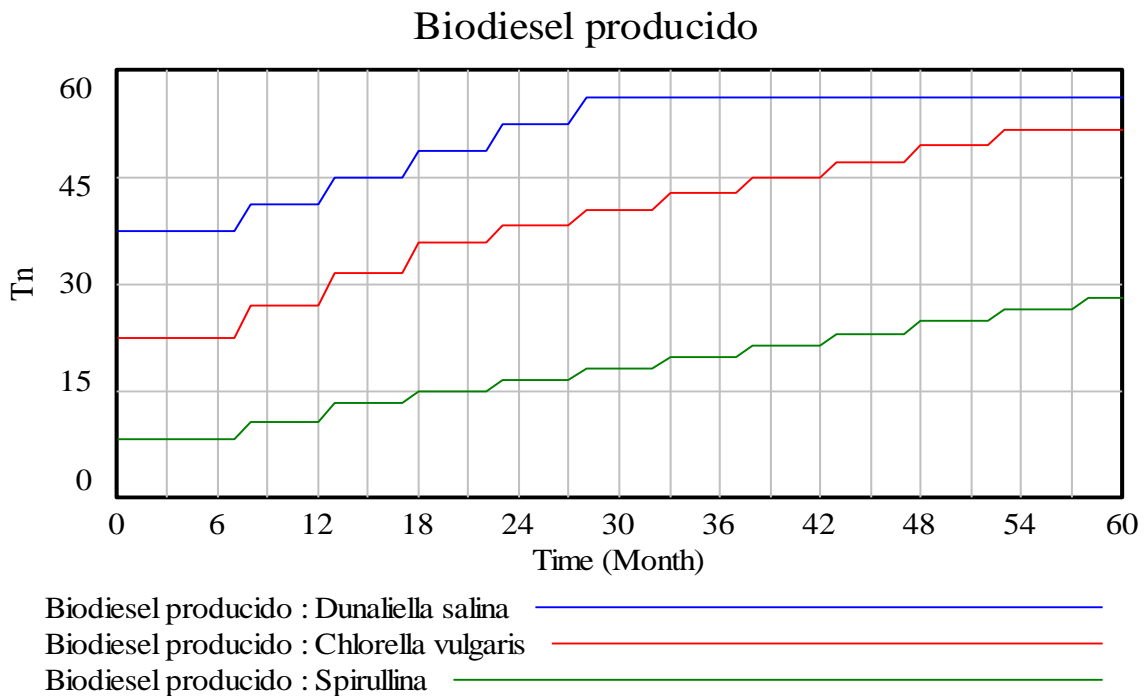


Gráfico 5.8: Biodiesel producido por período. Comparación especies de alga.

### Ventas de biodiesel

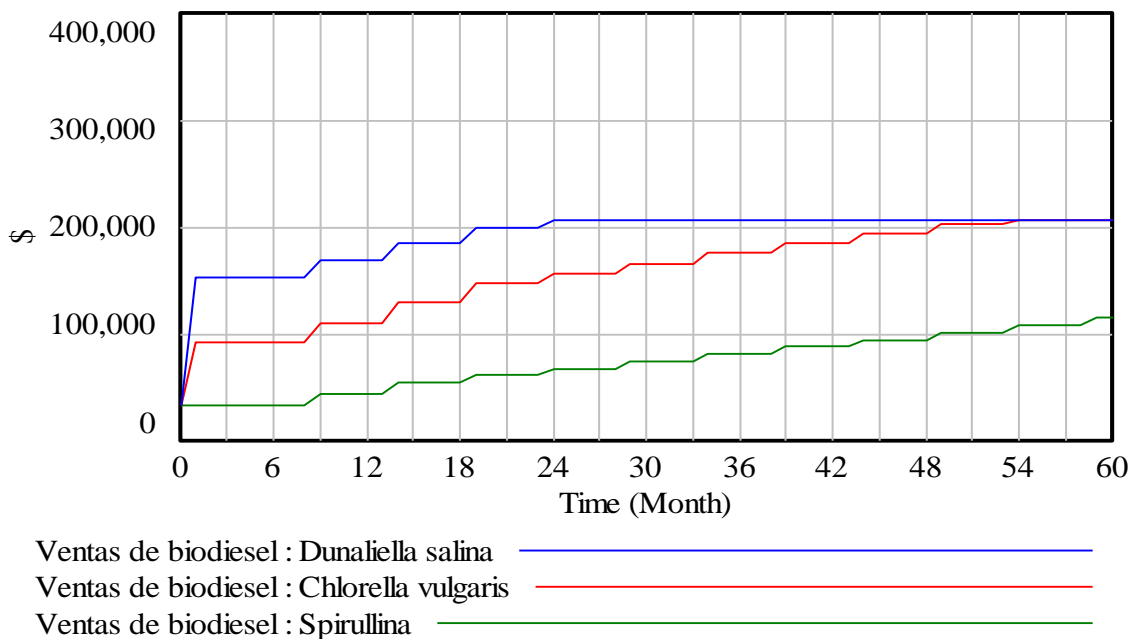


Gráfico 5.9: Biodiesel vendido por período. Comparación especies de alga.

### Ventas de materia orgánica

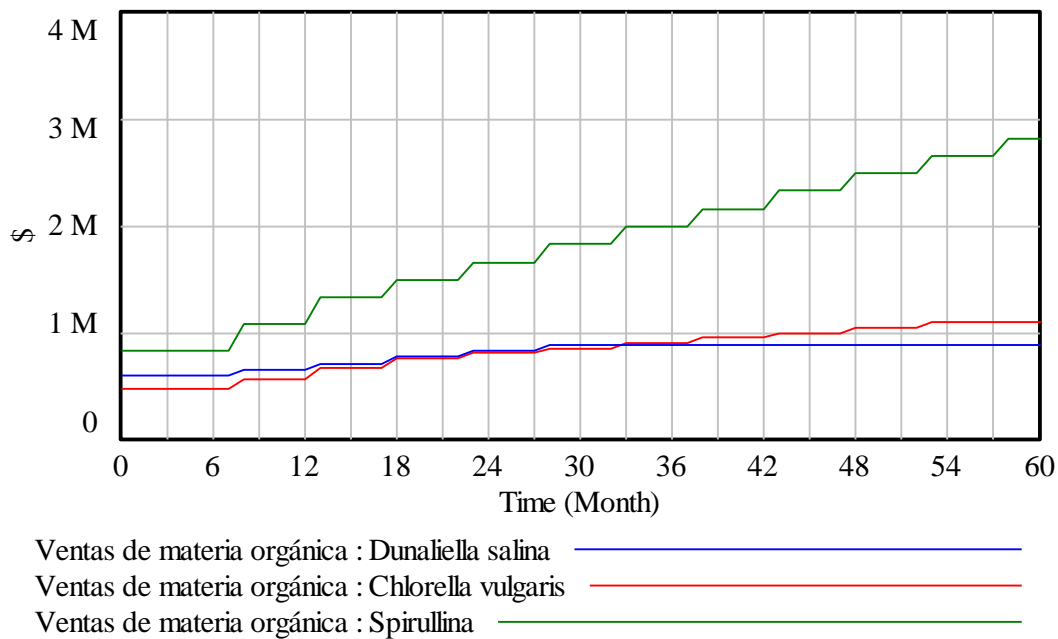


Gráfico 5.10: Materia orgánica vendida por período. Comparación especies de alga.

### Ganancia neta

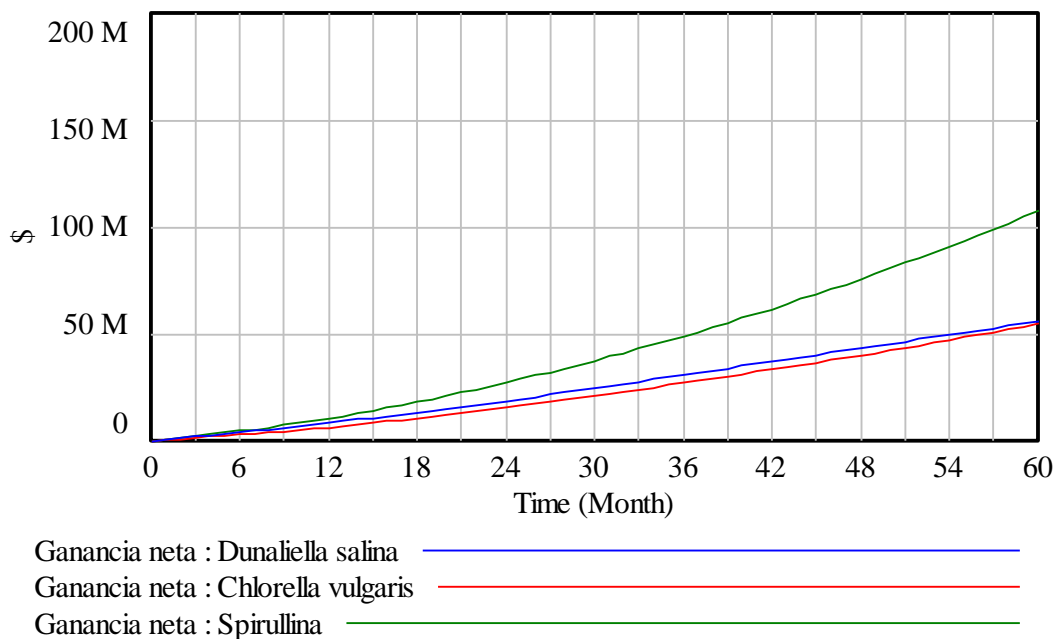


Gráfico 5.11: Ganancia neta por período. Comparación especies de alga.

### Instalaciones destinadas a cultivo

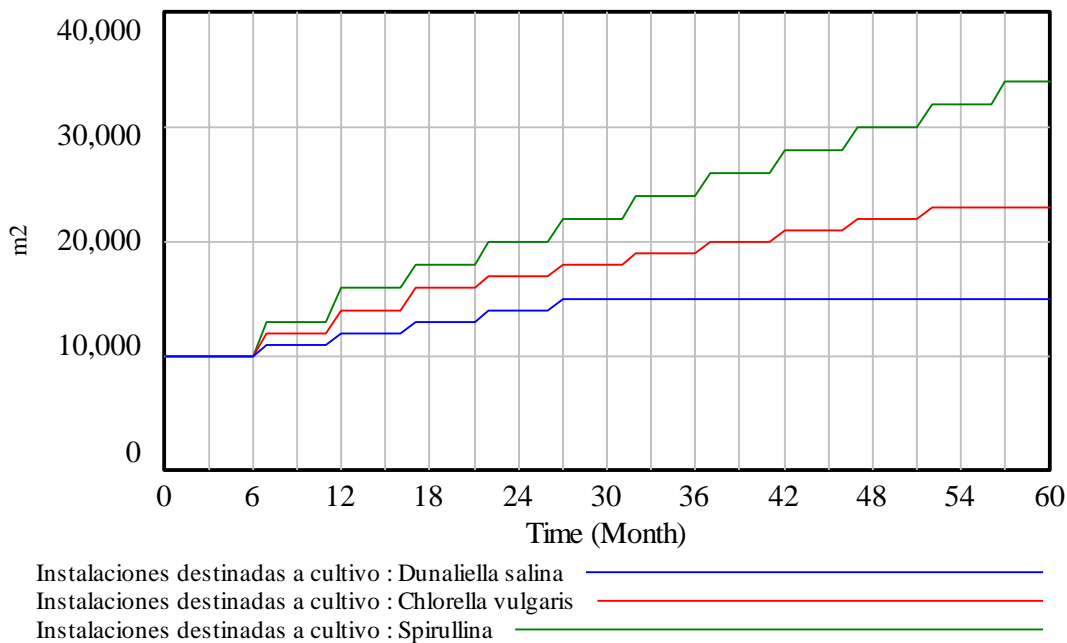


Gráfico 5.12: Área destinada a instalaciones por período. Comparación especies de alga.

El análisis de las diferentes variantes de especie de alga deja como resultado el hecho que, aunado a nuestra primera conclusión de la superioridad del negocio de proteínas, la rentabilidad del negocio será mayor cuanto más materia orgánica pueda obtenerse del alga. Sin embargo, la finalidad de la industria es de producir la mayor cantidad de biodiesel para reemplazar los combustibles fósiles y aportar con energía renovable al sistema, por lo que la especie más favorecida será aquella con la mayor concentración de lípidos, independientemente de cuanto mayor sean las ganancias si se cultiva un alga de alto contenido proteico, pero poco aceite extraíble.

El último análisis será modificar cuantos invernaderos se construyen en cada proyecto de inversión. Para esto volveremos a setear el modelo en la configuración de caso base, es decir, con *Spirulina* como especie y hexano como método de extracción. Seguidamente se mueve el botón para habilitar la elección arbitraria de instalaciones, la cual se maneja con el botón contiguo, señalado en la Figura 5.8. Lo colocamos en diferentes posiciones para analizar su efecto sobre el modelo.



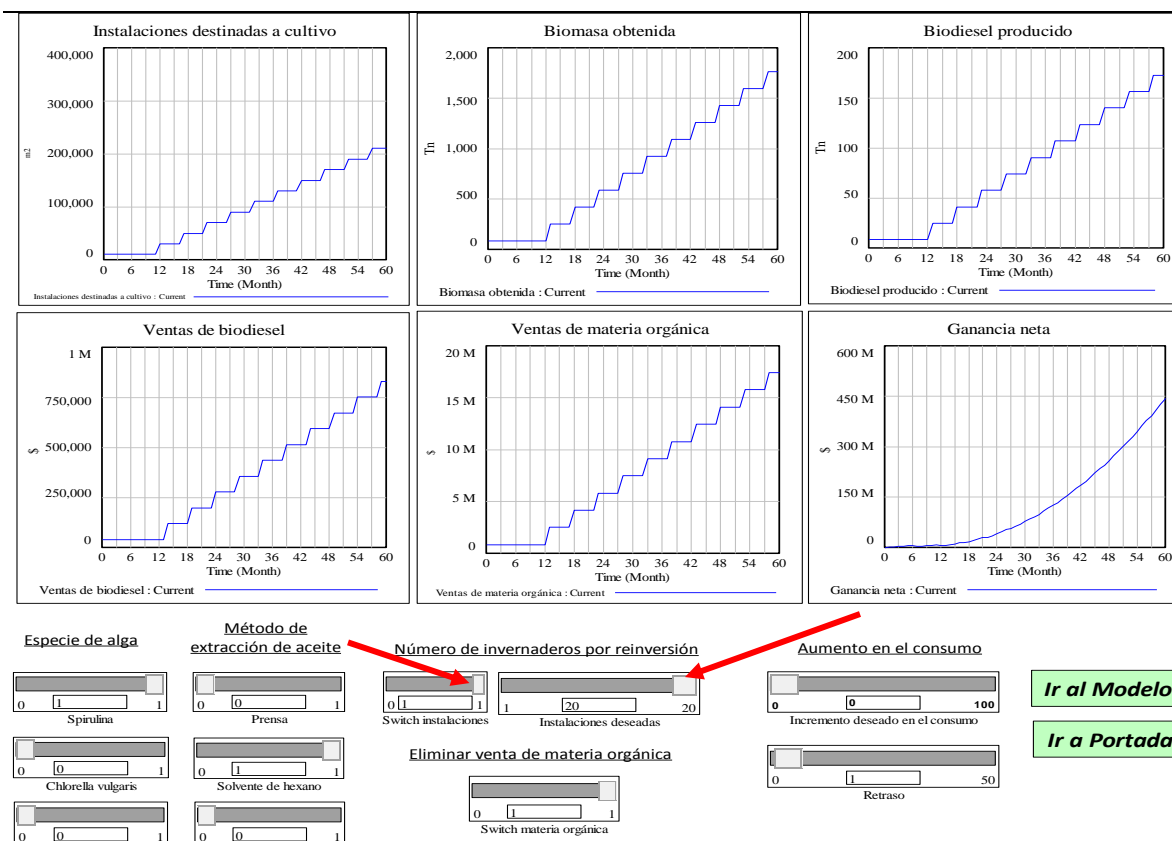


Figura 5.8: pantalla de resultados. Se maximiza el número de invernaderos por reinversión.

Se observa un crecimiento importante tanto en la producción como en las ventas a medida que aumenta la cantidad de invernaderos construida por inversión. En un escenario donde se puede construir de a 20 invernaderos, el máximo programado en el simulador, se alcanza una capacidad productiva de 210000 m<sup>2</sup> (21 hectáreas), logrando más de 172 Tn/mes de biodiesel para fines de los 5 años simulados, con ventas que llegan a \$830.000 e ingresos por ventas de materia orgánica que se disparan a más de \$17 millones. Las utilidades de la industria alcanzan una cifra de \$440 millones. Notamos la mayor rentabilidad del negocio cuanto mayor sea el número de invernaderos existentes.

Probamos este mismo análisis pero eliminando la venta de materia orgánica. Posicionamos el botón correspondiente hacia la posición izquierda, como lo muestra la Figura 5.9.

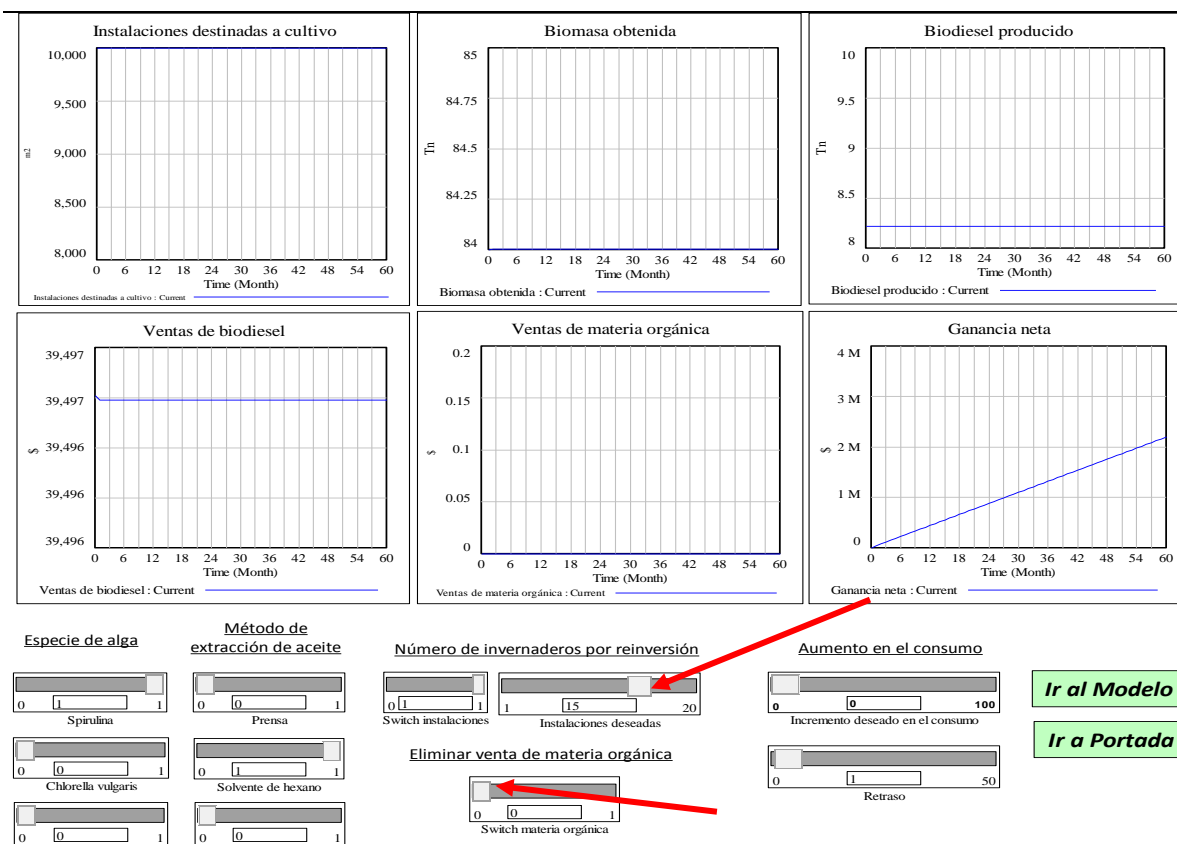


Figura 5.9: pantalla de resultados. Variación del número de invernaderos construidos sin ventas de materia orgánica.

Al ser reducidas considerablemente las ganancias, se dispone de menos capital para invertir en más instalaciones, por lo que cuanto mayor sea el número de invernaderos a construir por vez, más tiempo se tardará en invertir, y en sumatoria menor será la cantidad realmente construida. Cuando la cantidad limitada sea mayor a 15 no habrá reinversiones en el intervalo simulado, por lo que la producción de biodiesel será constante de poco más de 8 Tn/mes, y las ganancias netas llegan apenas a los \$2.19 millones.

La conclusión en cuanto a estas dos últimas pruebas es que, bajo una estructura de costos similares a la simulada, y logrando siempre el aprovechamiento económico del material orgánico, la producción de biodiesel será más rentable cuanto más invernaderos sean construidos. Se debe tener en cuenta que el máximo de instalaciones a construir por proyecto nunca supere el capital generado por la misma industria para que no

ocurra lo mencionado en el párrafo anterior, ni que el mínimo sea tan bajo que se desaprovechen oportunidades de crecimiento. Si estos factores son tenidos en consideración, lo que necesita la industria de biodiesel de algas es escala, construir muchos más invernaderos de este tipo para maximizar la producción y ocupar un mayor lugar en el mercado de los biocombustibles.

## 6. Conclusiones

La realización de este trabajo de investigación con base en la Dinámica de Sistemas nos ha demostrado sin lugar a dudas la gran utilidad de esta disciplina como herramienta para el análisis de sistemas complejos como el abordado, y la versatilidad y fortaleza del programa computacional de simulación para reflejar el comportamiento del sistema a través del tiempo.

Gracias a este modelo hemos podido representar la situación actual de la industria del biodiesel de algas en Argentina y analizar su comportamiento de aquí a 5 años, y considerando que ese horizonte fue puesto por nosotros para limitar el intervalo de estudio, el software puede ir aún más lejos en el tiempo. Asimismo hemos podido comprobar el impacto a futuro que conllevaría tomar determinadas decisiones relacionadas con el negocio, sin comprometer ni un centavo de capital real. Si bien recordamos que esta no es una herramienta para predecir el futuro a la perfección, podemos estar seguros que, si se tienen en cuenta los aspectos relacionados a la tecnología para una mejor estructura de costos, y el aprovechamiento en su totalidad de la materia orgánica residual, la industria del biodiesel de algas espera un crecimiento rotundo en los años por venir.

Confiamos en la solidez de este modelo y esperamos que sea una importante adición al Proyecto de Investigación y Desarrollo “Mercado energético argentino” llevado a cabo en el Instituto Tecnológico de UADE, donde podrá observarse cuán importante será para el futuro de nuestra nación el desarrollo de esta y otras fuentes renovables de energía.

## 7. Glosario de variables

1. Aceite producido: cantidad de aceite de alga extraído por período, en litros.
2. Algas en cultivo: cantidad de microalgas que en el período están siendo cultivadas en los invernaderos, en toneladas.
3. Biodiesel acumulado: Diferencia entre el biodiesel que es producido y el biodiesel vendido, en toneladas.
4. Biodiesel producido: cantidad de biodiesel que se obtiene del proceso productivo en el período, en toneladas.
5. Biodiesel vendido: cantidad de biodiesel comercializada, en toneladas.
6. Biomasa obtenida: material que se obtiene de la cosecha de las algas previo a su extracción de aceite, en toneladas.
7. Bonos de carbono: ganancias que obtiene la industria por la captura de dióxido de carbono emanado al medio ambiente por otras industrias, en pesos.
8. Cantidad de catalizador utilizado: toneladas de metilato de sodio necesarias para la transesterificación del total de aceite obtenido en el período.
9. *Chlorella vulgaris*: una de las especies de alga analizadas en este modelo. El usuario puede manipular esta variable como un interruptor. En caso de ser la única activa, el modelo funcionará en función de esta especie.
10. Concentración de lípidos por especie de alga: porcentaje del peso seco de la composición química de la especie de alga que corresponde a lípidos, los cuales componen el aceite que luego se convertirá en biodiesel.
11. Consumo efectivo: Suma del consumo actual y el incremento deseado en el consumo, en toneladas.
12. Consumo inicial: consumo básico del modelo, en toneladas. Sirve como punto de partida de la simulación.
13. Cosechas por periodo: cantidad de veces en el período que puede cosecharse el cultivo de algas para obtener biomasa.
14. Costo de instalaciones destinadas al cultivo: dinero necesario para el normal funcionamiento de los invernaderos por período, en pesos.

15. Costo de mano de obra: dinero necesario por período para pagar los sueldos de los trabajadores de la industria, en pesos.
16. Costo de nuevas instalaciones: dinero necesario para la construcción de un nuevo invernadero, en pesos.
17. Costo del catalizador: dinero necesario para solventar el metilato de sodio utilizado por período en la producción del biodiesel, en pesos.
18. Costo del método de extracción de aceite: dinero necesario para el normal funcionamiento de la tecnología utilizada para la extracción del aceite del alga, en pesos.
19. Costo del proceso de biodiesel: suma del costo del método de extracción de aceite y costo del catalizador, en pesos.
20. Costos productivos: costos totales, suma de todos los costos del período, en pesos
21. Densidad por especie de alga: espacio que ocupa el alga en la pileta de cultivo, en toneladas por metro cuadrado.
22. Dimensiones de construcción: metros cuadrados que ocupa cada invernadero.
23. ***Dunaliella salina***: una de las especies de alga analizadas en este modelo. El usuario puede manipular esta variable como un interruptor. En caso de ser la única activa, el modelo funcionara en función de esta especie.
24. Eficiencia de la extracción de aceite: porcentaje de aceite que es extraído con éxito de la biomasa de algas. Depende del método elegido.
25. Eficiencia del catalizador: porcentaje de biodiesel obtenido luego de la mezcla del aceite con el catalizador.
26. Especie de alga: variable que informa al resto del modelo qué estirpe de alga se está evaluando. Depende de la elección de una de las tres variantes de alga programadas.
27. Exportaciones de biodiesel: ingresos por el biodiesel vendido a personas o empresas extranjeras por período, en pesos.
28. Extracción supercrítica: uno de los métodos de extracción de aceite analizados en este modelo. El usuario puede manipular esta variable como un interruptor. En caso de ser la única activa, el modelo funcionará en función de este método de obtención de aceite.

- 
29. FINAL TIME: Esta variable indica el tiempo en que el modelo deja de correr.
  30. Ganancia neta: capital de la industria resultado de la resta de las utilidades del periodo menos las inversiones en invernaderos, en pesos.
  31. Incremento deseado en el consumo: toneladas de biodiesel que se espera se incorporen al consumo actual.
  32. INITIAL TIME: el tiempo en que el modelo iniciará la corrida.
  33. Instalaciones a construir: cantidad de invernaderos que se van a construir.  
Dependiendo del usuario esta variable puede ordenar al modelo que invierta en una cantidad fija de invernaderos o una cantidad ajustable al comportamiento de la simulación.
  34. Instalaciones deseadas: cantidad fija de invernaderos que se construyen. Esta variable es directamente controlada por el usuario y de gran utilidad para el análisis del modelo.
  35. Instalaciones destinadas a cultivo: metros cuadrados de invernaderos construidos y disponibles para el cultivo. Esta variable parte de la cantidad actual de invernaderos y va acumulando más metros cuadrados a medida que el modelo aplique reinversión. Es una de las variables de apalancamiento del modelo.
  36. Instalaciones requeridas: cantidad de invernaderos calculada en función de la diferencia entre el consumo efectivo y el biodiesel acumulado. Cuanto menor sea esa diferencia menos instalaciones ordenará al modelo construir.
  37. Materia orgánica: toneladas de material remanente de la extracción del aceite, rico en proteínas. Se comercializa a otras industrias, que lo utilizan como materia prima.
  38. Método de extracción del aceite: variable que informa al resto del modelo qué tecnología de obtención de aceite de alga se evaluará. Depende de la elección de una de las tres variantes de método programadas.
  39. Nivel de exportación: porcentaje del biodiesel que es vendido fuera del país.
  40. Nuevas instalaciones de cultivo: cantidad de metros cuadrados que se incorporan por período a la capacidad instalada.
  41. Precio de exportación del biodiesel: pesos por tonelada que el mercado externo debe abonar para la compra del biodiesel de algas.
-

- 
42. Precio de venta de materia orgánica: pesos por tonelada que el mercado debe abonar para la compra de la materia orgánica.
  43. Precio del catalizador: pesos por tonelada que la industria debe utilizar para adquirir el catalizador.
  44. Precio local del biodiesel: pesos por tonelada que el mercado interno debe abonar para la compra del biodiesel de algas.
  45. Prensa: uno de los métodos de extracción de aceite analizados en este modelo. El usuario puede manipular esta variable como un interruptor. En caso de ser la única activa, el modelo funcionará en función de este método de obtención de aceite.
  46. Reinversión en instalaciones de cultivo: dinero en pesos que se utiliza en cada período para construir más invernaderos.
  47. Relación de materia orgánica: porcentaje del peso seco de la composición química de la especie de alga que corresponde a proteínas, las cuales conforman la materia orgánica que se comercializa.
  48. Retenciones: porcentaje de las ventas que representa la carga impositiva a la exportación del biodiesel.
  49. Retraso: cantidad de periodos que el usuario puede ajustar para que se sume el incremento deseado en el consumo al consumo inicial.
  50. Ritmo de inversión: Función que determina el intervalo de tiempo en que el modelo aplicará una inversión en instalaciones.
  51. Solvente de hexano: uno de los métodos de extracción de aceite analizados en este modelo. El usuario puede manipular esta variable como un interruptor. En caso de ser la única activa, el modelo funcionará en función de este método de obtención de aceite.
  52. *Spirulina*: una de las especies de alga analizadas en este modelo. El usuario puede manipular esta variable como un interruptor. En caso de ser la única activa, el modelo funcionará en función de esta especie.
  53. Switch instalaciones: variable que permite al usuario elegir si la variable “Instalaciones a construir” será influenciada por “Instalaciones requeridas” o por “Instalaciones deseadas”. Es de utilidad para el análisis de la simulación.
-



54. Switch materia orgánica: variable que permite al usuario eliminar de los cálculos de la simulación la comercialización de la materia orgánica de algas. Es de utilidad para el análisis de la simulación.
55. Tiempo de construcción de nuevas instalaciones: períodos que demora la cantidad de invernaderos que se decidió construir en estar finalizadas e incorporarse a la capacidad productiva actual.
56. Tiempo de crecimiento del alga: períodos que tarda el alga en estar lista para ser cosechada. Depende de la especie de alga que se esté evaluando.
57. TIME STEP: Variable que representa el paso de avance de la corrida del modelo.
58. Utilidades: resultado económico del período en pesos, calculado de la diferencia entre los ingresos por ventas y los costos productivos. Se suman los bonos de carbono.
59. Venta interna de biodiesel: dinero obtenido por el biodiesel que se comercializa a nivel local por período, en pesos.
60. Ventas de biodiesel: suma de las ventas locales y exportaciones de biodiesel, en pesos.
61. Ventas de materia orgánica: dinero obtenido por período resultado de la comercialización de la materia orgánica, en pesos.
62. Ventas totales: suma de las ventas de biodiesel y las ventas de materia orgánica, en pesos.

## 8. Bibliografía

- Aracil, J. y Gordillo, F. (2006). *Dinámica de sistemas*. (2ra. Ed.). España: Alianza Editorial S.A., 1997.
- Barraza, C., Collao, V., Espinoza, C., Moya, F., Thun, G., y Torres, M. (2009). *Producción de biodiesel a partir de microalgas*. Trabajo de investigación. Chile, Escuela de Ingeniería Bioquímica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Becker, E.W. (1994). *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Baddiley, J. et al., 178 Estados Unidos: Cambridge Univ. Press, Cambridge, Nueva York.
- Biodiesel B100 Material Safety Data Sheet. Disponible en <[http://www.biodiesel.org/docs/ffs-performace\\_usage/sample-msds.pdf?sfvrsn=4](http://www.biodiesel.org/docs/ffs-performace_usage/sample-msds.pdf?sfvrsn=4)>
- Canavate Hors, J. P. “Una visión integrada sobre el cultivo de microalgas para la producción de biocombustibles”. En: Mispeces.com [En línea]. España: InterAqua CB (2009, 12 de enero). Recuperado el 3 de agosto de 2012, de <<http://www.mispeces.com/reportajes/2009/ene/microalgas/misPeces-vision-integral-microalgas.pdf>>
- Chisti, Y. (2007). «Biodiesel from microalgae». En: *Biotechnology Advances*. 25:294-306.
- Chisti, Y. (2008). «Biodiesel from microalgae beats bioethanol». En: *Trends Biotechnol.* 26:126-131.
- Cúneo, C. “Machín vende Biocombustibles del Chubut a un fabricante de aviones”. En: El Patagónico [En línea]. (2011, 10 de Febrero). [Consultado el 24 de Septiembre de 2012]. Disponible en <<http://www.elpatagonico.net/nota/90502/>>
- Falquet, J. (2004). «The nutritional aspects of Spirulina». En: *Antenna Technologies* [En línea]. [Consultado el 20 de Noviembre de 2012]. Disponible en <[http://antenna.ch/en/documents/AspectNut\\_UK.pdf](http://antenna.ch/en/documents/AspectNut_UK.pdf)>

---

Garibay Hernández, A., Vázquez-Duhalt, R., Sanchez Saavedra, M. del P., Serrano

Carreón, L., y Martínez Jiménez, A. (2009). *Biodiesel a partir de microalgas*. México: Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado el 2 de Julio de 2012, de  
<[http://www.smbb.com.mx/revista/Revista\\_2009\\_3/Biodiesel.pdf](http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2009_3/Biodiesel.pdf)>

Guajardo, C. Invertirán US\$ 60 millones para producir biodiesel con algas. En: Clarín [En línea]. (2007, 7 de Julio). [Consultado el 24 de Septiembre de 2012].  
Disponible en <<http://edant.clarin.com/diario/2007/07/07/elpais/p-02801.htm>>

Huntley, M. E., y Redalje, D. G. «CO<sub>2</sub> mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal». En: *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. (2007). [Consultado el 12 de Agosto de 2012]. Disponible en <<http://www.drfriendly.tv/PDFs/Huntley%2BRedalje200611.pdf>>

Miyamoto, K. «Renewable biological systems for alternative sustainable energy production». En: *FAO Agricultural Services Bulletin 128*. Japón: Agricultural and Consumer Protection [En línea]. (1997). [Consultado el 30 de Agosto de 2012]. Disponible en  
<<http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm>>

Mansson, S. (2012). «Cultivation of *Chlorella vulgaris* in nutrient solution from greenhouse tomato production». En: *Swedish University of Agricultural Sciences*. [Consultado el 30 de Agosto de 2012]. Disponible en <[http://stud.epsilon.slu.se/4631/1/mansson\\_s\\_120808.pdf](http://stud.epsilon.slu.se/4631/1/mansson_s_120808.pdf)>

Navarro, A. A., y Loberza, F. V. “Alimentos y Energía: Entrevista a Jorge de OilFox”. En: *Zean*. [En línea]. (2011, 6 de Enero). [Consultado el 24 de Septiembre de 2012]. Disponible en <<http://www.zean.com.ar/?p=700>>

Ponce, G. “Producirán a gran escala algas para biodiesel y cremas antiage”. En: *Diario Uno* [En línea]. (2012, 6 de agosto). [Consultado el 24 de Septiembre de 2012].

Disponible en <<http://www.diariouno.com.ar/edimpresa/2012/08/06/nota306611.html>>

Schenk, P. M., Thomas-Hall, S. R., Stephens, E., Marx, U. C., Mussgnug, J. H., Posten, C., Kruse, O., y Hankamer, B. (2008). «Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production». En: *Bioenergy. Res. 1*:20–43. [Consultado el 30 de Agosto de 2012]. Disponible en <<ftp://bseerv214.bse.vt.edu/Nate/Algae/Sources/ATS%20%28Zak%20J%29/Second%20Generati%20Biofuels%20High-Efficiency%20Microalgae%20for%20Biodiesel%20Production.pdf>>

Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., y Roessler, P. (1998). «A look back to the US Department of Energy’s Aquatic Species Program – biodiesel from algae». National Renewable Energy Laboratory, GoldenCO; Report NREL/TP-580-24190. Disponible en <<http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf>>

Shreckengost, R. C. «Dynamic simulation models: How valid are they? » En: *Self-report Methods of Estimating Drug Use: Meeting Current Challenges to Validity*. (1985). Disponible en <[http://www.ing.unrc.edu.ar/raei/archivos/img/arc\\_2011-11-23\\_21\\_00\\_45-54.pdf](http://www.ing.unrc.edu.ar/raei/archivos/img/arc_2011-11-23_21_00_45-54.pdf)>

Spoehr, H. A., y Milner, H. W. (1948). «The chemical composition of Chlorella; effects of environmental conditions » En: *Plant physiology*. [Consultado el 20 de Noviembre de 2012] Disponible en <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC437916/>>

“Una denuncia por aportes no reintegrables en Comodoro golpea al gabinete de Das Neves”. En: OPI Santa Cruz [En línea] (2009, 9 de Diciembre). [Consultado el 24 de Octubre de 2012]. Disponible en <<http://opisantacruz.com.ar/home/2009/12/09/una-denuncia-por-aportes-no-reintegrables-en-comodoro-golpea-al-gabinete-de-das-neves/8041>>

Referencias en internet:

<http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3033>

<http://microalgas-biodiesel.blogspot.com.ar/>

<http://www.oilfox.com.ar/>

<http://www.vensim.com/>

---

**Anexo A – Fórmulas versión 5.0**

(01) Aceite producido=Biomasa obtenida\*Concentración de lípidos por especie de alga\*Eficiencia de la extracción de aceite

Units: Tn

0,92 = densidad del aceite en kg/L

(02) Algas en cultivo=DELAY FIXED( Instalaciones destinadas a cultivo\*Densidad por especie de alga), Tiempo de crecimiento del alga, 2.8)

Units: Tn

(03) Biodiesel acumulado= INTEG (Biodiesel producido-Biodiesel vendido,8.22037)

Units: Tn

(04) Biodiesel producido= Aceite producido\*Eficiencia del catalizador

Units: Tn

(05) Biodiesel vendido=IF THEN ELSE(Consumo efectivo<=Biodiesel acumulado, Consumo efectivo, Biodiesel acumulado)

Units: Tn

(06) Biomasa obtenida=Algas en cultivo\*Cosechas por periodo

Units: Tn

(07) Bonos de carbono=Biomasa obtenida\*17\*4.7

Units: \$

(08) Cantidad de catalizador utilizado=Aceite producido\*14.94

Units: \*\*undefined\*\*

Metilato de Sodio

- (09)  $Chlorella\ vulgaris=0$   
Units: **\*\*undefined\*\*** [0,1,1]
- (10) Concentración de lípidos por especie de alga= $IF\ THEN\ ELSE(Especie\ de\ alga=1,$   
 $0.11,$   $IF\ THEN\ ELSE(Especie\ de\ alga=2,$   $0.3,$   $IF\ THEN\ ELSE(Especie\ de\ alga=3,$   $0.5,$   $0)))$   
Units: **\*\*undefined\*\***
- (11) Consumo efectivo= $IF\ THEN\ ELSE(Switch\ instalaciones=0,$  Consumo  
inicial+ $STEP(Incremento\ deseado\ en\ el\ consumo,$  Retraso), 1000)  
Units: Tn
- (12) Consumo inicial=50  
Units: Tn
- (13) Cosechas por periodo=30  
Units: **\*\*undefined\*\*** [1,30,1]
- (14) Costo de instalaciones destinadas al cultivo= $Instalaciones\ destinadas\ a\ cultivo*0$   
Units: \$
- (15) Costo de mano de obra=0  
Units: \$
- (16) Costo de nuevas instalaciones= $30000*4.7$   
Units: \$  
Dimensiones del invernadero:  $10m * 100m = 1000m^2$
- (17) Costo del catalizador= $Precio\ del\ catalizador*Cantidad\ de\ catalizador\ utilizado$   
Units: **\*\*undefined\*\***
-

---

(18) Costo del método de extracción de aceite= IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=1, 1, IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=2, 1.23, IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=3, 1.5, 1)))

Units: \*\*undefined\*\*

(19) Costo del proceso de biodiesel=Costo del catalizador\*0+Costo del método de extracción de aceite

Units: \$

(20) Costos productivos=Costo del proceso de biodiesel\*200\*4.7\*Aceite producido+Costo de instalaciones destinadas al cultivo+Costo de mano de obra

Units: \$

(21) Densidad por especie de alga=IF THEN ELSE(Especie de alga=1, 0.28/1000 , IF THEN ELSE(Especie de alga=2, 0.28/1000, IF THEN ELSE(Especie de alga=3, 0.28/1000, 0)))

Units: Tn/m<sup>2</sup>

(22) Dimensiones de construcción=1000

Units: m<sup>2</sup>

(23) Dunaliella salina=0

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(24) Eficiencia de la extracción de aceite=IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=1, 0.75, IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=2, 0.9, IF THEN ELSE( Método de extracción del aceite=3, 1, 0)))

Units: \*\*undefined\*\*

(25) Eficiencia del catalizador=0.9885

Units: \*\*undefined\*\*



(26) Especie de alga=IF THEN ELSE((Spirulina=1:AND:Chlorella vulgaris=1):OR:(Spirulina=1:AND:Dunaliella salina=1):OR:(Chlorella vulgaris=1:AND:Dunaliella salina=1), 0,IF THEN ELSE(Spirulina =1, 1, IF THEN ELSE(Chlorella vulgaris=1, 2, IF THEN ELSE( Dunaliella salina =1, 3, 0))))  
 Units: \*\*undefined\*\*

(27) Exportaciones de biodiesel= Biodiesel vendido\*Precio de exportación del biodiesel\*Nivel de exportación\*(1-Retenciones)

Units: \$

(28) Extracción supercrítica=0

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(29) FINAL TIME = 60

Units: Month

The final time for the simulation.

(30) Ganancia neta= INTEG (Utilidades-Reinversión en instalaciones de cultivo,0)

Units: \$

(31) Incremento deseado en el consumo=0

Units: Tn [0,100,1]

(32) INITIAL TIME = 0

Units: Month

The initial time for the simulation.

(33) Instalaciones a construir=IF THEN ELSE(Switch instalaciones=0, Instalaciones requeridas, Instalaciones deseadas)

Units: \*\*undefined\*\*

- (34) Instalaciones deseadas=1  
 Units: \*\*undefined\*\* [1,20,1]
- (35) Instalaciones destinadas a cultivo= INTEG (Nuevas instalaciones de cultivo,10000)  
 Units: m2
- (36) Instalaciones requeridas = WITH LOOKUP (Consumo efectivo-Biodiesel acumulado,([(0,0)-(100,10)],(0,0),(0.99,0),(1,1),(19.99,1),(20,2),(39.99,2),(40,3),(59.99,3),(60,4),(79.99,4),(80,5),(100,5) ))  
 Units: \*\*undefined\*\*
- (37) Materia orgánica=IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=0, 0, IF THEN ELSE(Método de extracción del aceite=1, Biomasa obtenida\*Relación de materia orgánica\*0.9726, Biomasa obtenida\*Relación de materia orgánica))  
 Units: Tn
- (38) Método de extracción del aceite=IF THEN ELSE((Prensa=1:AND:Extracción supercrítica=1):OR:(Prensa=1:AND:Solvente de hexano=1):OR:(Solvente de hexano=1:AND:Extracción supercrítica=1), 0,IF THEN ELSE(Prensa=1, 1, IF THEN ELSE(Solvente de hexano=1, 2, IF THEN ELSE(Extracción supercrítica=1, 3, 0))))  
 Units: \*\*undefined\*\*
- (39) Nivel de exportación=0.71  
 Units: \*\*undefined\*\*
- (40) Nuevas instalaciones de cultivo=DELAY FIXED( Dimensiones de construcción\*Reinversión en instalaciones de cultivo/Costo de nuevas instalaciones, Tiempo de construcción de nuevas instalaciones, 0)  
 Units: m2
- (41) Precio de exportación del biodiesel= 1226\*4.7

Units: \*\*undefined\*\*

(42) Precio de venta de materia orgánica=3000\*4.7

Units: \$

(43) Precio del catalizador=1700\*4.7

Units: \$

(44) Precio local del biodiesel=4576.74

Units: \*\*undefined\*\*

(45) Prensa=0

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(46) Reinversión en instalaciones de cultivo=IF THEN ELSE((Costo de nuevas instalaciones\*Instalaciones a construir)>Ganancia neta, 0, Ritmo de inversión\*Costo de nuevas instalaciones\*Instalaciones a construir)

Units: \$

(47) Relación de materia orgánica=IF THEN ELSE(Especie de alga=1, 0.7, IF THEN ELSE(Especie de alga=2, 0.4, IF THEN ELSE(Especie de alga=3, 0.5, 0)))

Units: \*\*undefined\*\*

(48) Retenciones= 0.15

Units: \*\*undefined\*\*

(49) Retraso=1

Units: \*\*undefined\*\* [0,50,1]

(50) Ritmo de inversión=PULSE TRAIN(1, 1, Tiempo de construcción de nuevas instalaciones, 60)

---

Units: \*\*undefined\*\*

(51) SAVEPER = TIME STEP

Units: Month [0,?]

The frequency with which output is stored.

(52) Solvente de hexano=1

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(53) Spirulina=1

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(54) Switch instalaciones=0

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(55) Switch materia orgánica=1

Units: \*\*undefined\*\* [0,1,1]

(56) Tiempo de construcción de nuevas instalaciones=5

Units: Month [1,10,1]

(57) Tiempo de crecimiento del alga=IF THEN ELSE(Especie de alga=1, 0.1267, IF THEN ELSE(Especie de alga=2, 0.1267, IF THEN ELSE(Especie de alga=3, 0.1267,0)))

Units: Meses

(58) TIME STEP = 1

Units: Month [0,?]

The time step for the simulation.

(59) Utilidades=Ventas totales-Costos productivos+Bonos de carbono

Units: \$

(60)  $\text{Venta interna de biodiesel} = \text{Biodiesel vendido} * (1 - \text{Nivel de exportación}) * \text{Precio local del biodiesel}$

Units: \$

(61)  $\text{Ventas de biodiesel} = \text{Exportaciones de biodiesel} + \text{Venta interna de biodiesel}$

Units: \*\*undefined\*\*

(62)  $\text{Ventas de materia orgánica} = \text{IF THEN ELSE}(\text{Switch materia orgánica} = 1, \text{Precio de venta de materia orgánica} * \text{Materia orgánica}, 0)$

Units: \$

(63)  $\text{Ventas totales} = \text{Ventas de materia orgánica} + \text{Ventas de biodiesel}$

Units: \$