

# Diseño óptimo de cadenas de suministros considerando criterios ambientales

CAMPANELLA Sandra <sup>(1)</sup>, MONTAGNA Jorge <sup>(1)</sup>, CORSANO Gabriela <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Instituto de Desarrollo y Diseño INGAR Conicet-UTN.  
Avellaneda 3657, Santa Fe, Santa Fe  
campanellasr@gmail.com

**Resumen.** En el presente trabajo se propone un modelo multiobjetivo de programación mixta entera lineal para el diseño sustentable de la Cadena de Suministros (CS). Se desea determinar el diseño óptimo de la CS teniendo en cuenta las variables económicas y ambientales mediante la metodología "epsilon constraint". Para la formulación se considera una CS de 4 niveles: materia prima, plantas de producción, centros de distribución y consumidores. Para introducir la variable ambiental dentro del diseño se propone el uso de una metodología de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del tipo "checklist" o "lista de chequeo", como una primera aproximación al estudio del impacto ambiental. Se plantea el análisis ambiental de manera desagregada a lo largo de la CS. El modelo propuesto se aplica al diseño de una CS de producción de etanol a partir de caña de azúcar y miel obtenida a partir de ésta.

**Palabras claves:** optimización multiobjetivo, cadena de suministros, sustentabilidad.

## 1 Introducción

Desde los años 70 la variable ambiental ha cobrado un importante reconocimiento por parte de diferentes países, gobiernos y ciudadanos como factor determinante para el progreso y calidad de vida de la humanidad. Dentro de este contexto, y en función de lograr sostenibilidad entre las actividades humanas y el funcionamiento del medio natural y social, es necesario implementar criterios y condiciones que permitan promover un desarrollo sustentable.

Las exigencias del mercado y los gobiernos en la protección del ambiente se ven reflejadas por las industrias e instituciones en sus intenciones en mantener sus acciones dentro de una gestión ambiental [1]. En este contexto el diseño sustentable de la cadena de suministros juega un rol importante, campo que está adquiriendo creciente interés entre investigadores y profesionales dedicados al funcionamiento y gestión de la CS [2].

En este trabajo se presenta un modelo de programación mixta entera lineal (MILP) para el diseño óptimo y sustentable de una CS de cuatro niveles: materia prima, plantas de producción, centros de distribución y clientes. Las decisiones de diseño consideradas en el modelo incluyen localización, tecnología de producción y tipo de trans-

porte a utilizar entre los distintos nodos. El modelo permitirá determinar la demanda a abastecer de acuerdo al beneficio obtenido, los sitios y tipo de materia prima a utilizar, el tipo de tecnología para la producción, los centros de distribución a instalar, y el tipo y cantidad de transporte entre los diferentes nodos de la cadena. Se obtendrá el impacto ambiental de la configuración de la CS como así también el beneficio económico. Conformando, de esta manera, un modelo multiobjetivo que considera ambos criterios en la solución del problema considerado.

Para el análisis ambiental se propone hacer uso de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) dado que es una herramienta efectiva de planeamiento y gestión [3-9]. Ésta puede ser utilizada para identificar el tipo, la magnitud y los potenciales cambios en el medio como resultado de una actividad o política; de la misma manera sirve para transmitir información a los tomadores de decisiones [9].

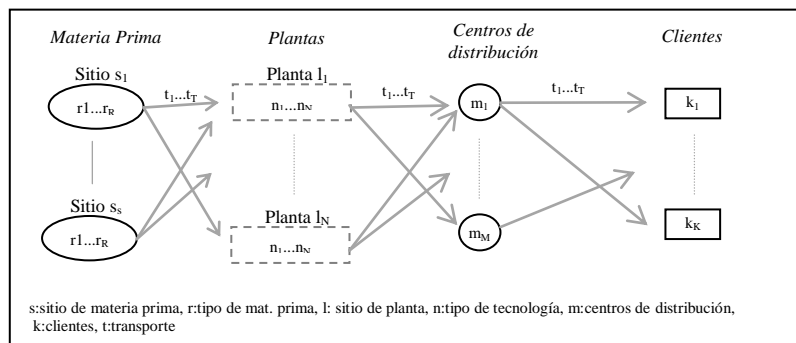
Dentro de las metodologías existentes para la EIA, en este trabajo, se adopta la del tipo "checklist" o "lista de chequeo", como una primera aproximación al estudio de impacto ambiental. Este tipo de metodología ha sido utilizada de manera extensiva en los primeros años de los estudios de EIA, y representan una aproximación válida para proveer sistematización a este tipo de estudios. Por otro lado, proveen una aproximación estructurada para identificar principales impactos, son flexibles dado que permiten modificaciones dentro de los ítems a considerar de acuerdo al tipo de proyecto a analizar, y sirven como base para metodologías de mayor complejidad [10].

El modelo se presenta como una formulación multiobjetivo que se resuelve mediante la metodología "epsilon-constraint". Se formula una serie de MILPs maximizando el beneficio económico para diferentes tolerancias de cada impacto ambiental considerado. De esta manera, se obtienen diferentes soluciones que representan posibles configuraciones económicas-ambientales de la CS en consideración.

El modelo se aplica a la producción de etanol a partir de caña de azúcar y miel dentro de Argentina. Los datos para el análisis y diseño fueron extraídos de Mele y col. [11].

## 2 Descripción del problema

En la Figura 1 se muestra un esquema de la CS en consideración. El objetivo de este trabajo es determinar la configuración óptima para la CS de acuerdo a consideraciones ambientales y económicas.



**Fig. 1.** Esquema de la cadena de suministros.

Conociendo:

- la materia prima disponible en cada uno de los sitios considerados
- los factores de conversión de materia prima a producto
- la producción máxima posible de cada tecnología
- los posibles centros de distribución y su capacidad máxima
- tipo y capacidad de transporte para las materias primas y los productos
- las distancias entre los diferentes nodos de la CS
- precio de venta del producto
- costos de instalación, producción, mantenimiento y transporte
- demanda máxima y mínima a abastecer

Se pretende determinar:

- tipo y cantidad de materia prima proveniente de cada sitio posible
- cantidad de plantas a instalar y capacidad de producción de cada una de ellas
- la cantidad de centros de distribución a utilizar
- la cantidad de productos enviados a cada cliente
- el número y tipo de vehículo utilizado entre cada uno de los nodos

Con el objetivo de: maximizar el beneficio (ventas menos costos) considerando el impacto ambiental causado por la obtención de materia prima, instalación de las plantas y transporte.

Para cada una de las posibles opciones de materia prima, transporte y plantas de producción se analiza el impacto ambiental, valores que luego son utilizados dentro del modelo matemático. Como propuesta de un nuevo enfoque en esta temática, los impactos son analizados para cada uno de los diferentes niveles de la cadena. Esto se propone debido a que la percepción de las modificaciones del ambiente se genera en la zona dónde se lleva a cabo la operación y no al final de la cadena como una suma de consecuencias.

## 2.1 "Lista de chequeo" como herramienta de EIA

Para el análisis de los aspectos ambientales en este trabajo se utiliza la metodología "checklist" o "lista de chequeo". Estas consisten en una lista de factores ambientales potencialmente afectados por las acciones del proyecto; es un método cualitativo, o semicuantitativo dependiendo del caso. Este tipo de metodologías son aplicadas alrededor del mundo [12], y tienen la ventaja de ser económicas y fáciles de usar, además de ser una fuente rápida de información [9]. Son un método de identificación muy simple, por lo que se usa para evaluaciones preliminares y como una primera aproximación a un estudio de impacto ambiental. Primordialmente son útiles para llamar la atención sobre los impactos más importantes que se puedan tener en la realización del proyecto [10]. Tienen una gran adaptabilidad al proyecto en cuestión, ya que pueden ser modificadas fácilmente (agregando o quitando elementos) para hacerlas más apropiadas a un caso en particular.

Para determinar la intensidad de los impactos ambientales debido a la operación del proyecto propuesto se utilizará como guía el método de Adkins y Burke [13]. Esta metodología propone una escala que va desde -5 (impacto negativo de mayor impor-

tancia) y +5 (impacto positivo de mayor importancia) donde cada valor, otorgado por el evaluador o el grupo de evaluadores, representa lo siguiente: 1=muy bajo, 2=bajo, 3=moderado, 4=alto, 5=muy alto, 0=neutro. Para generar la lista se tienen en cuenta tres tipos de componentes ambientales: físicos, biológicos y socioeconómicos. Dentro de ésta se califican los impactos con la escala mencionada anteriormente, siendo luego promediados para obtener un valor del impacto ambiental.

En este trabajo se plantearán 3 tipos diferentes de listas de chequeo, una para la zona de elaboración de materia prima, otra para los medios de transporte y la última para las plantas de producción. En la tabla 1 se presenta, a modo de ejemplo, la lista propuesta para el análisis de dos sitios de materia prima.

**Tabla 1.** Lista de chequeo para zonas de materia prima.

		<i>Sitio 1</i>	<i>Sitio 2</i>
<i>Medio físico</i>	Rec. Hídrico Superficial	-4,3	-4,0
	Rec. Hídrico Subterráneo	-2,0	-2,0
	Calidad del Suelo	-3,5	-3,5
	Calidad del Aire	-3,5	-3,5
	Paisaje	-4,0	-3,5
<i>Medio biológico</i>	Flora	-4,0	-3,0
	Fauna	-4,0	-2,5
<i>Medio socioeconómico</i>	Infraestructura y Servicios	1,0	1,5
	Transporte y comunicaciones	0,5	1,0
	Economía local	1,0	1,5
	Turismo	-1,5	0,0
	<b>IMPACTO</b>	<b>-2,2</b>	<b>-1,8</b>

El impacto ambiental del Sitio 1 es mayor al del Sitio 2, dado que cada uno representa características del medio diferentes. El primero fue realizado para una zona que contiene zonas de montes, con recursos hídricos superficiales importantes y suelo fértil; en cambio el sitio 2 representa una zona apta y destinada para cultivo.

### 3 Modelo matemático

Considerando un sólo producto en el modelo y siendo  $s_1...s_S$  los sitios de materia prima,  $r_1...r_R$  los tipos de materia prima,  $l_1...l_L$  las plantas de producción,  $n_1...n_N$  las posibles tecnologías de producción,  $m_1...m_M$  los centros de distribución,  $t_1...t_T$  los distintos medios de transporte y  $k_1...k_K$  los clientes, a continuación se presentan las ecuaciones que lo gobiernan.

#### 3.1 Balances entre los sitios de materia prima y plantas de producción

La materia prima disponible en los sitios  $s$  como fuente de abastecimiento para la producción está limitada por una cantidad máxima:

$$\sum_{l,t} QS_{s,l,t,r} \leq C_{s,r}^{\max} \quad \forall s,r \quad (1)$$

Donde  $C_{s,r}^{\max}$  es un parámetro que representa la capacidad máxima de producción de materia prima r en la zona s y  $QS_{s,l,t,r}$  es una variable continua que indica la cantidad de materia prima r proveniente del sitio s hacia la planta l usando el transporte t.

La cantidad necesaria de materia prima en cada planta depende de la tecnología que se utilice para la producción:

$$\sum_{s,t} QS_{s,l,t,r} = \sum_n P_{l,n} \cdot f_{r,n} \quad \forall r,l \quad (2)$$

donde  $P_{l,n}$  es una variable que indica la producción en la planta l con la tecnología n y  $f_{r,n}$  es un factor de conversión de materia prima r en producto con la tecnología n.

Para cada tecnología disponible existe un límite mínimo y máximo de producción que se encuentra relacionado con factores operativos y constructivos:

$$x_{l,n} \cdot P_{l,n}^{\min} \leq P_{l,n} \leq x_{l,n} \cdot P_{l,n}^{\max} \quad \forall l,n \quad (3)$$

donde  $x_{l,n}$  es una variable binaria que vale 1 si la planta se instala con la tecnología n y  $P_{l,n}^{\min}$ ,  $P_{l,n}^{\max}$  son parámetros que indican la producción mínima y máxima en cada planta respectivamente.

No es posible utilizar más de una tecnología en cada planta:

$$\sum_n x_{l,n} \leq 1 \quad \forall l \quad (4)$$

### 3.2 Balances entre plantas y centros de distribución

Se asume un estado estacionario, por lo tanto no existen acumulaciones y, para cada centro de distribución, la cantidad total de producto que sale de las plantas tiene que ser igual a la cantidad que se envía a todos los clientes:

$$\sum_{l,t} QL_{l,m,t} = \sum_{k,t} QM_{m,k,t} \quad \forall m \quad (5)$$

donde  $QL_{l,m,t}$  y  $QM_{m,k,t}$  son variables continuas que indican la cantidad de producto trasladado usando t desde la planta l al centro m y desde éste al cliente k respectivamente.

En caso de instalar un centro de distribución, los productos que llegan a este no pueden superar su capacidad máxima de almacenamiento y manipulación:

$$\sum_{l,t} QL_{l,m,t} \leq CD_m^{\max} \cdot y_m \quad \forall m \quad (6)$$

donde  $y_m$  es una variable binaria que vale 1 si el centro de distribución  $m$  se establece y  $CD_m^{\max}$  es un parámetro que indica la capacidad máxima del centro de distribución  $m$ .

### 3.3 Balances entre centros de distribución y clientes

La demanda de cada cliente debe ser abastecida dentro de un rango preestablecido:

$$Demanda_k^{\min} \leq \sum_{m,t} QM_{m,k,t} \leq Demanda_k^{\max} \quad \forall k \quad (7)$$

Donde  $Demanda_k^{\max}$  y  $Demanda_k^{\min}$  son parámetros que determinan la demanda máxima y mínima de cada cliente  $k$  respectivamente.

### 3.4 Cálculos relacionados con el transporte

Cada unidad de transporte tiene características diferentes de acuerdo al tipo de material que transportan, el rendimiento, entre otros. Para determinar el número de viajes con cada tipo de transporte entre cada uno de los nodos, se establecen las siguientes ecuaciones:

$$NVS_{s,l,t,r} \geq QS_{s,l,t,r} / CapTMP_{t,r} \quad \forall s,l,t,r \quad (8)$$

$$NVL_{l,m,t} \geq QL_{l,m,t} / CapTP_t \quad \forall l,m,t \quad (9)$$

$$NVM_{m,k,t} \geq QM_{m,k,t} / CapTP_t \quad \forall m,k,t \quad (10)$$

donde  $CapTMP_{t,r}$  y  $CapTP_t$  son parámetros que indican la capacidad máxima de cada tipo de transporte  $t$  para materias primas y producto respectivamente, y  $NVS_{s,l,t,r}$ ,  $NVL_{l,m,t}$ ,  $NVM_{m,k,t}$  son variables enteras que se expresan a través de variables binarias, y que indican el número de viajes para cada uno de los transportes entre los respectivos nodos. Éstas pueden expresarse como:

$$NVS_{s,l,t,r} = \sum_{p=1}^{NVS^{UP}} p z_{s,l,t,r,p} \quad (11)$$

$$\sum_{p=1}^{NVS^{UP}} p z_{s,l,t,r,p} = 1 \quad (12)$$

Donde  $z_{s,l,t,r,p}$  es una variable binaria igual a 1 si  $p$  vehículos son utilizados.

### 3.5 Costos

Los costos relacionados con el diseño de la CS se dividen en tres grupos: costos de operación (CO) que implican los costos de materia prima, de mantenimiento de los centros de distribución y los costos por unidad producida dentro de la planta; costos de instalación (CI) que implican los costos de instalación de la planta y de instalación de los centros de distribución; costos de transporte que abarca el costo de transportar las materias primas y productos entre los diferentes nodos.

Relacionados con estos costos, el beneficio obtenido (Benef) se define como:

$$Benef = Venta - (CO + CT + CI) \quad (13)$$

donde

$$Venta = precio \times \sum_{m,k,t} QM_{m,k,t} \quad (14)$$

Con el *precio* = igual al precio de venta por unidad.

### 3.6 Impacto ambiental

En esta etapa, cada lista de chequeo procesada para cada caso en particular proveerá una cuantificación de la magnitud posible del impacto en cada nivel de la CS analizada. Como se comentó anteriormente, los impactos se analizarán y se tomarán en el modelo de manera desagregada a lo largo de la cadena. En este caso se considerarán impactos por producción de materia prima, instalación de la planta y por transporte entre cada uno de los nodos.

El impacto de materia prima (IAST) se calcula como una relación entre la materia prima extraída de los sitios *s* y el impacto ambiental que implica obtenerla:

$$IAST = \sum_s \left( IS_s \times \frac{\sum_{r,t,l} QS_{s,l,t,r}}{\sum_r C_{s,r}^{\max}} \right) \quad (15)$$

donde  $IS_s$  es un parámetro que indica el impacto de producir la o las materias primas en el sitio *s* considerando las condiciones de cada sitio. Esto implica considerar el tipo o los tipos de materia prima que se produce/n en el mismo y el proceso que se lleva para obtenerla.

El impacto de planta (IAPT) se calcula como un promedio del impacto de instalar cada una de las plantas.

$$IAPT = \frac{\sum_{l,n} IP_{l,n} x_{l,n}}{\sum_{l,n} x_{l,n}} \quad (16)$$

donde  $IP_{l,n}$  es un parámetro que determina el impacto de producir en la planta *l* con la tecnología *n*.

El impacto del transporte se calcula como un promedio del impacto generado por los transportes desde el origen hacia el destino. De esta manera, el impacto del transporte de materia prima (IATT1), del transporte de productos a centro de distribución (IATT2) y a los clientes (IATT3), se calculan mediante:

$$IATT1 = \frac{\sum_{s,d,t} \left( ITrans_{s,d,t} \times \sum_r NVS_{l,s,t,r} \right)}{\sum_{l,s,t,r} NVS_{l,s,t,r}} \quad (17)$$

$$IATT2 = \frac{\sum_{l,m,t} \left( ITransL_{l,m,t} \times \sum_i NVL_{m,l,t} \right)}{\sum_{m,l,t,i} NVL_{m,l,t}} \quad (18)$$

$$IATT3 = \frac{\sum_{m,k,t} \left( ITransM_{m,k,t} \times \sum_i NVM_{m,k,t} \right)}{\sum_{m,k,t,i} NVM_{m,k,t}} \quad (19)$$

donde  $ITransS_{s,l,t}$ ,  $ITransL_{l,m,t}$  y  $ITransM_{m,k,t}$  son parámetros que indican el impacto de transportar materia prima o productos entre los respectivos nodos.

### 3.7 Función objetivo

La función objetivo es del tipo multiobjetivo siendo expresada de la siguiente manera:

$$\min_{x,y} \{-Benef(x,y), IAST(x,y), IAPT(x,y), IATT1(x,y), IATT2(x,y), IATT3(x,y)\} \\ \text{sujeto a: ec. (1)-(19)} \quad (20) \\ x \in \mathfrak{R}, y \in (0,1)$$

Se propone resolver el modelo mediante la metodología "epsilon-constraint" tomando como restricciones los valores de impacto ambiental. El problema general a resolver será el siguiente:

$$\max_{x,y} Benef(x,y) \\ \text{sujeto a: ec. (1)-(17)} \quad (21) \\ x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\}$$

A partir de (21) se resolverán una serie de sucesivos subproblemas contemplando en ellos restricciones para cada uno de los impactos ambientales considerados. A modo de ejemplo se presenta uno de los subproblemas:

$$\max_{x,y} Benef(x,y) \\ \text{sujeto a: ec. (1)-(19)} \quad (22) \\ \varepsilon 1_{\min} \leq IAST \leq \varepsilon 1_{\max} \\ x \in \mathfrak{R}, y \in \{0,1\}$$

El valor de  $\varepsilon 1_{\min}$  se obtiene minimizando el impacto IAST (Ec. 15) sujeto a las restricciones (1)-(14), (16)-(19), y el  $\varepsilon 1_{\max}$  se obtiene al resolver (21).



Esto se resuelve para cada uno de los impactos expresados en las ecuaciones (15)-(19) y obtener así los epsilon para cada uno de los impactos ( $\epsilon_{\max}^1, \epsilon_{\min}^1$  de IAST;  $\epsilon_{\max}^2, \epsilon_{\min}^2$  de IAPT;  $\epsilon_{\max}^3, \epsilon_{\min}^3$  de IATT1;  $\epsilon_{\max}^4, \epsilon_{\min}^4$  de IATT2;  $\epsilon_{\max}^5, \epsilon_{\min}^5$  de IATT3). Para resolver esto las ecuaciones (15)-(19) son linealizadas utilizando variables binarias, por ejemplo las ecuaciones (11) y (12) linealizan las ecuaciones (17)-(19).

## 4 Caso de estudio

El enfoque propuesto se aplica al caso de estudio presentado en Mele y colab. [11] sobre la producción de etanol en Argentina. Sobre esta base, se requiere obtener el diseño óptimo sustentable de la CS para la producción de etanol a partir de caña de azúcar y mieles. Las características del caso de estudio analizado son las siguientes:

- Los sitios de materia prima son tres ubicados en: Jujuy, Tucumán y Salta. De cada uno de ellos se pueden obtener 2 tipos de materia prima: caña de azúcar y/o miel. Cada zona tiene una capacidad máxima de producción de caña de azúcar y miel.
- Las plantas de producción de etanol pueden instalarse en 4 lugares distintos: Salta, Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos. Las tecnologías posibles para cada una de ellas son dos: una que utiliza como materia prima la caña de azúcar y otra que utiliza la miel.
- Existen 5 posibles lugares de instalación de los depósitos, con una capacidad máxima en cada uno de ellos.
- Hay 5 clientes ubicados en distintos lugares con una demanda máxima y mínima de etanol.
- Existen dos medios de transporte principales: camiones y trenes. De acuerdo al tipo de material a trasladar: caña de azúcar, miel o etanol, se presentan diferentes configuraciones y rendimientos de los mismos.

Para analizar cada uno de los impactos ambientales es necesario conocer el entorno dónde se propone que se llevará a cabo el proyecto en cuestión. Es por eso que para cada uno de los impactos a tener en cuenta en el modelo, se generaron escenarios que nos permitan obtener una descripción física del espacio afectado. Por ejemplo para los sitios de materia prima se propusieron, de manera general, las siguientes descripciones:

- Jujuy: suelo fértil. Existencia de montes en la gran mayoría del terreno.
- Tucumán: zona preparada y destinada para cultivos. Bajo valor paisajístico.
- Salta: zona de gran valor turístico. Existencia de pequeños montes aislados.

Para los demás impactos se utilizó el mismo procedimiento.

### 4.1 Resultados

El modelo propuesto y los subproblemas fueron implementados y resueltos en GAMS [14]. El modelo presentado en (21) consiste de 1.438 variables continuas, 20 variables

binarias, y 50 restricciones y fue resuelto en menos de 1 seg. de CPU. Una vez obtenidos los resultados del análisis de impacto ambiental mediante la metodología planteada en la sección 2.1, se procede a obtener los valores de  $\epsilon_{\min}$  y  $\epsilon_{\max}$ . Primero se resuelve (21) para obtener el diseño óptimo de la CS con máximo beneficio, obteniendo así los  $\epsilon_{\max}$  para cada uno de los impactos. Para obtener los  $\epsilon_{\min}$  de cada uno de ellos, se resuelven problemas dónde la función objetivo es la minimización de cada impacto.

De esta manera se obtiene un rango comprendido entre  $\epsilon_{\min}$  -  $\epsilon_{\max}$  para cada impacto. Con el objetivo de encontrar diseños sustentables para la CS, se resuelve en forma iterativa el problema (22) para cada uno de los impactos ambientales variando el valor de  $\epsilon_{\max}$  dentro de los valores del rango encontrado anteriormente. En la Fig. 2 y la Fig. 3 se presentan los puntos obtenidos para 6 valores diferentes de  $\epsilon_{\max}$ .

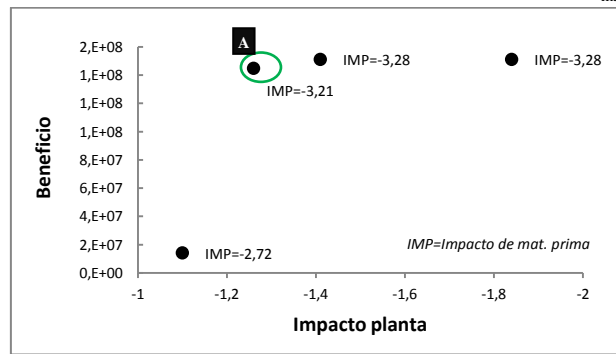


Fig. 2. Beneficio vs impacto de planta

De la evaluación de impacto ambiental, en base a la metodología propuesta, se observa que la magnitud del impacto ambiental del transporte en el caso de estudio es irrelevante. Al no ser influyente en la solución no se muestran los gráficos correspondientes. En la Fig. 2 se pueden observar las soluciones obtenidas al evaluar el beneficio versus el impacto de planta, y para cada punto solución se calculó el impacto de planta correspondiente; se obtienen sólo 4 puntos porque 2 de los puntos coinciden con estos. Mientras que en la Fig. 3 se muestra el beneficio contra el impacto de materia prima, obteniendo en cada punto el impacto de materia prima.

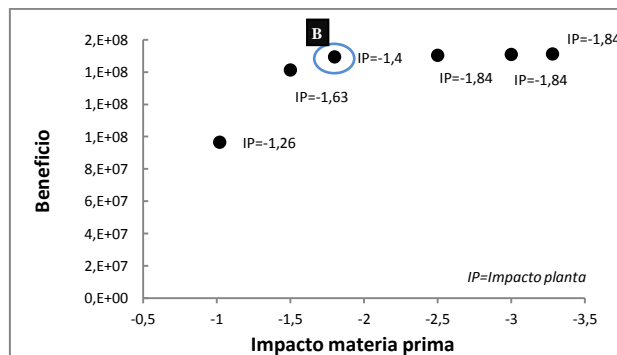




Fig. 3. Beneficio vs impacto materia prima

En la siguiente tabla se analizan algunos puntos solución obtenidos con el modelo:

**Tabla 2.** Resultados obtenidos del caso de estudio

Escenario	Beneficio (USD)	Impacto planta	Impacto mat. prima	Configuración CS
Max. beneficio	151.262.356	-1,84	-3,28	3 sitios de mat. prima, 3 plantas, 5 ctros de distribución Producción=demanda máxima
Min. imp. planta	14.284.485	-1,1	-2,72	2 sitios de mat. prima, 2 plantas, 4 ctros de distribución Producción= demanda mínima
Min. imp. mat. prima	96.605.520	-1,26	-1,02	2 sitios de mat. prima, 2 plantas, 3 ctros de distribución Producción=demanda mínima
 *	144.957.082	-1,26	-3,21	3 sitios de mat prima, 2 plantas, 4 ctros de distribución Producción=95% de demanda máx.
 **	149.433.136	-1,4	-1,8	2 sitios de mat. prima, 3 plantas, 5 ctros de distribución Producción=demanda máxima

\* Figura 2, \*\* Figura 3

En base a lo observado en los gráficos, y considerando cada una de las configuraciones de la CS en relación con el sitio de materia prima y el lugar de instalación de planta, se puede realizar un análisis de las potenciales configuraciones que optimice tanto la performance ambiental como la función económica. Se puede observar que el beneficio cambia notablemente al disminuir cada uno de los impactos considerados, y que genera cambios significativos en el diseño de la CS considerada.

Con este tipo de herramientas se puede obtener análisis íntegros que permiten incluir a los aspectos ambientales como variables de decisión, y así lograr una mayor sustentabilidad en las acciones que se lleven adelante.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un modelo para el diseño óptimo sustentable de una CS, donde se busca maximizar el beneficio económico minimizando los impactos ambientales. Se propone considerar los impactos ambientales de manera desagregada a lo largo de la cadena, integrando aspectos económicos, sociales, culturales y naturales del medio involucrado.

La herramienta utilizada para realizar la EIA se caracteriza por ser simple, económica y fácil de usar, que tiene en cuenta la perspectiva del diseñador. Permite generar posibles configuraciones de la CS que sirven como base para la toma de decisiones en relación al diseño de la misma.

Este trabajo representa un enfoque inicial para realizar este tipo de análisis dentro de la CS. Como una aproximación al estudio de impacto ambiental, constituye una herramienta útil para obtener diseños preliminares de CS sustentables.

## 6 Referencias

1. Zhu Q, Cote R.: Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group. *Journal of Cleaner Production* 12, 1025–1035 (2004).
2. Srivastava S.: Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews* 9,53-80 (2007).
3. Hollick M.: Environmental impact assessment in Australia: EIA and environmental management in Western Australia. *Environ. Impact Asses. Rev* 2, 116–9 (1981).
4. Ortolano L, Sheperd A.: Environmental impact assessment: challenges and opportunities. *Environ. Impact asses Rev* 13, 3–30 (1995).
5. Samarakoon M, Rowan JS.: A critical review of environmental impact statements in Sri Lanka with particular reference to ecological impact assessment. *Environ. Manage.* 41, 441–60 (2008).
6. Snell T, Cowell R.: Scoping in environmental impact assessment: balancing precaution and efficiency? *Environ Impact Asses Rev* 26, 359–76 (2006).
7. Wathern P.: An introductory guide to EIA. *Environmental impact assessment: theory and practice*. London: Biddles Ltd, Guilford and King's Lynn 3–46 (1994).
8. Wood C.: Environmental impact assessment in Victoria: Australian discretion rules EA. *J Enviro Manage* 39, 281–95 (1993).
9. Toro J, Duarte O, Requena I, Zamorano M.: Determining Vulnerability Importance in Environmental Impact Assessment. The case of Colombia. *Environmental Impact Assesment Rev* 32, 107-117 (2012).
10. Canter, L.: *Manual de evaluación de impacto ambiental. Técnicas para la elaboración de los estudios de impacto*. Segunda edición. McGraw Hill, Madrid (1998).
11. Mele F, Kostin A, Guillén-Gosálbez G, Jiménez L.: Multiobjective Model for More Sustainable fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50, 4939-4958 (2011).
12. Canter, L. and B. Sadler.: *A tool kit for effective EIA practice-Review of methods and perspectives on their application. A supplementary report of the international study of the effectiveness of environmental assessment* (1997).
13. Adkins W. and Burke D.: *Social, economic, and environmental factors in highway decision making*. Texas Transportation Institute, Texas A & M University (1974).
14. Rosenthal R.: *GAMS-A user's guide*. GAMS development corporation, Washington, DC, USA (2008).