

## Diseño óptimo de la cadena de suministro forestal considerando aspectos económicos y sociales

Regina Meyer<sup>1</sup>, Sandra Campanella<sup>1</sup>, Gabriela Corsano<sup>1</sup>, Jorge M. Montagna<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Desarrollo y Diseño, CONICET - UTN, Avellaneda 3657, S3002GJC Santa Fe, Argentina

{rmeyer, campanellasr, gcorsano, mmontagna}@santafe-conicet.gov.ar

**Resumen.** El aspecto social, usualmente, no se suele tener en cuenta en el diseño de una cadena de suministro (CS) y es fundamental, dado que involucra el bienestar y desarrollo de la población afectada. Desde una perspectiva de sustentabilidad, se debe considerar el impacto que tendrá la ubicación de fábricas en una región geográfica en el marco de las operaciones de una CS. Este trabajo considera la dimensión social en el diseño de la CS, evaluando la localización de las diferentes unidades productivas en sitios con características sociales particulares. Se propone un nuevo Indicador Social que considera atributos específicos del medio (tamaño de la población, nivel de desempleo). Se realiza una comparación con otros indicadores propuestos en la bibliografía, utilizando un modelo mixto entero lineal multiobjetivo. Además, se analiza el impacto de tener en cuenta aspectos sociales sobre el diseño óptimo de la CS forestal.

**Palabras Claves:** cadena de suministro, indicador social, optimización multiobjetivo, industria forestal.

### 1 Introducción

Una cadena de suministro (CS) es una red de organizaciones relacionadas que intervienen en la adquisición de materias primas, la producción y la distribución de productos. El aspecto social se tiene poco en cuenta en su diseño, siendo fundamental el efecto que tiene sobre el bienestar de las poblaciones donde se ubican las plantas. Además, es importante considerar las características particulares de cada región.

Existen muchos trabajos sobre sustentabilidad y las tres dimensiones o pilares que involucra: social, económica y ambiental ([4], [5], [7]). En los mismos, predomina el aspecto económico para evaluar el diseño de la CS y en menor medida el ambiental, siendo el aspecto social la dimensión sobre la que menos se trabaja [4]. Considerar simultáneamente estos tres aspectos en el diseño de una CS no es sencillo, dado que el compromiso entre los mismos es muy significativo y que no es simple determinar medidas apropiadas para cada pilar. El uso de indicadores apropiados puede facilitar la incorporación de la perspectiva social a un análisis sistemático del diseño de la CS. Estos indicadores deben permitir cuantificar el desempeño del sistema, realizar un análisis sobre su sustentabilidad, y comparar alternativas [3].

Hay pocos trabajos que incluyan aspectos sociales en el diseño de CS ([5], [6]). Un motivo es la dificultad para evaluarlos [3] pues muchas de las características sociales son difícilmente cuantificables ([3], [8]). Por ejemplo, en [3] los autores plantean los tres pilares para el diseño de la CS. Para el social proponen un indicador relacionado con la cantidad de empleos generados y un factor regional variable de acuerdo a los criterios a usar en el estudio. En ese caso particular utilizan la densidad de población con el objeto de distribuir los empleos generados en sitios más deshabitados. El problema se modela mediante un programa mixto entero lineal (MILP), con un enfoque multiobjetivo. Se genera una curva de Pareto con los aspectos social y económico.

Este trabajo tiene como objetivo considerar la dimensión social dentro del diseño de la CS forestal, analizando el impacto que tiene la ubicación de las diferentes plantas sobre las características sociales particulares de cada sitio. Se propone un nuevo Indicador Social (IS) que considera las características del medio (tamaño de la población y nivel de desempleo) y se utiliza en un modelo MILP multiobjetivo.

## 2 Descripción del problema

En este trabajo, la CS consta de 3 niveles: sitios de materias primas, fábricas y zonas de clientes. En cada sitio de materia prima  $s$  hay disponibles distintos tipos de materias primas  $r$  dado el diámetro de los troncos. Estos materiales son enviados a las fábricas  $f$  ( $f_1$ : aserradero,  $f_2$ : pellets,  $f_3$ : etanol,  $f_4$ : tableros) que se deben ubicar en sitios  $l$  propuestos en el modelo. Las plantas producen productos finales  $p$  ( $p_1$ : madera tipo 1,  $p_2$ : madera tipo 2,  $p_3$ : pellets,  $p_4$ : etanol,  $p_5$ : tableros). Los aserraderos producen madera tipo 1 y 2; la primera con un nivel específico de humedad, mientras  $p_2$ , sin requerimientos de humedad. Las restantes plantas producen un único producto. Cada aserradero produce además subproductos  $q$  ( $q_1$ : virutas de madera,  $q_2$ : chip leña,  $q_3$ : corteza,  $q_4$ : aserrín), que pueden ser vendidos, usados como materia prima en las fábricas de pellets, etanol o tableros, o como combustible para la caldera en el aserradero. Se requiere energía térmica para la producción de madera y etanol. Para los aserraderos, las posibles fuentes son los pellets y los subproductos y, para etanol, se usan pellets y combustible líquido de proveedores externos.

En cuanto a lo social, se consideran tres IS. El primero propuesto por [3] considera características de la población mediante un factor adimensional, que relaciona un aspecto particular de la región en relación al contexto nacional. Se propone en este trabajo un IS que considera diferentes características del sitio donde se va a instalar la fábrica, sin relativizar respecto a un valor promedio del país. Pondera conjuntamente los empleos generados, el nivel de desempleo y la cantidad de habitantes. Este IS permite ubicar las fábricas para promover el desarrollo local, generar fuentes de trabajo donde existe mayor desempleo y fomentar la actividad industrial en sitios con menor población económicamente activa. Finalmente, se incluye otro IS que corresponde al número de empleos generados, el indicador más utilizado en la literatura ([1], [9]).

### 3 Formulación del modelo

En cada área de cosecha se dispone de troncos y residuos. Los troncos utilizados por las plantas ( $Cantmp_{slfjp}$ ) no pueden exceder la cantidad máxima disponible en cada sitio ( $Maxrm_{sr}$ ):

$$\sum_{\substack{lfjp \\ f \in Cmp(f) \\ (p,f) \in V(p,f)}} Cantmp_{slfjp} \leq Maxrm_{sr} \quad \forall s, r \quad (1)$$

$Cmp(f)$  es el conjunto de fábricas  $f$  que usa troncos como materia prima (aserraderos y tableros).  $V(p,f)$  establece la relación entre el producto  $p$  y la fábrica  $f$ .

Los residuos generados en las áreas de cosechas son proporcionales a los troncos consumidos a través del parámetro  $fres$ . La cantidad total de residuos utilizados por las fábricas de pellets y etanol,  $Cantres_{slfp}$ , no debe exceder la cantidad disponible:

$$\sum_{\substack{lfjp \\ f \in Cmp(f) \\ (p,f) \in V(p,f)}} Cantmp_{slfjp} \cdot fres \geq \sum_{\substack{lfjp \\ f \in D(f) \\ (p,f) \in V(p,f)}} Cantres_{slfp} \quad \forall s \quad (2)$$

$D(f)$ , conjunto de fábricas  $f$  que usan residuos como materia prima (pellets y etanol).

Para cada fábrica  $f$ , se debe seleccionar un tamaño  $t$  de un conjunto discreto  $T_f$  de capacidades disponibles. Los aserraderos y las fábricas de tableros utilizan troncos como materia prima, convertidos en productos finales de acuerdo al factor de conversión  $conv_{pr}$ . Para convertir subproductos en producto final se usa el factor de conversión  $ybyp_{qp}$  y para convertir residuos en materia prima  $yres_p$ . El total de producción de cada producto  $p$  en cada fábrica  $Prod_{l,lfjp}$  depende de la cantidad total de materia prima: troncos  $Cantmp_{slfjp}$ , residuos  $Cantres_{slfp}$  y/o subproductos  $Subprod_{l,lfjp}$  que llegan a la fábrica  $f$  en el lugar  $l$  multiplicada por factores de conversión apropiados:

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T_f} Prod_{l,lfjp} &= \sum_{\substack{sr \\ f \in C(f)}} conv_{pr} Cantmp_{slfjp} + \sum_{\substack{l,q \\ (q,p) \in R(q,p)}} ybyp_{qp} Subprod_{l,lfjp} \\ &+ \sum_{\substack{s \\ f \in D(f)}} yres_p Cantres_{slfp} \quad \forall l, (p, f) \in V(p, f) \end{aligned} \quad (3)$$

$R(q,p)$  establece que el subproducto  $q$  se usa como materia prima para el producto  $p$ : las virutas de madera  $q_1$ , chips leña  $q_2$  y aserrín  $q_4$  son materia prima para pellet, etanol y tablero mientras que la corteza  $q_3$ , se usa para etanol.

La variable binaria  $w_{l,lf}$  vale 1 si se instala una fábrica  $f$  de capacidad  $t$  en el sitio  $l$ . En ese caso su producción no puede exceder su capacidad máxima,  $Pl_{lf}^{max}$ :

$$\sum_{\substack{p \\ (p,f) \in V(p,f)}} Ve_p Prod_{l,lfjp} \leq Pl_{lf}^{max} \cdot w_{l,lf} \quad \forall l, f, t \in T_f \quad (4)$$

$Ve_p$  es el factor de productividad de cada producto. Si se instala una planta, entonces su producción tiene que ser al menos del 75% de su capacidad:

$$\sum_{\substack{p \\ (p,f) \in V(p,f)}} Ve_p Prod_{l,lfjp} \geq 0,75 Pl_{lf}^{max} w_{l,lf} \quad \forall l, t, f \quad (5)$$

Se debe seleccionar a lo sumo una dimensión para cada fábrica en el lugar  $l$ :

$$\sum_{t \in T_f} w_{l,lf} \leq 1 \quad \forall l, f \quad (6)$$

La cantidad generada de cada subproducto  $Subprod_{ql}$  en un aserradero se obtiene a partir de la cantidad de troncos usados con un factor de conversión  $convbyp_q$ :

$$Subprod_{ql} = convbyp_q \sum_{p \in V(p,f)}^{srp} Cantmp_{srp,p} \quad \forall l, q \quad (7)$$

Los subproductos se usan como materia prima (para pellets, tableros y etanol)  $Subprodmp_{l'qfp}$ , como combustible para calderas  $Subprodc_{ql}$  en el mismo aserradero o se venden a terceros  $Subprodven_{ql}$ , sin exceder la producción de cada aserradero:

$$Subprod_{ql} \geq \sum_{\substack{l'fp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ (q,p) \in R(q,p)}}^{l'fp} Subprodmp_{l'qfp} + Subprodc_{ql} + Subprodven_{ql} \quad \forall l, q \quad (8)$$

La madera  $p_1$  se seca aprovechando las calderas del aserradero, al igual que una porción  $fl$  de madera del tipo  $p_2$ . La energía se genera en calderas alimentadas con subproductos  $Subprodc_{ql}$ , y pellets de las fábricas de pellets  $pellboil_{l'}$ , teniendo en cuenta su capacidad calorífica  $cc_q$  y  $ccp$ , respectivamente, para satisfacer la energía requerida:

$$endry \sum_{t \in T_f} (Prodf_{lf_1 p_1} + Prodf_{lf_1 p_2} fl) \leq \sum_q cc_q Subprodc_{ql} + ccp \sum_{l'} pellboil_{l'} \quad \forall l \quad (9)$$

El parámetro  $endry$  representa la energía necesaria para el secado de la madera.

Los pellets se usan como combustible en otras fábricas o se venden. La cantidad de pellets enviada a las fábricas de etanol  $Cantpell_{l'}$ , a calderas de aserraderos  $pellboil_{l'}$  y vendido a clientes  $Cantprod_{lkp_3 f_2}$  no debe exceder la cantidad producida  $Prodf_{lf_2 p_3}$ :

$$\sum_{l'} (Cantpell_{l'} + pellboil_{l'}) + \sum_k Cantprod_{lkp_3 f_2} \leq \sum_{t \in T_f} Prodf_{lf_2 p_3} \quad \forall l \quad (10)$$

La energía requerida en la planta de etanol localizada en  $l$ , es proporcional a la producción usando parámetro  $enet$ , y se satisface con pellets  $Cantpell_{l'}$  y combustible externo  $Combnecc_i$ :

$$enet \sum_{t \in T_f} Prodf_{lf_3 p_4} = ccp \sum_{l'} Cantpell_{l'} + Combnecc_i \quad \forall l \quad (11)$$

La demanda máxima del producto  $p$  en la región de clientes  $k$ ,  $Dl_{kp}^{max}$ , se satisface con el producto proveniente de las diferentes fábricas  $Cantprod_{lkpf}$ :

$$\sum_{\substack{lf \\ (p,f) \in V(p,f)}} Cantprod_{lkpf} \leq Dl_{kp}^{max} \quad \forall k, p \quad (12)$$

La cantidad enviada a las regiones de consumo debe ser igual a la cantidad producida:

$$\sum_{t \in T_f} Prodf_{lf p_i} = \sum_k Cantprod_{lkp_i f} \quad \forall l, (p_i, f) \in V(p_i, f), i = 1, 2, 4, 5 \quad (13)$$

La producción de pellets se reparte entre lo que se envía a las regiones de consumo, a las fábricas de etanol y lo consumido en las calderas:

$$\sum_{t \in T_f} Prodf_{lf_2 p_3} = \sum_k Cantprod_{lkp_3 f_2} + \sum_{l'} Cantpell_{l'} + pellboil_{l'} \quad \forall l \quad (14)$$

### 3.1 Restricciones sociales

Se analizan tres formas de IS en las ecuaciones (15), (16) y (17). Se propone aquí:

$$IS_1 = \sum_{if} \frac{\alpha_l \cdot Emploc_{if}}{Hab_l \cdot PEA_l - \beta_l \cdot Hab_l \cdot PEA_l \cdot TDA_l} \quad (15)$$

donde  $TDA_l$  es la tasa de desempleo,  $PEA_l$  es el porcentaje de la población económicamente activa,  $Hab_l$  son los habitantes en el sitio  $l$  y  $Emploc_{if}$  es la cantidad de empleados locales asignados.  $\alpha_l$  y  $\beta_l$  son factores que permiten ponderar a los empleados locales y a los desempleados. Estos parámetros son fijados por los usuarios del modelo para representar preferencias específicas de cada caso.

La ecuación (16) fue propuesta por Mota y col. [3] con el objeto de tener en cuenta información particular de la región en la cual se va a ubicar cada planta:

$$IS_2 = \sum_{if} \frac{\mu_{total}}{\mu_l} (Emploc_{if}) \quad (16)$$

donde  $\mu_{total}$  representa la densidad poblacional de la República Argentina y  $\mu_l$  representa la densidad poblacional de la región donde se encuentra el sitio  $l$ .

La ecuación (17) propuesta por Yue y col. [9] y Branca y col. [1] establece como IS el número de empleos generados:

$$IS_3 = \sum_{if} Emploc_{if} \quad (17)$$

La variable binaria  $y_l$  vale 1 si no se ocupan todos los empleados del sitio  $l$  y cero en caso contrario. La Ec. (18) asegura que  $y_l = 1$  cuando la cantidad de empleados locales utilizados por las fábricas instaladas en ese lugar es menor que la cantidad de desempleados que hay en el mismo:

$$\lfloor TDA_l \cdot PEA_l \cdot Hab_l \rfloor - \sum_f Emploc_{if} \leq M \cdot y_l \quad \forall l \quad (18)$$

donde  $\lfloor x \rfloor$  es la función piso.

Los empleos necesarios pueden cubrirse con empleados locales ( $Emploc_{if}$ ) e inmigrantes ( $Inm_{if}$ ), pero no se introducen inmigrantes en un lugar si no han sido empleados antes todos los desocupados locales:

$$Inm_{if} \leq M(1 - y_l) \quad \forall l, f \quad (19)$$

La cantidad total de personas empleadas en el sitio  $l$  es igual a la suma de los empleados locales más los inmigrantes:

$$Emploc_{if} + Inm_{if} = \sum_{t \in T_f} w_{if} Emp_{if} \quad \forall l, f \quad (20)$$

La cantidad de empleados locales no puede superar la cantidad de desempleados:

$$\sum_f Emploc_{if} \leq \lfloor TDA_l PEA_l Hab_l \rfloor \quad \forall l \quad (21)$$

### 3.2 Funciones objetivo

En este modelo se considera tanto el aspecto económico como el social. Por lo tanto, se plantean dos funciones objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Max beneficio} = & \text{Ingresos} - \text{Cos. mat. pr.} - \text{Cos. transp.} \\ & - \text{Cos. inst.} - \text{Cos. ener.} - \text{Cos. prod.} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{Max IS} \quad (23)$$

Los ingresos incluyen la venta de productos y subproductos, y se calculan multiplicando la cantidad de productos enviada a los consumidores por su precio de venta ( $\text{Prevent}_{pk}$  para el producto  $p$ ,  $\text{Presub}_q$  para el subproducto  $q$ ):

$$\text{Ingresos} = \sum_{\substack{lkpf \\ (p,f) \in V(p,f)}} \text{Cantprod}_{lkpf} \text{Prevent}_{pk} + \sum_{lq} \text{Subprodven}_{ql} \text{Presub}_q \quad (24)$$

El costo de materia prima se calcula de acuerdo al costo unitario  $\text{Cmp}_r$ :

$$\text{Cos. mat. pr.} = \sum_{\substack{slrfp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ f \in C(f)}} \text{Cmp}_r \text{Cantmp}_{slrfp} \quad (25)$$

El costo de transporte incluye el envío de troncos a las fábricas, productos, subproductos y residuos entre los nodos de la CS y pellets para la producción de energía. Se calcula multiplicando la cantidad de material transportado por la distancia entre los nodos involucrados y el costo relativo dependiendo del material enviado:

$$\begin{aligned} \text{Cos. transp.} = & \text{Ctmp} \sum_{\substack{slrfp \\ (p,f) \in V(f,p) \\ f \in C(f)}} \text{Cantmp}_{slrfp} \text{disths}_{sl} + \text{Ctres} \sum_{\substack{slf \\ f \in D(f)}} \text{Cantres}_{slf} \text{disths}_{sl} \\ & + \text{Ctres} \sum_{\substack{ll'qfp \\ (p,f) \in V(p,f) \\ (q,p) \in R(q,p)}} \text{Subprodmp}_{ll'qfp} \text{distll}_{ll'} \\ & + \sum_{\substack{lkpf \\ (p,f) \in V(p,f)}} \text{Ctp}_p \text{Cantprod}_{lkpf} \text{distlk}_{lk} + \text{Ctpell} \sum_{ll'} (\text{Cantpell}_{ll'} \text{distll}_{ll'} + \text{pellboil}_{ll'} \text{distll}_{ll'}) \end{aligned} \quad (26)$$

El costo de instalación está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Cos. inst.} = \sum_{\substack{lf \\ t \in T_f}} \text{CCF}_{ft} \alpha_f (P_{lf}^{\text{max}})^{\beta_f} w_{lf} \quad (27)$$

$\text{CCF}_{ft}$  representa el factor carga de capital en el horizonte de tiempo, que incluye amortización y mantenimiento de cada tipo de fábrica, mientras que  $\alpha_f$  y  $\beta_f$  son coeficientes de costos.

El costo de combustible comprado de fuentes externas de la CS para producir energía térmica en fábricas de etanol, se obtiene multiplicando la cantidad de combustible líquido necesario ( $\text{combext}_i$ ) por su precio ( $\text{ccomb}$ ) como expresa la ecuación (28):

$$\text{Cos. ener.} = \text{ccomb} \sum_i \text{combext}_i \quad (28)$$

Los costos de producción consideran la operación de las fábricas instaladas que dependen de su capacidad de producción  $t$ :

$$Cos. prod. = \sum_{\substack{ipf \\ t \in T_f \\ (p,f) \in V(p,f)}} Prod_{ifp} C_{prod}_{pif} \quad (29)$$

donde  $C_{prod}_{pif}$  representa el costo de producción para el producto  $p$  y en la fábrica  $f$  de capacidad  $t$ .

### 3.3 Enfoque multiobjetivo

Como el objetivo de este trabajo es proveer una solución a un problema que involucra los impactos económico y social, se trabaja usando un enfoque multiobjetivo. Entre los métodos disponibles, se eligió “ $\epsilon$ - constraint” por su simplicidad y facilidad en su implementación.

## 4 Ejemplo

El modelo propuesto se aplica a una CS forestal del noreste argentino. Considera 8 áreas de cosecha disponibles con dos tipos de materias primas, que varían según el diámetro del tronco. Además, consta de un total de 19 posibles ubicaciones para las instalaciones de producción: en las regiones de cosecha, en las regiones de consumo o en los sitios intermedios. Para cada tipo de planta, se considera un conjunto de tres capacidades máximas de producción. Por lo tanto, los costos de producción e inversión varían según el tamaño seleccionado. Se toman cuatro regiones consumidoras.

En las figuras 1, 2 y 3 se presentan el beneficio y el IS en cada iteración de la resolución del problema multiobjetivo considerando las tres formas de mediciones del IS. Para obtener estos resultados, en una primera instancia, se obtuvo el valor máximo que puede tomar el IS, planteando como función objetivo su maximización, sin ninguna referencia a aspectos económicos. Luego, se obtuvo el máximo beneficio que puede obtener la CS planteada, sin ninguna consideración de aspectos sociales. De este modo, se obtiene lo que se considera, en este caso, como el valor mínimo del IS. Entre estos dos valores del indicador IS se realizan las diferentes iteraciones, donde en cada una de ellas se maximiza el beneficio de la CS sujeto a una cota de IS. Se alcanza, entonces, la mejor solución económica que satisface una condición social representada por el valor cota del IS.

Como puede observarse, a medida que se ponen condicionamientos sociales más altos, la solución empeora desde el punto de vista económico. En cada una de las soluciones, en las iteraciones, se incorporan más empleados para satisfacer la condición social cada vez más alta. Si se analiza como varía el beneficio en cada iteración, se observa que es posible mejorar el IS sin necesidad de incurrir en grandes variaciones negativas desde el punto de vista económico.

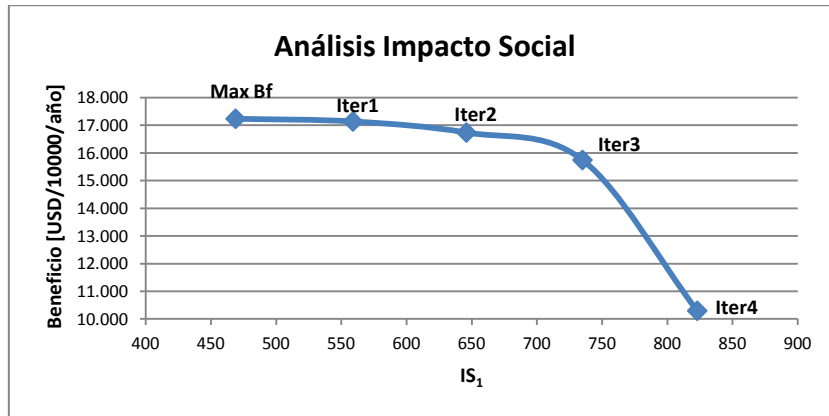


Fig. 1. Curva de Pareto con el IS<sub>1</sub>

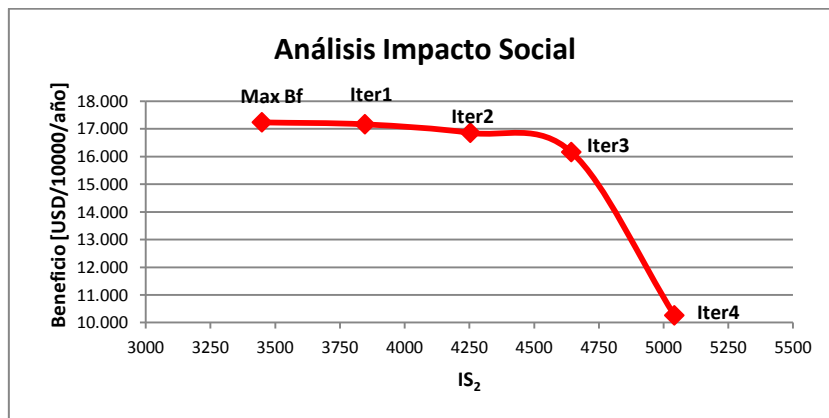


Fig. 2. Curva de Pareto con el IS<sub>2</sub>

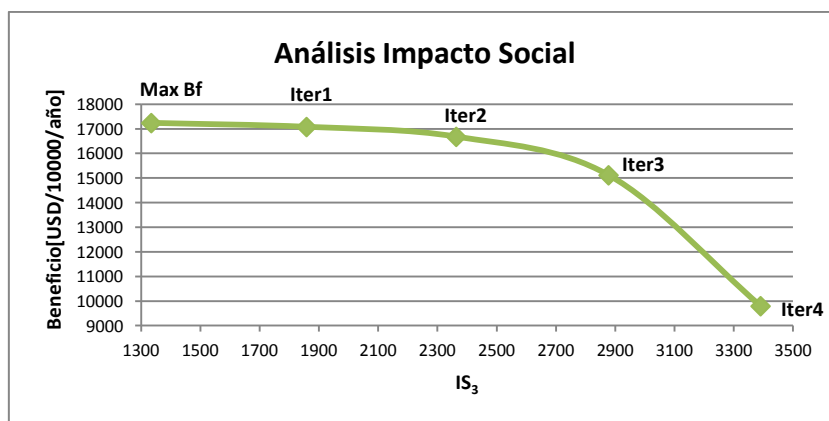


Fig. 3. Curva de Pareto con el IS<sub>3</sub>



Se puede observar que existe una variación importante en el beneficio económico entre el primer (Max Bf) y el último punto (Iter4); esta variación implica una disminución del 40% aproximadamente del Bf y un aumento del 88% aproximadamente del IS<sub>1</sub>, una disminución del 40% aproximadamente del Bf y un aumento del 73% aproximadamente del IS<sub>2</sub>, y por último, una disminución del 43% aproximadamente del Bf y un aumento del 185% del IS<sub>3</sub>. Se concluye entonces que si bien la variación desde el punto de vista económico no es significativa en los tres casos, hay mucha diferencia según sea el IS utilizado. En todos los casos, considerando los primeros 3 puntos de las curvas, se advierte que hay una importante mejora desde el punto de vista social, pero con poca diferencia económica entre ellos. Más específicamente, hay un aumento notorio en el IS (alrededor del 65% en las primeras dos gráficas y un 87% en la última) mientras que el Bf sólo disminuye un 3% en todas las gráficas. Esto permite concluir que se puede obtener un mejor diseño de la CS desde el punto de vista social, en relación a la distribución de los empleos, sin que esto implique una pérdida notable del beneficio económico de la misma.

Por lo tanto, se pueden buscar soluciones intermedias entre los valores máximos del Bf y del IS mediando ambos criterios de diseño mediante la utilización del modelo para evaluar la mejora de ambos indicadores. Disponiendo del modelo completo de la CS, es interesante comparar la configuración de la CS para evaluar si hay diferencias significativas. Se eligen tres puntos de las curvas: el primero correspondiente al máximo Bf, el tercero que corresponde a la iteración número 2 y el último que es la iteración número 4, como muestra la Tabla 1.

**Tabla 1.** Diseño óptimo de la CS con diferentes IS.

		Tamaño	Aserraderos [m <sup>3</sup> /año]	Pellets [T/año]	Etanol [m <sup>3</sup> /año]	Tableros [m <sup>3</sup> /año]
Max Bf		t <sub>1</sub>	0	0	4	1
		t <sub>2</sub>	1	1	0	0
		t <sub>3</sub>	5	3	0	3
		Producción	361500	98687	114175	915000
		Uso capacidad	91%	88%	95%	94%
		Demanda.satisf.	100%	2%	43%	100%
		Beneficio		17237		
		Empleados	575	490	160	600
		IS <sub>1</sub>		469		
		IS <sub>2</sub>		3449		
	IS <sub>3</sub>		1335			
Iter2	IS <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	4	2	4	1
		t <sub>2</sub>	1	1	0	0
		t <sub>3</sub>	4	3	0	3
		Producción	361500	98688	114175	915000
		Uso capacidad	91%	77%	95%	94%
	IS <sub>2</sub>	Demanda.satisf.	100%	2%	43%	100%
		Beneficio		16740		
		IS		646		
		Empleados	715	650	160	600
		t <sub>1</sub>	4	1	4	1
t <sub>2</sub>	1	1	0	0		
t <sub>3</sub>	4	3	0	3		
Producción	361500	104688	114175	915000		
Uso capacidad	91%	87%	95%	94%		

Iter4		Demanda.satisf.	100%	1.77%	43%	100%
		Beneficio		17167		
		IS		3847		
	IS <sub>3</sub>	Empleados	715	570	160	600
		t <sub>1</sub>	5	0	4	1
		t <sub>2</sub>	3	1	0	0
	IS <sub>1</sub>	t <sub>3</sub>	3	3	0	3
		Producción	361500	98688	115406	915000
		Uso capacidad	87%	88%	96%	94%
	IS <sub>2</sub>	Demanda.satisf.	100%	0.51%	43.55%	100%
		Beneficio		17077		
		IS		1859		
IS <sub>3</sub>	Empleados	825	490	160	600	
	t <sub>1</sub>	4	7	4	6	
	t <sub>2</sub>	1	0	0	3	
IS <sub>1</sub>	t <sub>3</sub>	5	5	0	1	
	Producción	361500	164688	98689	915000	
	Uso capacidad	77%	76%	82%	76%	
IS <sub>2</sub>	Demanda.satisf.	100%	0.98%	37.24%	100%	
	Beneficio		10299			
	IS		823			
IS <sub>3</sub>	Empleados	815	1210	160	1285	
	t <sub>1</sub>	6	5	4	6	
	t <sub>2</sub>	2	1	0	3	
IS <sub>1</sub>	t <sub>3</sub>	4	5	0	1	
	Producción	361500	164688	98689	915000	
	Uso capacidad	77%	76%	82%	76%	
IS <sub>2</sub>	Demanda.satisf.	100%	0.98%	37.24%	100%	
	Beneficio		10262			
	IS		5042			
IS <sub>3</sub>	Empleados	910	1150	160	1285	
	t <sub>1</sub>	4	3	4	6	
	t <sub>2</sub>	1	2	0	5	
IS <sub>1</sub>	t <sub>3</sub>	5	5	0	0	
	Producción	361500	164688	98689	915000	
	Uso capacidad	77%	76%	82%	76%	
IS <sub>2</sub>	Demanda.satisf.	100%	0.98%	37.24%	100%	
	Beneficio		9794			
	IS		3391			
IS <sub>3</sub>	Empleados	815	1090	160	1395	

Como se puede observar en la Tabla 1, no existen grandes variaciones en las cantidades producidas de cada producto, salvo en la iteración 4 donde la producción de pellets aumenta bastante en los tres IS propuestos y disminuye la producción de etanol. Además, en la misma iteración, se advierte que, por un lado, aumenta la capacidad instalada y, por otro lado, que disminuye el porcentaje de uso de la misma con respecto a las iteraciones previas. Esto se debe a que el modelo procura instalar muchas plantas para favorecer los indicadores sociales, las cuales son usadas en el límite inferior admitido del 75%. Es importante tener en cuenta que en todos los casos se consume el total de troncos disponibles. Otro aspecto interesante, partiendo de que en todos los casos los tamaños de las plantas están en orden creciente, es que la cantidad de plantas que se instala en la Iter4 es mayor que en las iteraciones previas, pero se trata de plantas, de menor tamaño. Teniendo en cuenta condiciones de escala,

al instalar plantas más pequeñas se requiere proporcionalmente mayor número de empleados, comparado con las más grandes, para generar la misma cantidad de producto. Además esto implica distribuir las plantas en diferentes sitios debido a que, como restricción del modelo, no está permitido instalar más de una fábrica de cada tipo en la misma ubicación. Esto se advierte principalmente en aserraderos y fábricas de pellets ya que para la producción de madera se necesita mayor cantidad de empleados por Tn de materia prima procesada.

En cuanto a la demanda, se envía a los distintos clientes la totalidad de lo producido de maderas 1 y 2 y de tableros. Los pellets se destinan casi por completo para combustible de las calderas, mientras que la producción de etanol es menos de la mitad de lo demandado.

Por una cuestión de espacio no se incluyen resultados sobre la localización de las plantas, pero teniendo en cuenta que varía el número de plantas, queda claro que las ubicaciones usadas en todos los casos son diferentes y por lo tanto la configuración global de la CS cambia.

También se puede concluir que existen diferencias en los resultados de los distintos IS y que, de acuerdo al criterio que se utilice, tratan de instalar las plantas de modo de favorecer los criterios usados.

En cuanto a los subproductos generados, en todos los casos, son usados en su totalidad, como combustible en las calderas y como materia prima para la producción de pellets, etanol y tableros.

Los modelos son implementados y resueltos usando GAMS, versión 24.1.3 con un 2.8 GHz Intel Core i7 procesador. El resolvidor CPLEX – Versión 12.5.1 fue empleado para resolver los problemas MILP, y el tiempo de CPU para la resolución varía entre 65.084 y 7572.46 segundos.

## 5 Conclusiones

El indicador social propuesto permite distribuir los empleos y las plantas de acuerdo a las características de la región, con una tendencia a localizar las mismas en sitios con menor población económicamente activa y mayor índice de desempleo.

Además, puede observarse que en el IS propuesto generar mayor cantidad de empleos no es una condición necesaria para obtener un mejor valor del indicador, solamente con redistribuirlos en zonas con menor población y/o mayor porcentaje de desempleados éste mejora.

Usando este IS existe una tendencia a instalar las plantas en sitios más pequeños. Este no es el caso del indicador  $IS_3$  que proponen Branca y col. [1] y Yue y col. [9]. Otra diferencia notable entre ambos indicadores es que al medir el parámetro social mediante la generación de empleos existe una tendencia a instalar plantas en todos los sitios posibles sin considerar las características del lugar, mientras que con el IS propuesto esto no sucede. Esto permite que el beneficio económico de la CS en cuestión no disminuya significativamente y se alcance una mejora social.

El IS propuesto también tiende a localizar las plantas en sitios donde hay mayor índice de desempleo a diferencia de lo que proponen Mota y col. [3] que sólo pesan la función objetivo favoreciendo a las regiones de menor densidad poblacional.

## Referencias

1. Branca G, Cacchiarelli L, Maltoglou I, Rincon L, Sorrentino A, Valle S.: *Profits versus jobs: Evaluating alternative biofuel value-chains in Tanzania*, Vol. 57. *Land Use Policy* (2016) 229-240.
2. Campanella S., Corsano G., Montagna J.M.: *Optimal design of forest supply chain considering efficient residues and byproducts reuse*; CAIQ 2015 Buenos Aires (2015) 1850-3519.
3. Mota B., Gomes M.L., Carvalho A., Barbosa-Povoa A.P.: *Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning*, Vol. 105. *Journal of Cleaner Production* (2015) 14-27.
4. Popovic T., Kraslawski A., Heiduschke R., Repke J-U. *Indicators of Social Sustainability for Wastewater Treatment Processes*, Vol. 34. *Proc 8Th Int Conf Found Comput Process Des* (2014) 723-728.
5. Searcy C, Dixon SM, Patrick Neumann W. *The use of work environment performance indicators in corporate social responsibility reporting*, Vol. 112. *J Clean Prod* (2016) 2907-2921.
6. Seuring S. *A review of modeling approaches for sustainable supply chain management*, Vol. 54. *Decis Support Syst* (2013) 1513-1520.
7. Seuring S, Müller M. *From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management*, Vol. 16. *J Clean Prod* (2008) 1699-1710.
8. Valenzuela-Venegas G, Salgado JC, Díaz-Alvarado F. *Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks: classification and criteria for selection*, Vol. 133. *J Clean Prod* (2016) 99-116.
9. Yue D, Slivinsky M, Sumpter J, You F. *Sustainable design and operation of cellulosic bioelectricity supply chain networks with life cycle economic, environmental, and social optimization*, Vol. 53. *Ind Eng Chem Res* (2014) 4008-4029.