

# DISEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO PARA LA INDUSTRIA DE ALFOMBRAS CONSIDERANDO EL RECICLAJE

Agustina Franco<sup>a</sup>, Gonzalo De Salazar<sup>b</sup>, Pablo A. Marchetti<sup>ab</sup>, Luis J. Zeballos<sup>\*a</sup>

<sup>a</sup>INTEC (UNL-CONICET), Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina

<sup>b</sup>UTN-Facultad Regional Santa Fe, Lavaisse 610, 3000 Santa Fe, Argentina

**Resumen.** Este artículo propone un modelo de programación mixta entera lineal (MILP: Mixed-Integer Linear Programming) para representar el problema de diseño y planificación de cadenas de suministro de lazo cerrado (CLSC: Closed Loop Supply Chain) de la industria de las alfombras. El problema abordado implica determinar la estructura óptima de la red, los productos y las cantidades a fabricar, transportar, almacenar y reciclar para garantizar la demanda de un determinado número de clientes. Una ventaja importante del enfoque propuesto es permitir una mejor comprensión del desempeño de la red considerando todo el ciclo de vida de las alfombras y las diferentes opciones para recuperar las materias primas. La función objetivo de la formulación es maximizar el beneficio total del ciclo de vida. La relevancia de la formulación se muestra con un ejemplo basado en un caso industrial que involucra la recuperación de materias primas de alfombras al final de su vida útil. A través de los experimentos numéricos realizados con la formulación propuesta para diferentes casos, se pudo apreciar el impacto relativo de las tasas de recuperación, los precios de venta de los productos finales y el valor de compra de las materias primas en la estructura de la red, los ingresos, costos y flujos de productos.

**Palabras clave:** reciclaje de alfombras, diseño de cadena de suministro, ciclo de vida, programación matemática.

## 1 Introducción

La preocupación por el cuidado de los recursos naturales, la aplicación de nuevas normativas ambientales, los cambios en las preferencias de los clientes, los objetivos comerciales-ambientales de las empresas y las oportunidades económicas son los principales detonantes del creciente interés en considerar los productos al final de su vida útil. Según el tipo de producto recuperado, se pueden encontrar distintas opciones para tratarlos, como el reciclaje, remanufactura, reutilización, reparación y reacondicionamiento de componentes. En muchos casos, el reciclaje es la mejor opción debido a que preserva las materias primas, piezas o componentes incorporados a la producción inicial de bienes, lo que permite a los fabricantes aumentar la productividad y la rentabilidad del negocio. Actualmente, el reciclaje se está utilizando en

diferentes áreas industriales. La fabricación de alfombras es un sector donde el reciclaje de productos al final de su vida útil puede ser una actividad importante, considerando tanto las condiciones económicas como medioambientales (Deutsche Umwelthilfe, 2017). En estas circunstancias, el reciclaje de alfombras representa una actividad crítica para tratar de obtener rentabilidad y cumplir con las expectativas ambientales globales. Por lo tanto, los fabricantes de alfombras deben diseñar sus productos considerando la reutilización y reciclaje de los mismos, desarrollar instalaciones de recolección y reciclaje, como así también etiquetar claramente los materiales utilizados para facilitar el reciclaje por ellos mismos o por otros actores.

Dada la situación descrita, la nueva configuración de las cadenas de suministro implica la consideración explícita del flujo bidireccional de materiales, piezas y productos (de proveedores a clientes y de clientes a proveedores/centros de producción). Por lo tanto, los sistemas de producción deben expandirse para incorporar sistemas de producción inversa con el fin de incluir el tratamiento/reprocesamiento del flujo de productos al final de su vida útil, desechos de producción, empaques, componentes y materiales (Ammons y col., 1999; Fleischmann y col., 2000).

Dada la complejidad del problema relacionado con la gestión óptima de las CLSCs, es muy deseable el desarrollo de herramientas computacionales adecuadas para ayudar a las empresas en el diseño y planificación de las CLSCs teniendo en cuenta las regulaciones ambientales y los beneficios económicos. Se pueden encontrar varios enfoques considerando el problema determinístico del diseño y planificación de CLSCs (Melo y col., 2009). Sin embargo, existen pocos trabajos que consideran explícitamente los problemas de gestión y optimización de la industria de las alfombras. Dos de los trabajos más relevantes que abordan problemas asociados a la red de reciclaje de alfombras son Flapper y col. (1997) y Realff y col. (2004). Flapper y col. (1997) desarrollaron un enfoque determinista de ubicación y capacidad para el diseño de una red europea de reciclaje de residuos de alfombras. Realff y col. (2004) presentaron un modelo MILP robusto para apoyar la toma de decisiones para el diseño de infraestructura de producción inversa. Sin embargo, a pesar de la importancia de la consideración explícita y simultánea de ambos flujos de productos en la industria de las alfombras, en la literatura no se han encontrado trabajos directamente relacionados con el tema mencionado.

Hasta donde sabemos, no existe ninguna investigación previa que proponga una formulación para el diseño y planificación de CLSCs en la industria de las alfombras con el fin de maximizar el beneficio total del ciclo de vida de la red.

## 2 Descripción del problema

El problema consiste en optimizar el diseño y planificación de CLSCs de la industria de las alfombras. El objetivo es maximizar el beneficio total de la red, determinando simultáneamente las instalaciones a abrir, las cantidades de materias primas y productos a fabricar, transportar, almacenar, recuperar y reciclar para garantizar las demandas de determinados clientes. Es importante señalar que la devolución de los productos descartados por los clientes y su posterior procesamiento para la recupera-

ción de materias primas se considera con el fin de mejorar el desempeño económico de la red.

La fabricación de alfombras implica la unión de varias capas de diferentes materiales (polímeros y rellenos inorgánicos) que son difíciles y costosos de reprocesar una vez desechados (Realf y col., 2005). La composición general de una alfombra típica incluye las siguientes capas: fibra frontal (primera capa), respaldo primario (segunda capa), adhesivo (tercera capa) y respaldo secundario (cuarta capa) (Jain y col., 2012).

La primera capa puede ser de nylon, polipropileno, poliéster, tereftalato de polietileno, sintéticos mixtos o fibras naturales como la lana (Bird, 2014; Jain y col., 2012; Miraftab y col., 1999). En este caso, se considera la fabricación y reciclaje de alfombras de Nylon 6 (Ny6) y Nylon 6.6 (Ny66) ya que para estos productos existen técnicas de despolimerización rentables. El soporte principal es la capa en la que se unen los hilos de las fibras de la cara. Se aplica pegamento a la parte inferior del respaldo primario para unir las fibras de la cara. El respaldo secundario es la capa adherida a la parte posterior del pelo de la alfombra. Los soportes primarios y secundarios pueden estar hechos de varios materiales como polipropileno, poliéster, cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano o yute (Miraftab y Mirzababaei, 2009).

Los productos al final de su vida útil se recogen de los clientes y se transportan a las siguientes entidades de la red (centros de recolección), con una tasa de devolución determinada. Luego, todos los productos recuperados se dirigen a centros de recuperación de materias primas. El reprocesamiento de alfombras incluye la conversión del polímero de nylon en las alfombras en unidades de monómero con un proceso llamado despolimerización. Las etapas químicas y mecánicas específicas y los monómeros recuperados dependen del tipo de nylon. Se consideran dos procesos alternativos de despolimerización para abordar el reciclaje. Uno de los procesos de reciclaje, aquí llamado DepolyCapro, involucra la despolimerización del Nylon 6 a Caprolactam (Cp). El otro proceso, aquí llamado DepolyHMD, implica la despolimerización tanto del Nylon 6 como del Nylon 6.6 a Hexamethylene Diamine (HMD).

Cuando se consideran las instalaciones que implementan DepolyCapro, los productos recuperados deben clasificarse. En este caso, el Nylon 6 debe separarse del Nylon 6.6. Las alfombras no deseadas y los residuos del proceso de reciclaje generan dos corrientes principales de materiales: una que se puede utilizar como mejorador del suelo y otra que se debe desechar directamente en basurales. Por otro lado, para las instalaciones que implementan DepolyHMD, los productos recuperados (alfombras de Ny 66 y Ny6) deben triturarse. Tras el proceso de trituración y reciclaje, se obtienen tres corrientes principales de materiales: una que se puede utilizar como potenciador del suelo, otra que se puede utilizar para el relleno de muebles y la última que se debe desechar directamente en basurales. Los residuos se depositan en basurales mediante el pago de la tasa correspondiente. En la Figura 1 se muestran las materias primas y los flujos de recursos que se obtienen tras el proceso de reciclaje. Los residuos de los procesos de reciclaje en general se eliminan en un vertedero local.

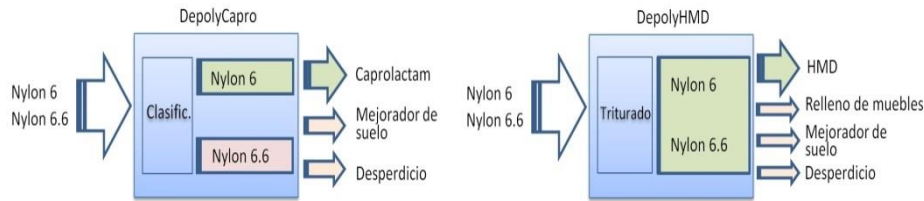


Fig. 1. Representación esquemática de ambos procesos de recuperación.

Las decisiones de diseño y planificación más importantes para el problema abordado son: a) la estructura de la red; en otras palabras, la ubicación de las entidades de la red directa e inversa; b) el proceso de reciclaje que se realizará en cada entidad de reciclaje; c) la cantidad necesaria de nuevas materias primas que se van a emplear en la producción de alfombras; d) las tasas de producción y los volúmenes de material que manejan las entidades.

El objetivo del problema es maximizar el beneficio total de la red considerando el diseño y planificación de la cadena de suministro de lazo cerrado. Las decisiones relacionadas con la estructura de la red deben determinarse al comienzo del horizonte temporal, mientras que las decisiones de planificación deben realizarse en cada período de tiempo. La CLSC incluye proveedores de materias primas ( $I^s$ ), fábricas ( $I^f$ ), almacenes ( $I^w$ ), clientes ( $I^c$ ), centros de recolección ( $I^{cl}$ ), centros de recuperación de materias primas ( $I^p$ ) y las ubicaciones de lugares para depositar los residuos finales ( $I^{fd}$ ) (ver Figura 2).

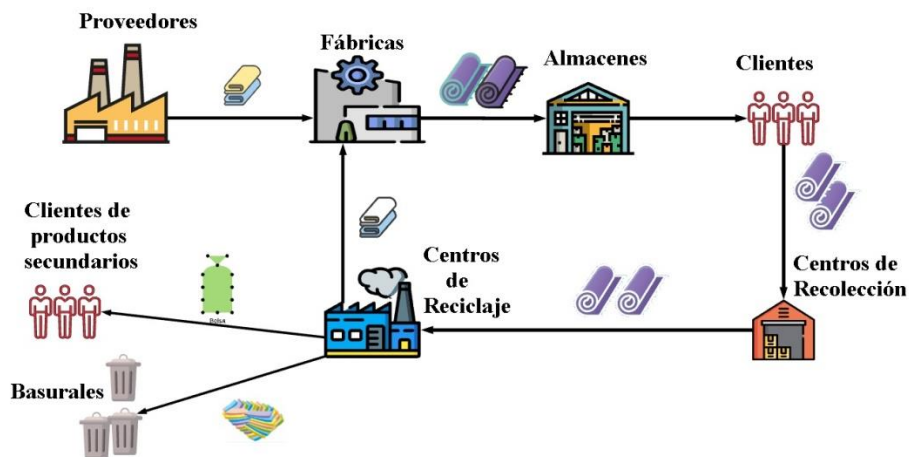


Fig. 2. Representación esquemática de una CLSC de la industria de las alfombras.

### 3 Formulación

Este trabajo introduce un modelo MILP que permite representar el problema de diseño y planificación mientras se maximiza el beneficio total de la CLSC. El modelo

se construye teniendo en cuenta las siguientes hipótesis: a) el horizonte de planificación se divide en varios períodos de tiempo; b) múltiples productos fluyen a través de la red; c) se imponen capacidades de transporte mínimas y máximas; d) se debe determinar si una entidad puede o no almacenar materiales/productos; e) las capacidades de almacenamiento de las entidades tienen límites mínimos y máximos; f) se imponen niveles máximos y mínimos de procesamiento de plantas y centros de reprocesamiento; g) se consideran diferentes procesos de despolimerización para el reciclaje de productos al final de su vida útil; h) cada centro de reciclaje adopta solo un proceso de despolimerización; i) Cp y HMD se consideran materias primas limitadas para la fabricación de productos finales; j) según el proceso de reciclaje, se generan diferentes flujos de materiales; k) se debe determinar la cantidad de Cp y HMD recuperada de las alfombras; l) los materiales recuperados (Cp y HMD) se destinan a la fabricación de alfombras nuevas; m) los costos unitarios de transporte, compra, almacenamiento, instalaciones y los ingresos por la venta de materiales recuperados son conocidos y fijos; n) se conocen los precios de las materias primas y los productos finales; o) algunos clientes pueden no recibir productos; p) los clientes incluidos en la red deben recibir una cantidad mínima de productos; q) los productos secundarios (el relleno para muebles y el mejorador de suelos) están destinados a terceros.

Teniendo en cuenta los supuestos del problema, a continuación se presenta la formulación matemática. La estructura del modelo para abordar el problema de diseño y planificación de CLSCs de la industria de las alfombras es la siguiente:

Maximizar: Beneficio neto (ingresos – costos fijos y operativos);  
 Sujeto a: balances de flujo entre sitios de la red directa;  
 balances de flujo entre sitios de la red inversa;  
 restricciones de capacidad;  
 restricciones lógicas.

El modelo es de tipo MILP. Desafortunadamente, debido a las limitaciones de espacio, solo se detallan las principales restricciones asociadas con ciertos costos y los balances de materiales. Las limitaciones típicas asociadas con el costo, la capacidad y la lógica se pueden encontrar en otros trabajos que abordan problemas similares (por ejemplo, Salema y col., 2010).

La función objetivo (1) consiste en maximizar el beneficio total del ciclo de vida. La utilidad de la red (*NetProfit*) es la suma de los ingresos por la venta de alfombras (*SRC*) menos los costos fijos y operativos considerando el flujo directo e inverso de materiales y productos. *COEPR* es el costo de apertura de centros de reciclaje en la red considerando una cierta capacidad de procesamiento. *CP* representa el costo de instalar un determinado tipo de proceso en los centros de reciclaje. *CSr* y *CG* son los costos de clasificación y molienda de alfombras recuperadas en los centros de reciclaje, respectivamente. *CRM* es el costo de compra de materias primas (Cp, HMD y los materiales adicionales necesarios para formar todas las capas que componen las alfombras). *CS* denota los costos de envío de materiales entre cada par de entidades vinculadas. *CFST* representa el costo fijo para establecer la capacidad de almacenamiento en las entidades de la red. *CST* denota el costo de almacenamiento dependien-

do de la cantidad de materiales almacenados.  $CW$  es el costo de desechar productos en los vertederos locales.  $COE$  denota el costo de considerar proveedores, fábricas, almacenes y centros de recolección en la red.

$$NetProfit = SRC - COEPR - CP - CSr - CG - CRM - CS - CFST - CST - CW - COE \quad (1)$$

La restricción (2) establece los ingresos por la venta de alfombras. El parámetro  $spc_{jt}$  representa el precio de venta del producto final  $j$  en el período de tiempo  $t$ . La variable  $H_{ii'jt}$  representa el flujo de productos  $j$  entre las entidades  $i$  e  $i'$  en el período de tiempo  $t$ .  $I^w$  es el conjunto de posibles almacenes.  $I^c$  es el conjunto de posibles clientes.  $J$  es el conjunto de productos finales que fluyen por la red.  $T$  es el conjunto de períodos de tiempo considerados.

$$SRC = \sum_{i' \in I^c, i \in I^w, j \in J, t \in T} spc_{jt} * H_{ii'jt} \quad (2)$$

En este modelo, los costos  $COEPR$  y  $CP$  son de especial interés dado que se debe determinar el proceso y la capacidad de reciclaje. La restricción (3) determina el costo de apertura de centros de reciclaje considerando una cierta capacidad de procesamiento.  $I^p$  es el conjunto de posibles centros de reciclaje. El parámetro  $cforp_{icp}$  representa el costo de apertura de un determinado centro de reciclaje  $i$  con una determinada capacidad  $cp$ . La variable binaria  $yrp_{icp}$  es igual a 1 si el centro de reciclaje  $i$  se abre con una capacidad  $cp$ .  $CaP$  es el conjunto de capacidades posibles de los centros de recuperación. La restricción (4) establece el costo de instalación de un determinado tipo de proceso en los centros de reciclaje. El parámetro  $crp_{ip}$  representa el costo de apertura de un determinado centro de recuperación  $i$  con un tipo de proceso  $p$ . La variable binaria  $yrpp_{ip}$  es igual a 1 si el centro de reciclaje  $i$  se abre y realiza un procesamiento tipo  $p$ .  $PR$  es el conjunto de posibles procesos para los centros de recuperación.

$$COEPR = \sum_{i \in I^p, cp \in CaP} cforp_{icp} * yrp_{icp} \quad (3)$$

$$CP = \sum_{i \in I^p, p \in PR} crp_{ip} * yrpp_{ip} \quad (4)$$

Las actividades de clasificación se llevan a cabo solamente en ciertos procesos en los centros de reciclaje. El cálculo del costo de clasificación se realiza considerando las restricciones (5) y (6).  $CfSr_i$  es el costo de clasificación en el centro de reciclaje  $i$ . El parámetro  $cfstr_{ip}$  representa el costo fijo de considerar la actividad de clasificación en el centro de recuperación  $i$  con el tipo de proceso  $p$ .

$$CSr = \sum_{i \in I^{rp}} Cfsr_i \quad (5)$$

$$Cfsr_i = \sum_{p \in PR} cfsrt_{ip} * yrpp_{ip} \quad \forall i \in I^{rc} \quad (6)$$

La actividad de triturado se lleva a cabo solamente para ciertos procesos en los centros de reciclaje. El costo de molienda se tiene en cuenta en las restricciones (7) y (8).  $CfG_i$  es el costo de molienda en el centro de reciclaje  $i$ . El parámetro  $cgr_{ip}$  representa el costo fijo de considerar la actividad de molienda en el centro de recuperación  $i$  con el proceso  $p$ .

$$CG = \sum_{i \in I^{rp}} CfG_i \quad (7)$$

$$CfG_i = \sum_{p \in PR} cgr_{ip} * yrpp_{ip} \quad \forall i \in I^{rc}, \quad (8)$$

Las ecuaciones (9) y (10) imponen los niveles mínimos ( $dmin_{ijt}$ ) y máximos ( $dmax_{ijt}$ ) de satisfacción de la demanda para un producto final  $j$  dado en el período de tiempo  $t$  cuando el cliente  $i$  está incluido en la red. La variable binaria  $yc_i$  es igual a 1 si el cliente  $i$  obtiene productos de los almacenes.

$$\sum_{i' \in I^w} H_{i'ijt} \geq dmin_{ijt} * yc_i \quad \forall i \in I^c, \forall j \in J^f, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i' \in I^w} H_{i'ijt} \leq dmax_{ijt} * yc_i \quad \forall i \in I^c, \forall j \in J^f, \forall t \in T \quad (10)$$

Las restricciones (12) y (13) son ecuaciones de balance de materiales para la red directa. Mientras que la restricción (12) representa el balance en el período de tiempo  $tI$ , la restricción (13) caracteriza el balance de materiales en cualquier período de tiempo después de  $tI$ , considerando el flujo de productos devueltos por las entidades de la red inversa directamente vinculadas a la red directa. La variable  $S_{ijt}$  representa el nivel de almacenamiento de producto  $j$  en la entidad  $i$  en el período de tiempo  $t$ . Vale la pena señalar que las variables  $H_{i'ij(t-1)}$  y  $S_{ij(t-1)}$  en la restricción (13) representan el flujo de productos y el nivel de almacenamiento en un período de tiempo anterior ( $t-1$ ). La relación entre los productos  $j$  que entran a una determinada entidad  $i$  y los productos  $j'$  que salen de la entidad se consideran en el conjunto  $PP$  y el parámetro  $rbp_{jj'}$ .  $PE^{fn}$  es el conjunto de pares de entidades  $i$  e  $i'$  de la red directa.  $PE^{rf}$  es el conjunto de pares de entidades  $i$  e  $i'$  que vinculan la cadena inversa con la directa.  $IJ$  es el conjunto de pares de entidades  $i$  y productos  $j$  permitidos.  $I^{fn}$  es el conjunto de posibles entidades de la red directa.

$$rbp_{jj'} \sum_{\substack{i:(i,i) \in PEf^n \\ \forall (j,j') \in PP, \forall (i,j) \in IJ, \forall i \in I^n, \forall t \in T/\{t_1\}}} H_{vijt} = \sum_{i:(i,i) \in PEf^n} H_{i'j't} + S_{ij't} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} rbp_{jj'} \sum_{i:(i,i) \in PEf^n} H_{vijt} + rbp_{jj'} \sum_{i:(i,i) \in PEf^n} H_{vij(t-1)} \\ = \sum_{i:(i,i) \in PEf^n} H_{i'j't} + S_{ij't} - S_{ij(t-1)} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\forall (j,j') \in PP, \forall (i,j) \in IJ, \forall i \in I^n, \forall t \in T/\{t_1\}$$

La restricción (14) fuerza la tasa de recuperación de los productos al final de su vida útil. El parámetro  $rr_j$  es la tasa de recuperación de las alfombras usadas.  $I^{cl}$  es el conjunto de posibles centros de recolección.

$$rr_j \sum_{i \in I^w} H_{vijt} = \sum_{i \in I^{cl}} H_{i'j't} \quad \forall j \in J^f, \forall i \in I^{cl}, \forall t \in T \quad (14)$$

Las restricciones (15) y (16) son las ecuaciones de balance para los centros de recolección en la red inversa en el período de tiempo  $tI$  y el resto de los períodos de tiempo (distintos de  $tI$ ), respectivamente.  $I^{rp}$  es el conjunto de posibles centros de reciclaje.

$$\sum_{i \in I^c} H_{vijt} = \sum_{i \in I^{rp}} H_{i'j't} + S_{ij't} \quad \forall j \in J^f, \forall i \in I^{cl}, \quad \forall t \in T/\{t_1\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I^c} H_{vijt} = \sum_{i \in I^{rp}} H_{i'j't} + S_{ij't} - S_{ij(t-1)} \quad \forall j \in J^f, \forall i \in I^{cl}, \\ \forall t \in T/\{t_1\} \end{aligned} \quad (16)$$

Las restricciones (17) y (18) son las ecuaciones de balance total para los centros de reciclaje en la red inversa en el período de tiempo  $tI$  y el resto de los períodos de tiempo, respectivamente.  $HS_{ij}$  es el flujo de materiales recuperados  $j$  que no se pueden utilizar como materias primas para alfombras nuevas en la entidad  $i$  en el período de tiempo  $t$ .  $J^m$  es el conjunto de materias primas.  $J^{rp}$  es el conjunto de materiales recuperados que no se pueden utilizar como materias primas para alfombras nuevas.  $I^f$  es el conjunto de posibles fábricas.



$$\sum_{i \in I^{cl}, j \in J^f} H_{i'ijt} = \sum_{i \in I^f, j \in J^{rm},} H_{i'ijt} + \sum_{j \in J^{rm},} S_{ijt} + \sum_{j \in J^{sp},} HS_{ijt} \quad \forall i \in I^{rp}, \forall t \in T \setminus \{t_1\} \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I^{cl}, j \in J^f} H_{i'ijt} = \sum_{i \in I^f, j \in J^{rm},} H_{i'ijt} + \sum_{j \in J^{rm},} S_{ijt} - \sum_{j \in J^{rm},} S_{ij(t-1)} + \sum_{j \in J^{sp},} HS_{ijt} \quad \forall i \in I^{rp}, \forall t \in T \setminus \{t_1\} \quad (18)$$

Las restricciones (19) a (21) son ecuaciones de balance parcial para productos y procesos en los centros de reciclaje. Dado que la proporción y el tipo de materiales recuperados dependen del proceso de reciclado, las restricciones (19) a (21) obligan al flujo de materiales recuperados a estar en concordancia con el proceso realizado. El parámetro  $rrm_{pj}$  es el porcentaje de material  $j$  recuperado del material  $j'$  según el proceso de reciclaje  $p$ .

$$HS_{ijt} + \sum_{i \in I^f} H_{i'ijt} + S_{ijt} \leq \sum_{i \in I^{cl}, j \in J^f} rrm_{pj} H_{i'ijt} + BM(1 - yrpp_{ip}) \quad \forall j \in (J^{rm} \cup J^{sp}), \forall i \in I^{rp}, \forall p \in PR, \forall t \in T \setminus \{t_1\} \quad (19)$$

$$HS_{ijt} + \sum_{i \in I^f} H_{i'ijt} + S_{ijt} - S_{ij(t-1)} \leq \sum_{i \in I^{cl}, j \in J^f} rrm_{pj} H_{i'ijt} + BM(1 - yrpp_{ip}) \quad \forall j \in (J^{rm} \cup J^{sp}), \forall i \in I^{rp}, \forall p \in PR, \forall t \in T \setminus \{t_1\} \quad (20)$$

$$HS_{ijt} \leq \sum_{i \in I^{cl}, j \in J^f} rrm_{pj} H_{i'ijt} + BM(1 - yrpp_{ip}) \quad \forall j \in J^{sp}, \forall i \in I^{rp}, \forall p \in PR, \forall t \in T \quad (21)$$

#### 4 Caso de estudio

En este trabajo se toma como referencia, y luego se modifica para ilustrar la aplicación de la formulación desarrollada, el caso de estudio de un sistema de producción inversa de alfombras introducido por Realff y col. (2004). La superestructura considerada está compuesta por 8 proveedores, 7 fábricas, 16 almacenes, 30 clientes, 13 cen-

tros de recolección, 5 centros de reciclaje y 5 lugares para depositar los residuos. Se considera un horizonte de planificación de 15 años dividido en 3 períodos de 5 años.

El problema consiste en optimizar el diseño y planificación de la CLSC mientras se maximiza el beneficio total de la red. También se asume que los productos al final de su vida útil se recolectan de los clientes y se transportan a las siguientes entidades de la red (centros de recolección), con una tasa de devolución que depende del tipo de producto. Las fábricas producen solo alfombras de Nylon 6 y Nylon 6.6. Las materias primas recuperadas por los centros de reciclaje son Cp y HMD. El mejorador de suelo y el relleno para muebles constituyen productos secundarios que no se utilizan para la fabricación de nuevas alfombras. Mientras que el relleno para muebles se vende a un precio modesto a las fábricas de muebles, el mejorador de suelo se entrega a una tienda de jardinería local. Los precios de la CP y HMD son \$ 1,98 y \$ 1,8 por libra, respectivamente. Los precios de venta de las alfombras de Nylon 6 y Nylon 6.6 son de \$ 10.6 y \$ 11.4 por libra, respectivamente. Las actividades que se deben realizar en los centros de recuperación dependen del proceso de reciclaje. Las materias primas y los flujos de recursos que se obtienen de los procesos de reciclaje son los indicados en la Figura 1. Los residuos de los procesos de reciclaje se eliminan en vertederos locales. Debido a limitaciones de espacio, el conjunto completo de parámetros no se puede informar en el trabajo actual.

En la Tabla 1 se muestran diferentes casos resueltos considerando diversos límites para las tasas de recuperación de los productos al final de su vida útil (CS0-CS5). CS0 es la instancia sin recuperación de productos finales. Las instancias CS1 a CS5 tienen diferentes tasas de recuperación de los productos. Además, se resuelven otras instancias del problema en donde se considera el aumento y la disminución de los precios de venta de alfombras (CS6 y CS7) y de los precios de compra de las materias primas (CS8 y CS9).

**Tabla 1.** Características del caso.

Caso	Tasa de recuperación de alfombras	
	Ny6	Ny6,6
CS0	0%	0%
CS1	50%	50%
CS2	75%	50%
CS3	50%	75%
CS4	75%	75%
CS5	85%	85%

## 5 Resultados computacionales

El modelo MILP propuesto se codificó en el software de optimización GAMS (versión 34) y todos los cálculos se ejecutaron con el resolutor CPLEX 20.1, en una computadora personal con procesador Intel Core i7 de 3.60 GHz y 16 GB de memoria RAM, para una tolerancia relativa de 0.1%. Para los casos de estudio resueltos en las siguientes secciones, el modelo contiene 32902 restricciones, 7883 variables conti-

nuas, 141 variables binarias. Los tiempos de solución oscilan entre 150 y 1430 s. de tiempo de CPU.

### 5.1 Resultados para diferentes niveles de tasa de retorno

Las características de las soluciones encontradas por la formulación para los casos CS0 a CS5 se detallan en las Tablas 2 a 4. Dados los costos y precios de los productos, se puede observar que mientras aumenta la tasa de productos recuperados, el beneficio económico disminuye. El análisis de las soluciones ayuda al tomador de decisiones a elegir el mejor punto de trabajo de la empresa teniendo en cuenta, además del beneficio económico, el cumplimiento de la normativa medioambiental y otros objetivos medioambientales asociados con la política de sustentabilidad de la empresa.

**Tabla 2.** Función objetivo, ingresos y costos para los casos CS0 a CS5

Caso	FO [\$]	Ingresos [\$]	Costos [\$]							
			Instalaciones	Recolección	Compra	Desperdicio	Clasificación	Molienda	Transporte DN*	Transporte RN*
CS0	193601961	384827492	124110000	0	65639749	0	0	0	1265782	0
CS1	170307702	400586344	128641410	364617	69318270	258617	0	180878	1175811	599034
CS2	158005338	359882859	111062840	406030	62233973	291491	117717	79578	1025496	715396
CS3	118136799	300689847	98277604	342896	52371964	190913	0	162153	869479	563040
CS4	115219728	306130836	100047614	417730	53109351	252512	77129	122441	918665	650667
CS5	94186052	281880322	98946174	436050	49162348	269203	116702	94888	742847	611058

\* El costo de transporte de productos en la red directa (DN) y la red inversa (RN)

Desde el punto de vista medioambiental, cabe señalar que el caso CS5 utiliza un 45,3% menos de materias primas nuevas que el caso CS0, mientras que la cantidad de productos finales entregados a los clientes en el caso CS5 se reduce solo un 26,8%.

**Table 3.** Materias primas necesarias y productos finales elaborados para los casos CS0 a CS5

Caso	Materia prima comprada [lb]		Materia prima recuperada [lb]		Alfombras producidas [lb/ ft <sup>2</sup> ]	
	Cp	HMD	Cp	HMD	CN6	CN66
CS0	3423000	3231002	0	0	18015789	17005274
CS1	2487639	3346683	1688189	0	18847676	17614121
CS2	2273000	2977048	1473140	0	17100000	15668672
CS3	1892591	2159600	1200000	600000	13878667	13471577
CS4	1909280	2196973	1200000	600000	14180421	13668278
CS5	1665000	1972642	837703	900000	13162434	12487590

Considerando la estructura de la red, CS0 es el caso que incluye el mayor número de clientes satisfechos. El número de clientes disminuye gradualmente de 28 a 22 al aumentar la tasa de devolución. Además, se puede observar en la Tabla 4 que, teniendo en cuenta los casos con devolución de producto final (CS1 a CS5), el número de centros de recolección se mantiene prácticamente sin cambios.

**Table 4.** Estructuras de red óptimas para los casos CS0 a CS5

Caso	Número de entidades					
	Proveedores	Fábricas	Almacenes	Clientes	Centros de Recolección	Centros de Reciclaje
CS0	7	7	12	28	0	0
CS1	7	7	16	26	12	2
CS2	7	6	16	24	13	2
CS3-CS4	6	5	16	23	13	3
CS5	5	5	10	22	13	3

## 5.2 Resultados para diferentes niveles de precios de alfombras y materias primas

Los resultados para los casos considerados en este apartado se encuentran en las Tablas 5 a 7. Teniendo en cuenta la variación en los precios de venta de las alfombras respecto del caso CS0 (CS6: -10% y CS7: + 10%), se puede observar que las estructuras de las redes permanecen casi sin cambios. Sin embargo, cabe señalar que cuando el precio aumenta, la cantidad de clientes atendidos disminuye mientras se mantiene un nivel de manufactura de productos finales similar al caso CS6. Otra diferencia entre los resultados analizados es el tipo de proceso de reciclaje utilizado. Mientras que en el caso CS6 se abren tres centros de reciclaje de tipo DepolyHMD, en el caso CS7 uno de los centros es de tipo DepolyCapro.

Por otro lado, teniendo en cuenta la variación en el precio de compra de las materias primas (CS8: -30% y CS9: + 30%), se observa que el beneficio obtenido en ambos casos cambia. Sin embargo, el flujo de materiales/productos finales es similar.

**Table 5.** Función objetivo, ingresos y costos para los casos CS6 a CS9

Caso	FO [\$]	Ingresos [\$]	Costos [\$]							
			Instalaciones	Recolección	Compra	Desperdicio	Clasificación	Mo-lienda	Transporte DN*	Transporte RN*
CS6	59727651	250460909	100047614	417774	53114777	252548	0	199592	767175	618777
CS7	171086143	361870132	100047614	417777	53115156	252551	97829	101764	813196	623101
CS8	117587123	306135562	100047614	417737	50797237	252517	95144	104429	934804	583957
CS9	112845099	306145985	100047614	417750	55424795	252528	118013	81567	954420	689199

**Table 6.** Materias primas necesarias y productos finales producidos para los casos CS6 a CS9

Caso	Materia prima comprada [lb]		Materia prima recuperada [lb]		Alfombras producidas [lb/ ft <sup>2</sup> ]	
	Cp	HMD	Cp	HMD	CN6	CN66
CS6	1909280	2197528	1200000	600000	14180421	13671201
CS7	1909280	2197567	1200000	600000	14180421	13671405
CS8	1909280	2197052	1200000	600000	14180421	13668693
CS9	1909280	2197225	1200000	600000	14180421	13669607

Además, en la Tabla 7 se puede ver que el número de entidades de red para los casos CS8 y CS9 es igual. Sin embargo, después de analizar las soluciones en detalle, se puede observar que las entidades seleccionadas son diferentes.

**Table 7.** Estructuras de red óptimas para los casos CS6 a CS9

Caso	Número de entidades					
	Proveedores	Fábricas	Almacenes	Clientes	Centros de Recolección	Centros de Reciclaje
CS6	6	5	16	21	13	3
CS7	6	5	16	20	13	3
CS8-CS9	6	5	16	22	13	3

## 6 Conclusión

En este trabajo se presentó un enfoque MILP para abordar el diseño y la planificación de CLSCs de la industria de las alfombras. La formulación considera la integración simultánea del flujo directo e inverso de los productos. El problema abordado implica determinar la estructura de la red, la planificación del suministro, producción, transporte, recolección y reciclaje para cada unidad de tiempo del horizonte de planificación. Una ventaja importante del enfoque propuesto es permitir una mejor comprensión del comportamiento de la red considerando todo el ciclo de vida de las alfombras y las diferentes opciones para recuperar las materias primas. El objetivo de la formulación es maximizar el beneficio total del ciclo de vida.

La relevancia de la formulación se mostró tomando como base un caso industrial que involucra la recuperación de materias primas a partir de alfombras desechadas por los clientes. A través de los experimentos numéricos resueltos con la formulación propuesta, se analizó el impacto relativo de las tasas de recuperación y los precios de las materias primas y de los productos finales en la estructura, ingresos, costos y flujos de los productos.

Para preservar la competitividad de la organización ante mayores presiones ambientales, la empresa debe buscar alternativas para mejorar la eficiencia económica y ambiental de la recuperación de materias primas. Una alternativa clave en este sentido es mejorar los diseños de las alfombras para que al final de su vida útil la empresa pueda obtener no solo importantes ahorros en el consumo de nuevas materias primas y energía, sino también reducciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero. Como trabajo futuro, se buscará la extensión del enfoque para considerar el diseño de los productos, junto con el diseño y la planificación de la CLSC. Además, se espera incorporar al modelo la producción de alfombras de otros materiales y de sus procedimientos alternativos de reciclaje.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de ANPCyT - PICT-2018-01292, de “Universidad Nacional del Litoral” - CAI+D 2020 - 506 201901 00101 y de “Universidad Tecnológica Nacional-SCTyP” - PID SIUTIFE0007768TC.

## Referencias

1. Ammons, J.C., Realf, M.J., Newton, D. and Cerav, S. (1999) Determining reverse production systems infrastructure for electronic assemblies, in Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, IEEE Piscataway, NJ, pp. 257–262.
2. Bird L. (2014). Carpet recycling UK conference. Disponible en: [http://www.carpetrecyclinguk.com/downloads/27\\_percent\\_landfil\\_diversion\\_how\\_the\\_UK\\_ceedd\\_its\\_targets\\_two\\_years\\_early\\_Laurance\\_Bird\\_and\\_Jane\\_Gardner\\_Carpet\\_Recycling\\_UK.pdf](http://www.carpetrecyclinguk.com/downloads/27_percent_landfil_diversion_how_the_UK_ceedd_its_targets_two_years_early_Laurance_Bird_and_Jane_Gardner_Carpet_Recycling_UK.pdf).
3. Deutsche Umwelthilfe, (2017). Swept under the Carpet: The Big Waste Problem of the Carpet Industry in Germany. Will Rose, [www.rosesjolander.com](http://www.rosesjolander.com).
4. Flapper, S.D.P., Kip, B.J., Louwers, D., Peters, G. and Souren, F. (1997). A location-allocation model for the re-use of carpet materials. Technical report, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands.
5. Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R. and Flapper, S.D.P. (2000). A characterization of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28, 653–666.
6. Jain A, Pandey G, Singh AK, Rajagopalan V, Vaidyanathan R, (2012). Singh RP. Fabrication of structural composites from waste carpet. *Adv Polym Technol*. 31, 380–389.
7. Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F.(2009). Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.
8. Mirafab M, Horrocks R, Woods C. (1999). Carpet waste, an expensive luxury we must do without!. *Autex Res J*. 1:1–7.
9. Mirafab, M, Mirzababaei, M. (2009). Carpet waste utilisation, an awakening realisation: a review. In: 2nd international symposium on fiber recycling.
10. Realf, M., Jane, C. Ammons, D.J. (2004). Robust reverse production system design for carpet recycling, *IIE Transactions* 36(8):767-776.
11. Realf M., Lemieux, P., Lucero, S., Mulholland, J., Smith, P.B. (2005). Characterization of transient puff emissions from the burning of carpet waste charges in a rotary kiln combustor. In: Presented at the IEEE 47th cement industry technical conference.
12. Salema, M.I., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A., (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2): 336-349.