

# Diseño Óptimo de la Cadena de Suministros de Papel

**Resumen:** En nuestro país la cadena de suministros (CS) del papel requiere de inversiones a fin de incrementar las capacidades instaladas, buscando la integración de sus eslabones. En este trabajo se evalúa el diseño integral de esta CS, compuesta por plantaciones que pueden producir diferentes especies de madera, plantas de pulpas y de papel que pueden ser instaladas en diversas localizaciones, y plantas integradas que desarrollan ambos procesos en la misma ubicación. Se contempla la instalación de diferentes procesos en cada nodo para la obtención de diversos tipos de papel. Se propone un modelo matemático mixto entero lineal para optimizar la CS determinando la localización de nodos, tamaño, procesos, y flujos de materiales a fin de minimizar los costos totales y satisfacer la demanda. El mismo es implementado en el sistema GAMS y validado mediante un caso de estudio. La solución óptima se alcanza en 0,219 [seg], arrojando un costo total de 13.660 millones de pesos anuales.

**Palabras Claves:** Cadena de Suministros; Optimización; Papel; MILP.

**Abstract:** The Argentinean paper supply chain (SC) requires investments in order to increase the installed capacities, looking for its nodes integration. The global paper SC design is evaluated in this work, considering the following nodes: raw material sites where different wood species can be obtained, pulp and paper separate plants that can be installed in different locations, and integrated plants which produce both pulp and paper in the same industrial complex. In any node, the installation of different processes is considered in order to obtain different types of papers. A mixed integer linear programming (MILP) model for the optimal paper supply chain design is proposed in this work, considering decisions such as the nodes locations, the produced quantities, the processes, and the materials flows from one node to other in the network, in order to minimize the total costs, such that the demand of different types of papers is satisfied. The proposed MILP model is implemented in GAMS system and efficiently solved considering a case study. The optimal solution is obtained in 0,219 seconds with a total cost of 13.660 million Argentinean pesos by year.

**Keywords:** Supply Chain; Optimization; Paper; MILP.

**María Agustina Muñoz, Sofía Pitashny**

GEMPRO, Grupo de Estudio para la Mejora de Procesos Organizacionales, Departamento de Ing. Industrial, Facultad Regional Santa Fe, UTN – Lavaisse 610, Santa Fe – Tel: 4601579 - int: 267.

Mail: magustina.munoz@gmail.com, sofiapitashny@gmail.com, r\_analia@santafe-conicet.gov.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección de la Dra. María Analía Rodríguez y el Mg. Víctor César Tucci, en el marco del proyecto "MODELOS DE COSTOS PARA LA GESTION LOGISTICA EN CADENAS DE SUMINISTROS". (01/01/2015 – 31/12/2017).

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las empresas se desenvuelven en mercados exigentes y competitivos, en los cuales resulta fundamental ofrecer productos o servicios de calidad, en el tiempo y lugar requeridos por los clientes, y al menor costo posible (Ballou, 2004). En este contexto, cobra importancia el concepto de cadenas de suministros, dado que se vuelve esencial la integración, coordinación y colaboración entre los distintos eslabones que componen una CS, a fin de lograr una configuración óptima de la misma que permita incrementar la productividad y los beneficios de los empresarios, ofreciendo al mismo tiempo un buen nivel de servicio a un costo accesible (Papageorgiou, 2009).

En este trabajo, particularmente, se analiza la CS del papel a partir de pasta de madera. En Argentina, es evidente la necesidad de proponer mejoras y fomentar las inversiones en este sector industrial debido a dos razones. Por un lado, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (2013) la balanza comercial forestal es históricamente deficitaria, siendo la rama de la celulosa y el papel uno de los principales causantes de este saldo negativo. Si bien en 2014 se incrementó el porcentaje de exportaciones de esta rama, dicho aumento fue insuficiente frente al valor de las importaciones, y en consecuencia la balanza tuvo un déficit mayor a 600 millones de dólares (Brandán et al., 2015). Por otro lado, la falta de inversiones ha provocado que la Argentina se encuentre estancada en una producción de 980 mil tn de pulpa anuales, mientras que otros países de la región han alcanzado mayor producción, por ejemplo, 4,5 miles de millones de tn en Chile, 1,2 en Uruguay y 13,5 en Brasil (Ministerio de Industria, 2012). Esto evidencia un claro desaprovechamiento de recursos, máxime si se consideran las ventajas comparativas del país para la producción forestal, basadas en amplias extensiones de tierra y climas ideales para la plantación forestal y la

gran disponibilidad de agua, recurso fundamental para la elaboración de este tipo de productos.

Algunos trabajos de la literatura plantean una integración parcial de esta CS considerando productos energéticos pero en general contemplan una versión simplificada de su cartera de productos así como de la versatilidad de flujos involucrados. Waldemarsson et al. (2013) plantean la planificación integrada de la cadena de suministros considerando una empresa con múltiples plantas de pulpa de papel, con el propósito de mejorar la eficiencia energética de las mismas. De esta manera, consideran la reutilización de los residuos de dichas plantas para producir energía, que luego puede emplearse en el proceso de elaboración de pulpas, o bien venderse al mercado.

Bredström et al. (2004) estudian el problema de planificación de la cadena de suministros para un productor de pulpa que posee cinco plantas de celulosa, y desarrollan modelos matemáticos para optimizar las decisiones de la cadena de suministros de dicha compañía, como ser el transporte de materias primas, la programación de la producción y la distribución de los productos a los clientes.

Particularmente, en este trabajo se aborda la cadena de suministros del papel en su conjunto, considerando la totalidad de sus eslabones, que comprenden desde los bosques donde se obtiene la madera, hasta las plantas de elaboración de pulpa y la posterior fabricación de diversos tipos de papel.

Como objetivo se propone brindar una herramienta que permita obtener la configuración óptima de esta CS minimizando los costos involucrados, que incluyen costos variables de operación, costos de transporte y costos de inversión. Para ello, se desarrolla un modelo matemático utilizando programación mixta entera lineal (MILP), considerando los diversos nodos que

forman parte de esta red, los flujos de materiales entre ellos, y un conjunto de productos que abarca los diversos tipos de papel que se ofrecen en el mercado. A partir de este modelo, es posible analizar distintas alternativas a fin de decidir la instalación o no de plantas, sus tamaños y localizaciones óptimas, los productos a elaborar en cada una de ellas y las materias primas a emplear.

## DESARROLLO

### Descripción del problema considerado

En este trabajo se plantea una CS del papel que contempla 5 nodos: plantaciones, plantas de pulpa, plantas de producción de papel, plantas integradas y mercados de consumo (Figura 1).

Como se observa en la Figura 1, el flujo se inicia con la obtención de diferentes especies de madera en las plantaciones. Cada una posee un rendimiento asociado que indica la cantidad de toneladas de madera que pueden obtenerse por hectárea de superficie cultivada. Esto incide directamente en el costo de la materia

prima obtenida. Los rollizos de madera talados en cada plantación pueden enviarse a las plantas de producción de pulpa o a las plantas integradas. La diferencia entre éstas radica en que las últimas integran el proceso de producción de pulpa y la posterior fabricación del papel en un mismo lugar físico, mientras que las primeras elaboran solo la pulpa para luego comercializarla en fardos a plantas de papel o integradas.

La obtención de pasta puede darse tanto en fábricas integradas como en plantas de pulpa. El modelo propuesto contempla la selección de procesos de pulpa con diversos rendimientos, y a partir de distintas especies de madera. Esto deriva en la generación de pulpas de diferentes calidades y costos, las cuales se destinan a la elaboración de papel, ya sea en plantas de papel o integradas. A su vez, existe una gran diversidad de tipos de papeles que pueden destinarse a usos variados, y que poseen características diferentes vinculadas al proceso de fabricación y las especies de madera utilizadas, así como distintos costos de inversión y procesamiento.

Para la obtención de cada tipo de papel se contempla una receta que establece la proporción de

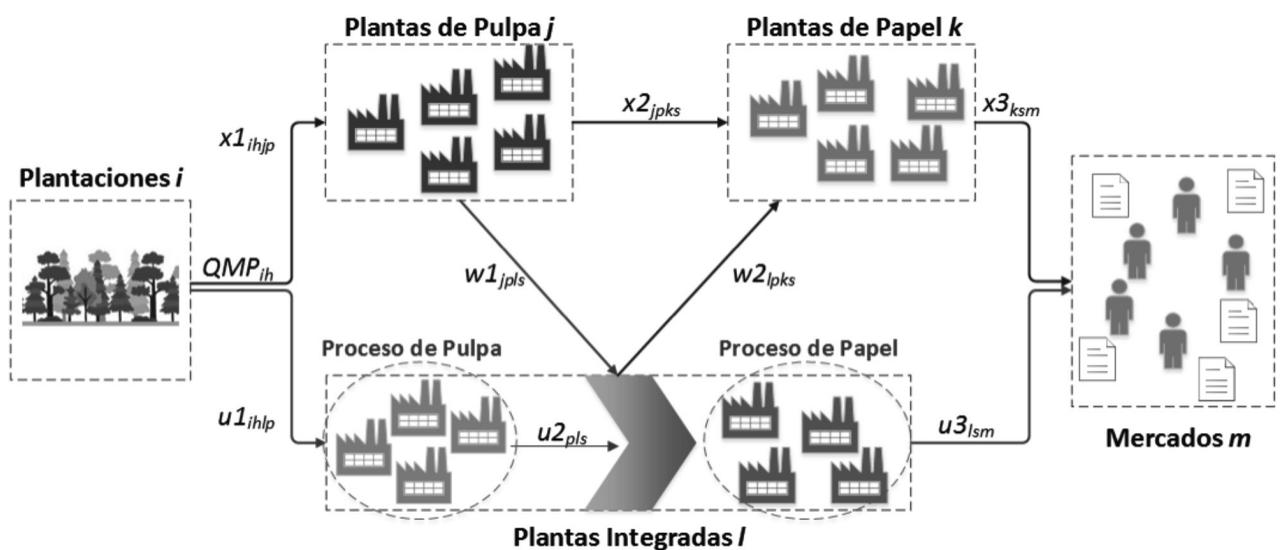


Fig. 1: Cadena de suministros del papel considerada.

cada pulpa que debe emplearse. Esto se funda en que los productos finales pueden constituirse de un único tipo de pasta o de una mezcla de ellas.

Para la CS planteada se asume que sólo puede ejecutarse un tipo de proceso por nodo, es decir, que en las plantas de pulpa se elabora un único tipo de pulpa y en las fábricas de papel puede fabricarse solo un tipo de producto final, mientras que las plantas integradas implican ambas decisiones. Es por ello que, dado que la producción de un tipo de papel puede requerir el empleo de una mezcla de pulpas, se contempla la posibilidad de que las plantas integradas por un lado comercialicen parte de la pulpa generada a otras plantas integradas o de papel, y por el otro, adquieran diferentes tipos de pastas celulósicas para ingresar al proceso de papel. En consecuencia, los flujos de pulpa parten desde plantas de pulpa o de las fábricas integradas, y se destinan a plantas integradas o a industrias de producción de papel. Por último, los distintos tipos de papeles se envían a mercados de consumo ubicados en diferentes sitios geográficos.

### Modelo Matemático

A continuación se presenta el modelo matemático propuesto para la optimización de la CS del papel. Se consideran los siguientes conjuntos: **I** plantaciones, **J** Plantas de Pulpa, **K** Plantas de Papel, **L** plantas Integradas de pulpa y papel, **M** mercados, **H** especies de madera, **P** tipos de pulpa y **S** tipos de papel. Se utilizan los subíndices *i* para hacer referencia a los nodos correspondientes a las plantaciones, *j* para las plantas de pulpa, *k* para las plantas de papel, *l* para las plantas integradas, *m* para los mercados. A su vez se utilizan los subíndices *h* para designar las especies de madera, *p* para las diferentes pulpas y *s* para los tipos de productos de papel.

### Variables de Decisión

Los flujos de materiales entre los nodos de la CS están representados con variables continuas positivas en [tn/año].  $QMP_{ih}$  representa la cantidad de madera de la especie *h* obtenida en la plantación *i*;  $x1_{ihjp}$  establece la cantidad de madera de la especie *h* enviada desde el sitio forestal *i* a la planta de pulpa *j* para producir la pulpa *p*;  $u1_{ihlp}$  la cantidad de madera de la especie *h* enviada desde la plantación *i* a la planta integrada de papel *l* para producir la pulpa *p*;  $x2_{jpls}$  la cantidad de pulpa *p* que se envía desde la planta *j* a la fábrica de papel *k* para producir el papel *s*;  $u2_{pls}$  la cantidad de pulpa *p* obtenida en la planta integrada *l* para producir el papel *s*;  $w1_{jpls}$  la cantidad de pulpa *p* enviada desde la planta *j* a la planta integrada de papel *l* para producir el tipo de papel *s*;  $w2_{lpks}$  la cantidad de pulpa *p* enviada desde la planta integrada *l* a la planta de papel *k* para producir el papel *s*;  $x3_{ksm}$  la cantidad de papel *s* enviada desde la planta *k* al mercado *m* y  $u3_{ism}$  la cantidad de papel *s* enviada desde la planta integrada *l* al mercado *m*.

Se utilizan variables binarias (0-1) para las decisiones discretas:  $y1_{ih}$  determina la inversión en la plantación *i* para obtener la madera de especie *h*;  $y2_{jp}$  la instalación del proceso de pulpa *p* en la planta de pulpa *j*;  $y3_{ks}$  la instalación de la planta de papel *k* para producir el producto *s*;  $y4_{lp}$  la instalación de la planta integrada *l* con el proceso de pulpa *p*;  $y5_{ls}$  la instalación de la planta integrada *l* para fabricar el papel *s*;  $y6_{lps}$  la instalación de la planta integrada *l* para producir la pulpa *p* y el papel *s*.

### Restricciones

La Ec. (1) representa el balance de masa de las plantaciones *i*. La cantidad de madera *h* de una plantación *i*,  $QMP_{ih}$ , debe ser igual a la cantidad enviada de esa madera a todas las plantas de pulpa *j* e integradas *l*.

$$QMP_{ih} = \sum_{j,p} x1_{ihjp} + \sum_{l,p} u1_{ihlp} , \quad \forall i, \forall h \quad (1)$$

La Ec. (2) asegura que se cumpla el balance de masa del proceso de pulpa  $p$  en la planta  $j$ ; el cual implica que la totalidad de la madera de las diferentes especies  $h$  recibida de todas las plantaciones  $i$ , multiplicada por el rendimiento del proceso de pulpa  $p$  para la madera  $h$  ( $\eta Pulpa_{hp}$ ), es igual a la totalidad de la pulpa  $p$  enviada a las plantas de papel  $k$  para producir los productos  $s$  más la totalidad de pulpa  $p$  enviada a todas las plantas integradas  $l$  para elaborar los productos  $s$ .

$$\sum_{i,h} x1_{ihjp} \cdot \eta Pulpa_{hp} = \sum_{k,s} x2_{jpks} + \sum_{l,s} w1_{jpls} \quad (2)$$

$, \forall j, \forall p$

En la Ec. (3) se contempla el balance de masa para la producción de papel  $s$  en la planta  $k$  con cada pulpa  $p$ . Indica que la sumatoria de pulpa  $p$  recibida de todas las plantas de pulpa  $j$  y de las plantas integradas  $l$ , afectada por el correspondiente rendimiento del proceso, es equivalente a la totalidad del papel del tipo  $s$  enviado a todos los mercados  $m$  multiplicada por la proporción de pulpa  $p$  requerida para producir el papel  $s$  ( $\delta_{ps}$ ).

$$\left( \sum_j x2_{jpks} + \sum_l w2_{lpks} \right) \cdot \eta Papel_{ps} = \delta_{ps} \cdot \sum_m x3_{ksm} , \quad \forall k, \forall s, \forall p \quad (3)$$

La Ec. (4) establece que la cantidad de pulpa  $p$  obtenida en la planta integrada  $l$  que debe destinarse a la producción de todos los tipos de papeles  $s$ , es igual al producto entre la cantidad de madera de distintas especies  $h$  recibida de las plantaciones  $i$ , y el rendimiento de la pulpa  $p$  para la madera  $h$  ( $\eta Int1_{hp}$ ).

$$\sum_{i,h} u1_{ihlp} \cdot \eta Int1_{hp} = \sum_s u2_{pls} \quad \forall l, \forall p \quad (4)$$

La Ec. (5) representa el balance de masa para el proceso de producción de papel  $s$  en una planta inte-

grada  $l$ . La cantidad de pulpa  $p$  ingresada al proceso de papel  $s$ , afectada por el rendimiento del mismo ( $\eta Int2_{ps}$ ), es equivalente a la cantidad total de papel  $s$  enviada desde la planta  $l$  hacia todos los mercados  $m$  multiplicada por la proporción de pulpa  $p$  necesaria para producir el papel  $s$  ( $\delta_{ps}$ ). Cabe aclarar que la pulpa  $p$  ingresada al proceso de papel  $s$  está dada por la suma de la cantidad de pulpa  $p$  producida en la planta integrada  $l$  y la cantidad recibida de la totalidad de las plantas  $j$ , menos la cantidad de pulpa  $p$  vendida a todas las plantas de papel  $k$ .

$$\left( u2_{pls} + \sum_j w1_{jpls} - \sum_k w2_{lpks} \right) \cdot \eta Int2_{ps} = \delta_{ps} \cdot \sum_m u3_{lsm} , \quad \forall l, \forall s, \forall p \quad (5)$$

Las Ecs. (6) a (10) impiden superar las capacidades de procesamiento en los diversos nodos. A modo de ejemplo, se menciona que la Ec. (7) indica que, en caso que se decida instalar la planta  $j$  para producir la pulpa  $p$ , la variable binaria  $y2_{jp}$  será 1, y por lo tanto la cantidad de madera de las diversas especies  $h$  recibida de las plantaciones  $i$ , no debe superar la capacidad de procesamiento  $CPulpa_{jp}$ . Si no se decide instalar la planta,  $y2_{jp}$  toma valor nulo al igual que la cantidad de madera recibida en dicha planta  $j$ .

$$CPlant_{ih} \cdot y1_{ih} \geq QMP_{ih} , \quad \forall i, \forall h \quad (6)$$

$$CPulpa_{jp} \cdot y2_{jp} \geq \sum_{i,h} x1_{ihjp} , \quad \forall j, \forall p \quad (7)$$

$$CPapel_{ks} \cdot y3_{ks} \geq \left( \sum_{j,p} x2_{jpks} + \sum_{l,p} w2_{lpks} \right) , \quad \forall k, \forall s \quad (8)$$

$$CInt1_{lp} \cdot y4_{lp} \geq \sum_{i,h} u1_{ihlp} , \quad \forall l, \forall p \quad (9)$$

$$CInt2_{ls} \cdot y5_{ls} \geq \sum_p u2_{pls} + \sum_{j,p} w1_{jpls} - \sum_{p,k} w2_{lpks} , \quad \forall l, \forall s \quad (10)$$

Las Ecs. (11) a (14) permiten obtener un solo tipo de producto en cada planta. Por ejemplo, la Ec. (11) indica que la planta de pulpa  $j$  puede elaborar una única pulpa  $p$ .

$$\sum_p y2_{jp} \leq 1, \quad \forall j \quad (11)$$

$$\sum_s y3_{ks} \leq 1, \quad \forall k \quad (12)$$

$$\sum_p y4_{lp} \leq 1, \quad \forall l \quad (13)$$

$$\sum_s y5_{ls} \leq 1, \quad \forall l \quad (14)$$

La Ec. (15) indica que, si se instala la planta integrada  $l$  para elaborar un cierto tipo de pulpa también debe producirse un tipo de papel. Las Ecs. (16) a (18) vinculan las variables binarias que indican la inversión en una planta integrada y la selección de pulpas y papeles a producir en dicha planta. La Ec. (16) obliga a que, si en una determinada planta integrada  $l$  se decide invertir para fabricar una cierta pulpa  $p$  ( $y4_{lp}=1$ ) y además se decide producir en esa planta el tipo de papel  $s$  ( $y5_{ls}=1$ ), entonces la variable  $y6_{lps}$  tomará el valor 1 para la pulpa  $p$  y el papel  $s$ . Si por el contrario, no se decide producir la pulpa  $p$  ( $y4_{lp}=0$ ) o no se decide

$$\sum_p y4_{lp} = \sum_s y5_{ls}, \quad \forall l \quad (15)$$

$$y6_{lps} \geq y4_{lp} + y5_{ls} - 1, \quad \forall l, \forall p, \forall s \quad (16)$$

$$y6_{lps} \leq y4_{lp}, \quad \forall l, \forall p, \forall s \quad (17)$$

$$y6_{lps} \leq y5_{ls}, \quad \forall l, \forall p, \forall s \quad (18)$$

$$CVar = \sum_{i,h}(cvPlant_{ih} \cdot QMP_{ih}) + \sum_{h,j,p}(cvPulpa_{hjp} \sum_i x1_{ihjp}) + \sum_{p,k,s}(cvPapel_{pks} \cdot (\sum_j x2_{jpks} + \sum_l w2_{lpks})) + \sum_{h,l,p}(cvInt1_{hlp} \cdot \sum_i u1_{ihlp}) + \sum_{p,l,s}(cvInt2_{pls} \cdot (u2_{pls} + \sum_j w1_{jp1s} - \sum_k w2_{lpks})) \quad (21)$$

producir el papel  $s$  ( $y5_{ls}=0$ ), la variable  $y6_{lps}$  será nula, de acuerdo a las Ecs. (17) y (18), respectivamente.

La Ec. (19) asegura la satisfacción de la demanda de todos los productos en los diversos mercados, los cuales se satisfacen por el papel proveniente de las plantas de papel  $k$  o las integradas  $l$ .

$$\sum_k x3_{ksm} + \sum_l u3_{lsm} \geq QD_{sm}, \quad \forall s, \forall m \quad (19)$$

### Función objetivo

El objetivo de este modelo es la minimización de costos totales  $CT$  que se componen por los costos variables de operación,  $CVar$ , los fijos de inversión,  $CF$ , y los de transporte,  $CTransp$ .

$$Min CT = CVar + CF + CTransp, \quad (20)$$

La Ec. (21) presenta los costos variables en los diversos nodos de la CS. Los parámetros utilizados en esta formulación son:  $cvPlant_{ih}$  que representan los costos de procesamiento en cada plantación  $i$  por tn de madera talada de la especie  $h$ ,  $cvPulpa_{hjp}$  que refiere a los costos de producción de pulpa  $p$  en cada planta  $j$  por tonelada de madera de especie  $h$ , y  $cvPapel_{pks}$  que indica el costo de elaboración del papel  $s$  en cada fábrica de papel  $k$  por tonelada de pulpa  $p$ . En el caso de las plantas integradas  $l$ , los costos variables se calculan por separado para cada proceso, refiriéndose el parámetro  $cvInt1_{hlp}$  a los costos de procesamiento por tonelada de madera de la especie  $h$  para producir la pulpa  $p$ , y  $cvInt2_{pls}$  a los de producción de papel  $s$  por tonelada de pulpa  $p$ .

La Ec. (22) muestra los costos fijos de los diferentes puntos de la cadena. Estos costos están vinculados a la estructura de cada fábrica, y consecuentemente contemplan la amortización de la inversión necesaria para poner en marcha una planta. Estos parámetros se multiplican por las correspondientes variables binarias referidas a la decisión de instalar o no un cierto nodo. Los parámetros  $CFPlant_{ih}$  corresponden a los costos fijos para la obtención de la madera  $h$  en la plantación  $i$ ,  $CFPulpa_{hjp}$  a los costos fijos de producción de pulpa  $p$  en la planta de pulpa  $j$ ,  $CFPapel_{ks}$  a los de fabricación de papel  $s$  en la planta  $k$ , y  $CFInt_{lps}$  refiere a los costos fijos de las plantas integradas  $l$  para la elaboración de la pulpa  $p$  y el papel  $s$ .

Por último, la Ec. (23) representa los costos de transporte de materiales entre los diferentes nodos de la cadena. Los valores considerados corresponden a los costos de traslado de: madera desde las plantaciones  $i$  a las plantas de pulpa  $j$  o hasta las plantas integradas  $l$ , pasta desde las fábricas de pulpa  $j$  hacia las plantas de papel  $k$  o a las integradas  $l$ , y desde las fábricas integradas  $l$  a las plantas de papel  $k$ , papel  $s$  desde las plantas  $k$  a los mercados  $m$  y papel  $s$  desde las fábricas integradas  $l$  a los mercados  $m$ . Se utilizan los costos de transporte  $ctrl1_{ij}$ ,  $ctrl2_{il}$ ,  $ctrl3_{jk}$ ,  $ctrl4_{jl}$ ,  $ctrl5_{lk}$ ,  $ctrl6_{skm}$ ,  $ctrl7_{slm}$  entre los nodos mencionados. Los diversos tipos de papel  $s$  poseen diferentes costos por tonelada pero no se realizan distinciones para diferentes especies de madera o tipos de pulpas.

Finalmente, la formulación MILP queda definida por las Ecs. (1) a (23).

$$CF = \sum_{i,h}(CFPlant_{ih} \cdot y1_{ih}) + \sum_{j,p}(CFPulpa_{jp} \cdot y2_{jp}) + \sum_{k,s}(CFPapel_{ks} \cdot y3_{ks}) + \sum_{l,p,s}(CFInt_{lps}y6_{lps}) \tag{22}$$

$$CTransp = \sum_{i,j}(ctrl1_{ij} \cdot \sum_{h,p} x1_{ihjp}) + \sum_{i,l}(ctrl2_{il} \cdot \sum_{h,p} u1_{ihlp}) + \sum_{j,k}(ctrl3_{jk} \cdot \sum_{p,s} x2_{jpks}) + \sum_{j,l}(ctrl4_{jl} \cdot \sum_{p,s} w1_{jpls}) + \sum_{l,k}(ctrl5_{lk} \cdot \sum_{p,s} w2_{lpks}) + \sum_{s,k,m}(ctrl6_{skm} \cdot x3_{ksm}) + \sum_{s,l,m}(ctrl7_{slm}u3_{ism}) \tag{23}$$

## RESULTADOS

A fin de validar el modelo desarrollado, a continuación se plantea un caso de estudio.

### Caso de estudio

En el caso de estudio se contemplan 4 plantaciones, 2 plantas de pulpa, 3 industrias de producción de papel, 3 fábricas integradas y 4 localizaciones de mercados. Además, se considera la utilización de 2 especies de madera, y la elaboración de 2 tipos de pulpa y 4 tipos de papel.

Las localizaciones de las plantaciones se fijan en las provincias de Corrientes, Misiones, Entre Ríos y Buenos Aires, ya que son las principales superficies de bosques implantados del país. Dado que las especies cultivadas en mayores volúmenes en dichas provincias son pino y eucaliptus se opta por utilizar las mismas como tipos de madera posibles a procesar.

Se considera para la obtención de pasta celulósica el pulpado mecánico, que comprende la separación de las fibras de la madera a través de un proceso de arranque; y el pulpado kraft, que consiste en un proceso químico, en el cual se realiza la cocción de las astillas de madera con ciertos productos químicos (hidróxido de sodio y sulfuro de sodio) para disolver la lignina y separar las fibras de la madera. Cabe aclarar que el primer proceso posee un rendimiento más elevado.

Respecto a los productos a utilizar, teniendo en cuenta los volúmenes de producción de papel en

Argentina, según datos del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, se pueden establecer como tipos de papeles más representativos los siguientes: papel de impresión, papel tissue, papel prensa y papel de embalaje. Para cada uno, se definen las proporciones necesarias de pulpas mecánica y kraft.

Los mercados se definen en las 4 provincias con mayor población del país, las cuales son: Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba y Mendoza.

### Datos

En la Tabla I se presenta la demanda de cada tipo de papel en cada mercado ( $QD_{sm}$ ). Teniendo en cuenta que las provincias consideradas representan aproximadamente el 67% de la población total Argentina, al momento de definir los valores demandados se toma

el 67% del consumo nacional aparente de cada tipo de papel, y se distribuye entre los distintos mercados en función de la cantidad de población radicada en los diferentes nodos.

En la Tabla II se muestran los rendimientos de los distintos procesos de pulpa según la materia prima utilizada. No se realizó distinción si la pasta se obtiene en plantas de pulpa o en integradas: existe un único rendimiento que depende de la materia prima y el tipo de pulpa.

Los rendimientos de elaboración de cada papel ( $\eta_{Intz_{ps}}$  y  $\eta_{Papel_{ps}}$ ) se ilustran en la Tabla III. También se exponen las proporciones necesarias de cada pulpa ( $\delta_{ps}$ ) para los diversos papeles. Si bien el modelo contempla la posibilidad de definir un rendimiento del papel para cada materia prima, en el caso de estudio se establece un único rendimiento por mezcla de pulpas.

Mercado	Impresión (s=1)	Diario (s=2)	Sanitario (s=3)	Embalaje (s=4)
Buenos Aires (m=1)	224.497	80.541	140.253	439.737
Santa Fe (m=2)	38.734	13.896	24.199	75.870
Córdoba (m=3)	40.120	14.394	25.065	78.586
Mendoza (m=4)	21.085	7.564	13.172	41.300

Tabla 1: Demanda de papel por mercado ( $QD_{sm}$ ) (toneladas anuales).

Rendimientos	Pino (h=1)	Eucalipto (h=2)
Pulpa Mecánica (p=1)	0,9	0,95
Pulpa Kraft (p=2)	0,48	0,53

Tabla 2: Rendimiento de los procesos de pulpado ( $n_{Pulpa_{hp}}$  y  $n_{Int1_{hp}}$ ).

Tipo de papel	Rendimiento ( $\delta_{ps}$ )	Prop. de Mecánica (p=1)	Prop. de Kraft (p=2)
Impresión (s=1)	0,95	0,2	0,8
Diario (s=2)	0,98	0,85	0,15
Sanitario (s=3)	0,96	0,3	0,7
Embalaje (s=4)	0,96	0,25	0,75

Tabla 3: Rendimiento y recetas por tipo de papel.

La Tabla IV muestra las capacidades de las plantaciones  $i$  para las diversas especies de madera  $h$  ( $CPlant_{ih}$ ) en tn por año, y los costos variables por tonelada talada en cada sitio  $cvPlant_{ih}$ . De cada plantación puede obtenerse pino y eucalipto simultáneamente.

En la Tabla V se presentan los parámetros de las plantas  $j$  para ambas pulpas  $p$ : las capacidades de las plantas, los costos fijos de amortización de la inversión y los costos de procesamiento por tn de madera según

la especie utilizada. La Tabla VI contiene los parámetros de las plantas de papel  $k$ , para los papeles  $s$ : las capacidades  $CPapel_{ks}$ , los costos fijos de inversión  $CFPapel_{ks}$ , y los costos variables de procesamiento por tn de pulpa según su tipo,  $cvPapel_{pks}$ .

Los costos de operación, de inversión y capacidades de las plantas integradas se omiten por limitaciones de espacio. Los costos de transporte rondan entre 0,75 y 0,87[\$/tn-km].

Plantación	CPlant <sub>ih</sub> [tn/año]		cvPlant <sub>ih</sub> [\$/tn]	
	Pino (h=1)	Eucalipto (h=2)	Pino (h=1)	Eucalipto (h=2)
Buenos Aires (i=1)	259,60	384,78	310	520
Corrientes (i=2)	2.531.272	1.446.060	270	480
Misiones (i=3)	2.947.824	140.074	250	465
Entre Ríos (i=4)	193.977	1.410.183	290	500

Tabla 4: Parámetros para las plantaciones  $i$ .

Plantas de Pulpa	Tipo de pulpa	CPulpa <sub>jp</sub> [tn madera/año]	CFPulpa <sub>jp</sub>	cvPulpa <sub>hjp</sub>	
				Pino	Eucalipto
Puerto Esperanza	-Mecánica	378.378	145.000.000	4.698	4.959
Misiones (j=1)	Kraft	693.069	185.388.126	3.619	3.996
Capitán Bermúdez	-Mecánica	216.216	79.750.000	4.437	4.683
Santa Fe (j=2)	Kraft	396.039	105.936.072	3.549	3.919

Tabla 5: Parámetros para las plantas de pulpa  $j$ .

Plantas de papel	Tipo de papel	CPapel <sub>ks</sub> [tn pulpa/año]	CFPapel <sub>ks</sub> [\$/año]	cvPapel <sub>pks</sub>	
				Mecánica	Kraft
Holt Ibicuy - Entre Ríos (k=1)	Impresión (s=1)	421.053	27.840.008	2.452	2.383
	Diario (s=2)	408.163	22.620.026	2.316	2.245
	Sanitario (s=3)	416.667	26.100.004	2.060	1.991
	Embalaje (s=4)	416.667	25.374.959	1.225	1.155
Zárate Buenos Aires (k=2)	Impresión (s=1)	421.053	26.448.017	2.480	2.411
	Diario (s=2)	408.163	21.489.021	2.345	2.274
	Sanitario (s=3)	416.667	24.795.008	2.088	2.018
	Embalaje (s=4)	416.667	24.106.229	1.253	1.183
Ituzaingó Corrientes (k=3)	Impresión (s=1)	368.421	25.407.053	2.507	2.438
	Diario (s=2)	357.143	20.640.776	2.373	2.302
	Sanitario (s=3)	364.583	23.816.254	2.116	2.046
	Embalaje (s=4)	364.583	23.154.667	1.281	1.211

Tabla 6: Parámetros para las plantas de papel  $k$ .

## Resultados

El modelo fue implementado en GAMS 24.1.3, utilizando una licencia académica, y empleando CPLEX 12.5.1.0 como algoritmo de resolución. Se eligió el mencionado algoritmo ya que ha dado sobradas muestras de ser uno de los mejores para Programación Mixta Entera Lineal. El diseño óptimo de la CS para el caso propuesto, comprende la instalación de 2 plantas de pulpa, 2 de papel y 3 integradas, obteniéndose la madera de las 4 plantaciones disponibles. El costo total es de 13.660 millones de pesos, y se compone principalmente por costos variables, que representan el 83,7% del total, seguidos por los costos de transportes (9,9%) y en último lugar, los costos fijos correspondientes a las amortizaciones de las inversiones con un 6,4%. Esta solución óptima se obtuvo en un tiempo de 0,219 segundos y se emplearon 257 ecuaciones, 540 variables continuas y 80 discretas.

Respecto a las plantaciones, si bien se extrae madera de los 4 sitios considerados, se ocupa el 37,8% de la

capacidad disponible de pino y el 7,56% de eucalipto. El mayor consumo de pino se debe a su menor costo. Las plantaciones de Buenos Aires y Entre Ríos proveen de pino y eucalipto a la planta integrada de San Pedro que elabora pasta mecánica y papel de diario; la planta de pulpa kraft de Capitán Bermúdez se abastece de eucalipto de Entre Ríos, mientras que los sitios forestales de Misiones y Corrientes venden solamente pino a las plantas ubicadas en la misma provincia donde se encuentra la plantación, respectivamente. En Misiones se instala una planta de pasta mecánica y una integrada que elabora pulpa kraft y papel de impresión, y en Corrientes, una planta integrada que produce pulpa kraft y papel de embalaje.

Los flujos de pulpa se ilustran en la Tabla VII. Las celdas coloreadas indican la pulpa producida en una planta integrada que se emplea en la misma planta para producir papel, por lo que no conllevan asociado un costo de transporte. El papel de impresión demandado, es producido en su totalidad por la planta integrada de Puerto Piray (Misiones), mientras que la de San

Tipo de Pulpa	Tipo de Planta	Origen	Plantas de papel		Plantas Integradas		
			Holt Ibicuy - Entre Ríos (k=1)	Zárate - Buenos Aires (k=2)	San Pedro - Buenos Aires (l=2)	Puerto Piray - Misiones (l=3)	Ituzaingó - Corrientes (l=4)
Mecánica	Plantas de Pulpa	Puerto Esperanza - Misiones (j=1)				68302,316	82743,458
	Plantas integradas	San Pedro - Buenos Aires (l=2)	63340,313	82749,511	100954,847		
Kraft	Plantas de Pulpa	Capitán Bermúdez - Santa Fe (j=2)		62036,792	17815,561		
	Plantas integradas	Puerto Piray - Misiones (l=3)	147794,062	54244,194		273209,26	
		Ituzaingó - Corrientes (l=4)		131967,545			248230,375

Tabla 7: Flujos de pulpa desde plantas de pulpa/integradas hacia las plantas de papel/integradas.

Pedro (Buenos Aires) abastece la totalidad del papel prensa y la planta de papel de Holt Ibicuy (Entre Ríos) satisface las necesidades del papel tissue. Finalmente, la demanda de papel de embalaje es cubierta en partes iguales por la planta de papel de Zárate (Buenos Aires) y la integrada de Ituzaingó (Corrientes).

## DISCUSIÓN

A través del caso de estudio se ha validado la formulación propuesta para la optimización de la CS de papel, lográndose incrementar a 1.333.388 tn anuales la producción de pulpas (con una capacidad de 1.700.000 tn) y a 1.780.000 tn, la capacidad para papel. Esta situación permitiría mejorar la balanza comercial considerando que se ha definido como demanda el consumo aparente de productos. Contemplando que solo se tomó el 67% de dicho consumo, se presume que podría incrementarse aún más la producción de pulpa y papel.

Puede observarse que se dio cumplimiento al objetivo planteado, dado que se logró una primera versión de un modelo matemático para la optimización de la CS del papel, considerando la totalidad de los eslabones y gran parte de los flujos que se suceden entre ellos. Sin embargo, en virtud de ciertas simplificaciones efectuadas en el presente trabajo resulta claro que existe trabajo futuro dentro de esta línea. Por ejemplo, en primer lugar podría incluirse un mayor grado de detalle en los procesos de producción e incorporar un flujo inverso de papel para la utilización de pulpas recicladas, con lo cual se lograría una reducción del consumo de agua, tomando en consideración criterios ambientales por la valorización y ahorro de este recurso natural. Por otro lado, podría plantearse la posibilidad de reutilizar ciertos subproductos o

residuos obtenidos en distintas etapas de procesamiento, para aprovecharlos como fuente de energía. Finalmente, en materia de costos se planea considerar tramos de inversión y capacidad a fin de tener en cuenta las economías de escala como así también abordar el problema multi-periodo para reflejar el horizonte de planificación sobre el cual afecta este tipo de proyectos de carácter estratégico.

## CONCLUSIONES

Como se ha mencionado anteriormente, la CS de papel argentina requiere de un incremento de las capacidades instaladas y una mejora en la gestión integral para aumentar la competitividad. El modelo propuesto constituye una base para el análisis de alternativas de inversión y conexión de nodos.

Las soluciones que surgen de la aplicación del modelo permiten estimar las inversiones necesarias para el desarrollo de esta CS, basadas en la instalación de nuevas plantas de producción de pulpa, de fabricación de papel o plantas integradas. Además, a partir del modelo y la definición de las capacidades instaladas y las cantidades a producir, se puede precisar el requerimiento de recursos naturales, fundamentalmente de las distintas especies de madera, a fin de efectuar planes de forestación y reforestación que eviten el agotamiento de estos recursos.

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a la Directora y Co-Directora, Dra. M. A. Rodríguez y Mg. V. C. Tucci, respectivamente, por la ayuda y coordinación brindada. En segundo lugar, agradecen a la UTN - FRSF, por el financiamiento aportado.

## REFERENCIAS

Ballou, Ronald H., "Logística. Administración de la cadena de suministro", Quinta Edición, Pearson Educación, México, 7-14, (2004).

Papageorgiou, Lazaros G., "Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities", *Computers & Chemical Engineering*; 33, (12), 1931-1938. (December 2009).

Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca, "Argentina: Plantaciones forestales y gestión sostenible", (2013).

[http://forestoindustria.magyp.gob.ar/backup2/\\_archivos/\\_ambiente/publi\\_ambiental.pdf](http://forestoindustria.magyp.gob.ar/backup2/_archivos/_ambiente/publi_ambiental.pdf)

Brandán, Susana, Corinaldesi, Liliana, Frisa, Cristina, "Comercio exterior. Intercambio comercial argentino de

productos forestales. Año 2014", (2015).

<http://forestoindustria.magyp.gob.ar/archivos/estadisticas/comercio-exterior/comercio2014.pdf>

Ministerio de Industria, "Mesa de implementación de la cadena foresto industrial: Resultados", (2012).

Waldemarsson, Martin, Lidestam, Helene, Rudberg, Martin, "Including energy in supply chain planning at a pulp company." *Applied Energy*; 112, 1056-1065, (2013).

Bredström, David, Lundgren, Jan T, Rönnqvist, Mikael, Carlsson, Dick, and Mason, Andrew, "Supply chain optimization in the pulp mill industry--IP models, column generation and novel constraint branches", *Eur. J. Oper. Res.*; 156, 2-22, (2004).