

## Planificación integrada de producción y distribución para un conglomerado industrial

### Integrated production and distribution planning for an industrial conglomerate

*Edgar Gutiérrez Franco<sup>1\*</sup>, Hermann Fuquen González<sup>1</sup>, Danilo Abril Hernández<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad de la Sabana, Apartado Aéreo 140013, Puente del Común, Chía, Colombia

<sup>2</sup>Operations Research Senior Analyst, Kimberly Clark, Apartado Aéreo 90621, Bogotá, Colombia

(Recibido el 13 de enero de 2009. Aceptado el 15 de febrero de 2010)

#### Resumen

Este artículo presenta la modelación matemática de la cadena de abastecimiento de un conglomerado, entendido como la asociación de empresas que toman una estructura común, para la industria siderúrgica semi-integrada en Colombia, con el objeto de brindar una herramienta de soporte a la decisión buscando la minimización de costos logísticos de producción y distribución de productos intermedios y finales de esta industria, el modelo matemático contempla: proveedores de materia prima, plantas manufactureras, centros de distribución, ventas locales e importaciones. Los costos relacionados, son los de materia prima, transporte e inventarios, distribución y administrativos. Las restricciones que se consideran en el modelo son: capacidad de proveedores y plantas manufactureras, satisfacción de la demanda, ecuaciones de balance y restricciones de configuración del sistema. El modelo se validó en una empresa colombiana presentando resultados satisfactorios. La búsqueda de la estrategia óptima se estableció con el apoyo del software General Algebraic Modeling System-GAMS por medio del solver CPLEX®.

----- *Palabras clave:* Programación lineal, optimización, cadenas de suministro, industria siderúrgica

#### Abstract

This paper presents the mathematical modelling of the supply chain of a cluster. This is the association of companies that take a common structure, for

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 1 + 861 55 55 ext. 2521, fax ext 2515, correo electrónico: edgar.gutierrez@unisabana.edu.co (E. Gutiérrez)

the semi-integrated steel industry as a tool for supporting decision looking at minimizing logistics costs of production and distribution of intermediate and final products of this industry. The mathematical model includes: raw material suppliers, manufacturing plants, distribution centers, local sales and imports. The costs associated, are the raw material, transportation and inventory, distribution and administrative expenses. The restrictions that are considered in the model are: the capacity of suppliers and manufacturing plants, satisfaction of demand, balance equations and restrictions on system configuration. The model was validated in a Colombian company presenting satisfactory results. The search for the optimal strategy was established with the support of the Software General Algebraic Modeling System - GAMS with the solver CPLEX ®.

----- *Keywords:* Linear Programming, supply chain optimization, steel industry

## Introducción

El presente artículo tiene su origen en la preocupación general del sector académico e industrial de Colombia por modernizar los procesos gerenciales de las empresas, con el objeto de enfrentar un mercado cada vez más globalizado y competitivo, esta preocupación ha conducido a la realización de estudios y proyectos de investigación de optimización en diversas cadenas de abastecimiento, entre otros se pueden destacar [1-3], así como al ofrecimiento de servicios de consultoría especializada usando herramientas de investigación de operaciones por parte de diversas empresas en Colombia [4, 5], así mismo este artículo busca promover posteriores estudios que profundicen y mejoren la aplicabilidad de modelos de optimización que conduzcan a mejorar los procesos gerenciales en las organizaciones, mostrando un caso de estudio aplicado a la industria siderúrgica..

Las prácticas y herramientas de optimización en cadenas de abastecimiento han tomado en las últimas décadas gran importancia en países industrializados debido a los beneficios que estas conllevan, entre otros la minimización de costos y la eficiencia en el proceso, como se observa en la revisión bibliográfica realizada. Este artículo presenta un modelo matemático para la optimización de la cadena de suministro en un conglomerado en la industria siderúrgica

semi-integrada en Colombia, entendido este como la asociación de empresas que toman una estructura común donde se asume que las empresas pertenecen a una misma firma, el cual busca definir la interrelación y optimización logística entre los centros de acopio de chatarra, las plantas siderúrgicas y los centros de distribución, brindando una herramienta de soporte a la decisión con el fin de aumentar la competitividad de dicha industria.

Inicialmente se presenta una revisión bibliográfica sobre modelos de optimización en cadenas de suministro, posteriormente se describe la cadena de suministro de la industria siderúrgica semi-integrada en Colombia y finalmente se presenta un modelo matemático de programación lineal que integra todos los eslabones que conforman la cadena, así como el análisis de los resultados arrojados por el modelo mostrando líneas de acción para esta industria.

La cadena siderúrgica, objeto del presente estudio, comprende la obtención del acero y la fabricación de productos intermedios y finales a partir del mismo. El acero utilizado puede obtenerse a partir de mineral de hierro o de chatarra, en el primer caso la industria se denomina integrada, mientras que en el segundo se denomina semi-integrada [6]. La estructura de la cadena de abastecimiento analizada para esta industria está determinada por el tipo de siderúrgica, entre los eslabones que la

componen se encuentran las fuentes de materia prima, los productores y los distribuidores. A continuación se presentara las principales definiciones y la revisión bibliográfica para la realización del modelo matemático.

A través de los años se han venido construyendo diversas definiciones y enfoques de la logística y por lo tanto de la cadena de abastecimiento, estas definiciones apuntan hacia la identificación de tres tipos de flujos: materiales, información y flujos monetarios; el flujo tradicional se refiere al material físico en movimiento, indicando la utilidad del espacio asociado típicamente al transporte, almacenaje y al inventario, por su parte el flujo de información esta relacionado con el estado de los flujos físicos a través de las organizaciones lo cual puede disminuir dramáticamente la magnitud de los mismos, por último, se ha venido dando importancia a los flujos de dinero, afectados por las fluctuaciones económicas, las regulaciones fiscales, los acuerdos comerciales, entre otros. Estos flujos determinan en gran medida la configuración de la cadena de abastecimiento, la cual se define como el conjunto de todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de productos en un mercado específico, estas actividades comienzan desde el mismo instante en que se obtienen las materias primas, pasando por uno o varios pasos de transformación, almacenamiento y distribución, hasta llegar en última instancia al consumidor como producto final [7].

Cada uno de los eslabones que conforman la cadena de abastecimiento agrega valor al producto a través de actividades como transformaciones físicas, envasado, servicio de soporte en ventas y posventa y otras actividades que incrementan la “deseabilidad” del producto desde el punto de vista de los consumidores finales [8]. En general las plantas manufactureras le dan el valor funcional a los productos, mientras que los centros de distribución proveen valor de forma temporal y de localización. En este contexto debe existir una integración entre los eslabones que conforman la cadena de abastecimiento, a fin de coordinar las actividades llevadas a cabo por

los mismos, minimizando costos al tiempo que se agrega valor al producto. Los eslabones que conforman la cadena pueden aumentar su ventaja competitiva de dos maneras: coordinación, anteriormente mencionada y optimización [9]. En este último sentido, la investigación de operaciones ha abordado temas relacionados con la optimización de las cadenas de abastecimiento mediante la construcción de modelos matemáticos que la representan, con el fin de realiza un análisis y tomar decisiones acerca de la misma.

Las técnicas de optimización más utilizadas para solucionar las formulaciones desarrolladas en cadenas de abastecimiento incluyen programación lineal, mixta y entera, usando técnicas como la relajación lineal, la descomposición de Benders, la descomposición dual, y métodos de muestreo estadísticos para las formulaciones de programación estocástica. Algunas tesis de doctorado han sido desarrolladas teniendo como tema central la utilización de modelos matemáticos para la optimización de cadenas de distribución regional y global [10]. Igualmente, existen diversos modelos de optimización aplicados a las cadenas de abastecimiento entre estos se destaca el artículo presentado por Geoffrion y Graves [11] titulado “Multicommodity distribution system design by Benders decomposition”, en el cual se busca dar solución a través del algoritmo de descomposición de Benders aplicado a un problema de producción y distribución multi-producto en un período. Este trabajo fue ampliado por el mismo autor en 1978 en el trabajo titulado “Strategic distribution system planning: A status report” [12] y en 1982 en el trabajo “A Management Support System for Distribution Planning” [13].

Arntzen [14], presenta un modelo de programación entera multi-período y multi-producto para optimizar una cadena de abastecimiento global, en este modelo la función objetivo consiste en minimizar las variables relacionadas con los costos de producción, costos de inventarios, costos de envío, costo fijo de la producción y de tipo de producción, menos algunos ahorros y tiempos de carga. Goetschalckx [15] presenta una

revisión enfocada en la aplicación de modelos de programación matemática para el diseño de estrategias de decisión y mejora de sistemas logísticos globales. Eskigun [16], considera las restricciones de capacidad de transporte asociado a un número limitado de vehículos de los centros de distribución (VCD), que para el caso son enviados desde las plantas a un sólo centro de distribución en un período.

Existen antecedentes de la aplicación de la investigación de operaciones en la industria del acero, a continuación se presentan algunos casos relevantes que han traído beneficios considerables a las entidades que los ejecutaron.

*Un modelo heurístico eficiente para planear los requerimientos de acero plano en Bethlehem Steel – USA.* En este caso se desarrolló un procedimiento heurístico para hacer el seguimiento de las dimensiones del acero plano producido cuando el calibre de la lámina es más alto que el cotidiano (mayor a 60mm) [17].

*Programación dinámica y sistema de control en la planta de acero de ENSIDESA - España.* La empresa Nacional Siderúrgica (ENSIDESA) construyó una nueva planta de acero en 1988, ésta enfatizó en desarrollar sistemas de control en las diferentes secciones de producción dando al proceso reporte continuo de datos. Haciendo uso de esta información se desarrolló un sistema de coordinación automática para cada entidad de la planta. El sistema se construyó para ser actualizado dinámicamente a través de la programación de la producción, considerando imprevistos o retrasos para crear un programa de producción completo y sistemático que evitara fallas o errores en el plan de producción [18].

*Un sistema computarizado para el planeamiento estratégico de la producción de acero.* Se desarrolló un sistema computarizado para el planeamiento estratégico con el fin de reemplazar el sistema manual de planeamiento y comparar planes alternativos fácilmente. El modelo permite la ejecución de cálculos en masa y el control contable de costos rápidamente con el fin de maximizar la eficiencia [19].

### **Descripción del sector nacional siderúrgico**

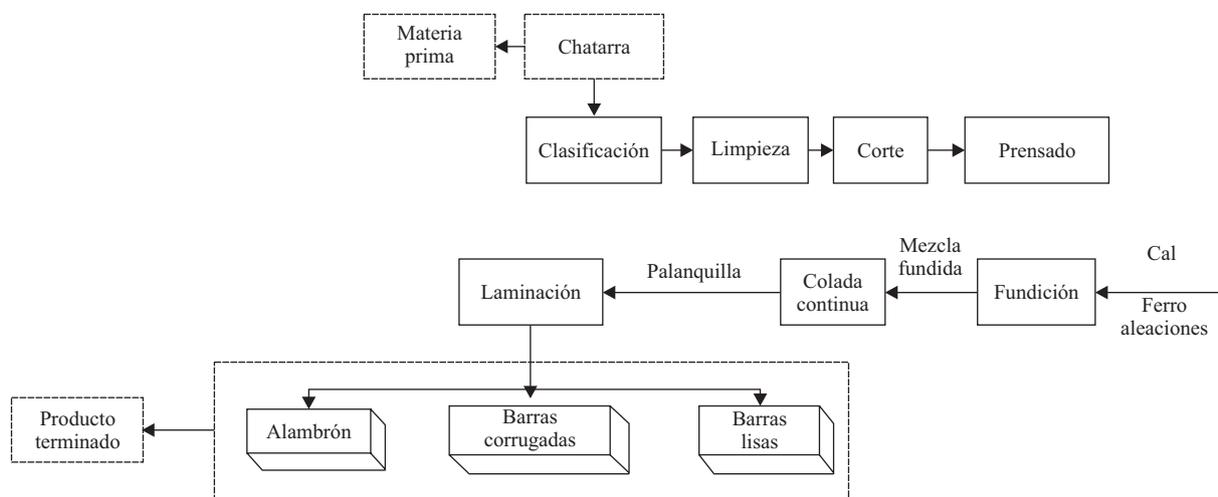
En Colombia las siderúrgicas han experimentado un repunte en los últimos años basado en las obras públicas de Bogotá, la ciudad capital, y en una apertura exportadora [20]. A pesar de que varios sectores de la economía nacional presentan un menor crecimiento en comparación con el año anterior, la industria siderúrgica es una de las pocas que mantuvo un ritmo estable durante el año 2008. Durante el primer semestre la producción de aceros planos fue de 224.600 toneladas, valor superior en 0,9% en comparación con el mismo periodo de 2007, el crecimiento de este sector se debe en gran medida a la escasez del acero y al inicio de obras en el país que requieren del acero como materia prima [21].

### **Proceso tecnológico**

El establecimiento de un proceso siderúrgico continuo ó semi-integrado depende del tamaño del mercado y de la disponibilidad de materias primas. Si existe un buen acceso a la chatarra y a la energía barata, lo adecuado son las miniplantas. Si se dispone de mineral de hierro y de un mercado intensivo, como por ejemplo el automotriz, lo ideal es una siderúrgica integrada. El sector siderúrgico emplea una cantidad considerable de maquinaria y equipo lo cual requiere gran inversión en capital y exige escalas de producción significativas para poder reducir los costos fijos. Los altos hornos (proceso integrado) controlan aproximadamente el 60% de la producción mundial de acero líquido; los hornos eléctricos (proceso semi-integrado) el 33% y el restante 7% le corresponden a tecnologías obsoletas. En Colombia solamente Acerías Paz del Río posee siderurgia integrada. Por otro lado, Diaco, Aceros Sogamoso, Acasa y Sidoc producen todos sus aceros como siderúrgicas semi-integradas [22], por lo cual el 65% del sector siderúrgico del país utiliza hornos eléctricos; en éstos se procesa chatarra nacional e importada, razón por la cual el presente trabajo se centra en la industria semi-integrada. La figura 1 muestra los procesos

productivos llevados a cabo en la industria siderúrgica semi-integrada considerados para la construcción del modelo matemático, desde que

se obtiene la chatarra como materia prima hasta los productos terminados a tratar: alambón, barras corrugadas y barras lisas.



**Figura 1** Proceso productivo de la Industria Siderúrgica Semi-Integrada

Inicialmente la chatarra es recolectada en las plantas de producción donde se dispone de un área especial para su procesamiento, allí es separada, limpiada, cortada y prensada, para procesarla en los hornos eléctricos de fundición, este proceso de prensado lo realiza una cizalla industrial que funciona por medio de pistones de presión que comprimen el material para hacerlo más fácil de transportar además de facilitar la entrada de la mezcla al horno de fundición. Del anterior proceso se obtienen “bloques de chatarra”, los cuales se encuentran listos para introducir al horno de fundición, estos bloques pueden ser procesados en la misma planta o se deben transportar a una acería que continúe con el proceso dependiendo de la tecnología e instalaciones de la planta donde se recolecte la chatarra. Los bloques de chatarra son introducidos en un horno eléctrico de fundición junto con cal y ferro aleaciones que garantizan la composición química del acero que se quiere obtener, este segundo proceso productivo se denomina “Proceso de Fundición” en este un horno eléctrico aumenta la temperatura de la mezcla hasta llevarla a estado líquido alrededor

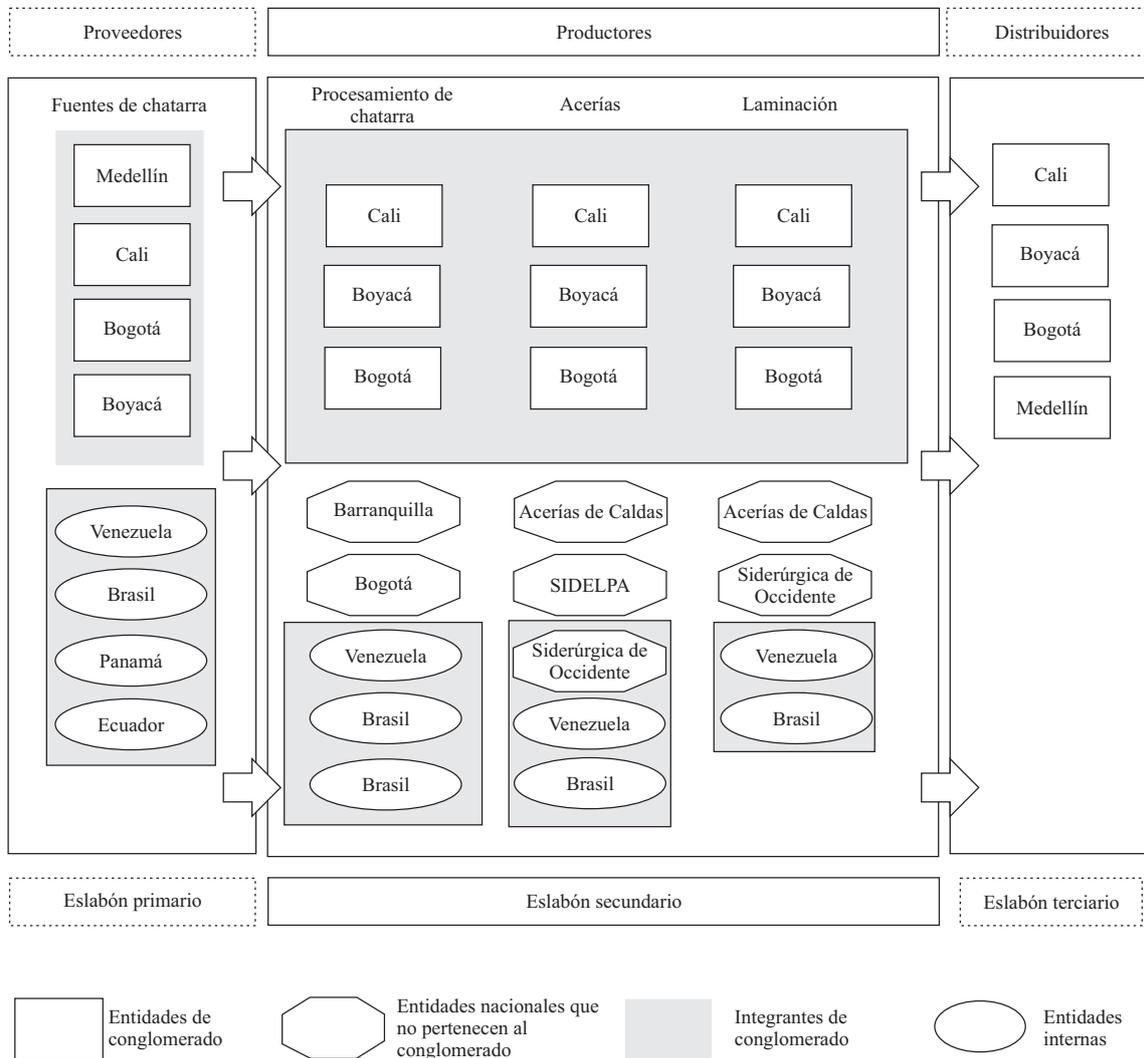
de 1800 °C; después la mezcla fundida (acero fundido) pasa a través de un sistema productivo conocido comúnmente como colada continua, de la cual se obtiene acero sólido en barras conocidas como *palanquilla* para laminar. El tercer proceso productivo inicia con la palanquilla la cual es transformada en el proceso de laminación en caliente donde se aumenta la temperatura de este material en hornos con quemadores de gas propano o full oil desde una temperatura ambiente hasta aproximadamente los 1100°C para la obtención de diferentes productos no planos como lo son: el alambón (Conocida en el sector como “Chipa”) y las barras corrugadas y lisas. Adicionalmente se obtienen otros productos como cuadrados y canales, sin embargo estos últimos no son incluidos en el modelo como objeto de estudio.

### **Cadena de abastecimiento**

Para el presente estudio se estableció que la cadena de abastecimiento de la industria siderúrgica semi-integrada en Colombia está compuesta por tres eslabones o etapas: proveedores ó fuentes de chatarra, productores o procesadores

y distribuidores, a continuación se realiza una descripción de cada uno de estos eslabones. La

figura 2 describe la configuración actual de dicha cadena de suministro.



**Figura 2** Configuración de la cadena de abastecimiento

*Eslabón Primario:* Este eslabón está conformado por las fuentes de chatarra identificadas (Centros de acopio de chatarra). Las fuentes de chatarra están compuestas por agentes comercializadores de chatarra que tienen características muy similares referentes al tipo de chatarra y precio. Las fuentes de chatarra nacionales fueron agrupadas en las principales zonas donde se acumula la chatarra en Colombia lo que representa más del

90% del mercado de chatarra nacional, así mismo se incluyen las fuentes externas conformadas por Venezuela, Brasil, Panamá y Ecuador.

*Eslabón Secundario - Fabricación:* este eslabón está conformado por los procesadores de chatarra, acerías y plantas laminadoras (Plantas siderúrgicas); estas plantas son las que conforman el denominado conglomerado, ya que se asume que son pertenecientes a una misma compañía, están

ubicadas en diferentes ciudades del país, como es el caso particular de la empresa de estudio, así mismo se incluyen plantas independientes que no pertenecen al conglomerado tanto para el procesamiento como las acerías y laminadoras. Las fuentes externas de este eslabón están conformadas por plantas ubicadas en Venezuela, Brasil y Panamá.

*Eslabón Terciario - Distribución:* este eslabón está conformado por los agentes receptores de Alambión y Barras, productos finales de la cadena. Generalmente estos agentes son empresas comerciantes que venden los productos al por menor, se encuentran agrupados en las principales ciudades del país al igual que el conglomerado establecido para el eslabón secundario.

### **Modelo de optimización**

El modelo matemático elaborado es un modelo determinístico de programación lineal que aborda la problemática de la distribución física de los diferentes productos intermedios y finales en la industria siderúrgica semi-integrada en Colombia. El modelo busca apoyar los procesos encaminados a la minimización de costos logísticos de transporte y producción, brindando directrices que soporten la toma de decisiones a través de la cadena de abastecimiento a mediano plazo.

### **Características del modelo**

La modelación de la presente cadena de abastecimiento es definida para una planeación táctica-operativa, proyectando los flujos óptimos de productos intermedios y finales desde el punto de vista de costos, estos flujos determinan la cantidad de productos a transportar dentro de la cadena, definiendo cuanto producir y almacenar en cada una de los eslabones de producción y cuanto pedir a cada una de las zonas proveedoras.

A continuación se describen los principales supuestos establecidos para la construcción del modelo.

- El mercado del acero en Colombia se caracteriza por contar con una alta demanda interna que cubre en su mayoría la oferta en

producción de acero ofrecida principalmente por Siderúrgica Paz del Río y Diaco S.A, de hecho la balanza comercial de productos de alambión y barras es bastante balanceada con periodos de significativo déficit [23], por tal razón el alcance del modelo es nacional buscando la minimización de costos de producción y distribución en el país haciendo énfasis en los costos de inventario, transporte y manipulación de productos

- Los servicios de transporte son tercerizados por las compañías del sector siderúrgico y sin importar la cantidad que se tenga que transportar las compañías colocan a disposición los medios necesarios para este fin, los costos incurridos por este servicio se incluyen dentro de los parámetros del modelo, así mismo se asume que las capacidades de transporte son suficientes para poder suplir las necesidades del sector.
- Durante el proceso de producción en la industria siderúrgica semi-integrada se aplican algunos coeficientes de rendimiento al material procesado ya que al ser transformado dentro del proceso industrial se incurre en pérdidas inherentes al proceso, situación común en las industrias manufactureras. Ha diferencia de otras industrias en la industria siderúrgica se consideran generalmente estas pérdidas de material de manera lineal es decir con factores constantes para cualquier cantidad producida, aunque en la literatura no se encontró investigaciones sobre este tema, la no realización de una investigación basada en análisis estadístico sobre el proceso para confirmar esta linealidad asumida se debe a las siguientes premisas. Esta suposición de linealidad se sustento ya que de esta manera las empresas colombianas en las cuales se referencia este estudio asumen la misma suposición para los cálculos de sus procesos internos, las variaciones entre sus pronósticos y el producto semi terminado o terminado ya pesado no es mayor al 3%-4% por lo que se considera que aunque podría someterse esta variabilidad a investigación

no aplica para el estudio realizarlo debido a su complejidad que ameritaría todo un estudio paralelo al presente. Un ejemplo clásico en este tipo de industria es que en una línea de laminación en caliente, como la operada por la empresa DIACO S.A consiste en una línea continua automatizada que una vez precalentada la palanquilla (de tamaño y peso estandarizado) se hace pasar por trenes de laminación generados pérdidas muy constantes debido a que los rodillos ejercen una presión constante a la palanquilla en proceso generando un polvo de acero conocido como "Calamina" producto de la fricción generada. La variabilidad de este proceso es mínima ya que estos equipos funcionan de manera continua sin intervención humana.

- El modelo no tiene en cuenta de manera explícita consideraciones de tipo financiero relativas a impuestos y beneficios tributarios típicos de procesos de comercialización.
- Cada entidad productiva posee inventarios de materia prima y producto final.
- Las plantas laminadoras envían productos terminados únicamente a los centros de distribución y no se considera el envío entre plantas productoras ni entre plantas y clientes finales.

#### Formulación del modelo matemático

El modelo matemático planteado a continuación tiene en cuenta principalmente los supuestos anteriormente descritos, el caso de estudio se basa en una de las empresas más representativas del sector en Colombia, los parámetros utilizados son una simulación basada en datos reales de la empresa de estudio, la cual está representada por un conglomerado por tener varias plantas de su propiedad. A continuación se hará la descripción de los índices, conjuntos, subconjuntos, parámetros, variables y las ecuaciones que conforman el modelo matemático.

#### Índices

- $t$ : Identifica un mes del período considerado en la planeación  
 $i$ : Fuente de chatarra  
 $j$ : Procesador de chatarra  
 $k$ : Acería  
 $l$ : Laminadora  
 $p$ : Producto  
 $c$ : Centro de distribución de conglomerado

#### Conjuntos y subconjuntos

##### Productos

$PA$  Tipos de alambraón

$PB$  Tipos de barra

##### Fuentes de chatarra

$FCS_i$  Nacional

$FCE_i$  Fuentes de chatarra fuera de Colombia

##### Plantas procesadoras de chatarra

$PPC_j$  Pertenecientes al conglomerado

$PPW_j$  Fuera de Colombia

$PPN_j$  Nacional que no pertenece al conglomerado

##### Planta de acería

$PPA_k$  Pertenecientes al conglomerado

$PAW_k$  Fuera de Colombia

$PAN_k$  Nacional que no pertenece al conglomerado

##### Planta de laminación

$PPL_l$  Pertenecientes al conglomerado

$PLW_l$  Fuera de Colombia

$PLN_l$  Nacional que no pertenece al conglomerado

**Función Objetivo**

La función objetivo busca minimizar los costos incurridos por la operación de cada uno de los eslabones o etapas de la cadena de suministro

incluyendo compra de materia prima, su procesamiento, el manejo de inventario de producto intermedio y final su transporte y distribución.

Min z=

**Costos de Transporte**

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in FCS} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} FNJ_{i,j} * CCC_{i,j,t} + \sum_{i \in FCE} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} FNJ_{i,j} * CCE_{i,j,t} + \sum_{i \in PPC} \sum_{j \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNA_{j,k} * CCJ_{j,k,t} + \sum_{i \in PPN} \sum_{j \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNA_{j,k} * CCK_{j,k,t} + \\ & \sum_{i \in PPW} \sum_{j \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNA_{j,k} * CCL_{j,k,t} + \sum_{i \in PPL} \sum_{j \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNL_{k,l} * CCA_{k,l,t} + \sum_{i \in PPL} \sum_{j \in PAN} \sum_{t=1}^{12} FNL_{k,l} * CCZ_{k,l,t} + \sum_{i \in PPN} \sum_{j \in PPA} \sum_{t=1}^{12} FNL_{k,l} * CCQ_{k,l,t} + \\ & \sum_{l \in PPL} \sum_c \sum_p \sum_{t=1}^{12} FNC_{l,c} * CLC_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLN} \sum_c \sum_p \sum_{t=1}^{12} FNC_{l,c} * CCY_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLW} \sum_c \sum_p \sum_{t=1}^{12} FNC_{l,c} * CCX_{p,l,c,t} \end{aligned}$$

**Compras**

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in FCS} \sum_{t=1}^{12} CCC_{i,j,t} * PAS_i + \sum_{i \in FCE} \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CCE_{i,j,t} * PCX_i + \sum_{j \in PPN} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCK_{j,k,t} * PPF_j + \sum_{j \in PPW} \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCL_{j,k,t} * PPX_j + \\ & \sum_{k \in PAN} \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CCZ_{k,l,t} * PQF_k + \sum_{k \in PAW} \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CCQ_{k,l,t} * PQX_k + \sum_p \sum_{l \in PLN} \sum_c \sum_{t=1}^{12} CCY_{p,l,c,t} * PRECIOS_{l,p} + \\ & \sum_p \sum_{l \in PLW} \sum_c \sum_{t=1}^{12} CCX_{p,l,c,t} * PRECIOS_{l,p} \end{aligned}$$

**Inventarios**

$$\begin{aligned} & \sum_C \sum_p \sum_{t=1}^{12} IAC_{p,c,t} * IPT_{p,c} + \sum_{L \in PPL} \sum_p \sum_{t=1}^{12} IAB_{l,p,t} * IPP_{p,l} + \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} IUP_{l,t} * IQN_l + \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} IQL_{k,t} * IQA_k + \\ & \sum_{k \in PAA} \sum_{t=1}^{12} ICF_{k,t} * ICA_k + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} ICO_{j,t} * ICX_j + \sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CQP_{l,t} * CVC_l + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CXC_{j,t} * CVA_j + \\ & \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCF_{k,t} * CVB_k + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} ICP_{j,t} * ICZ_j + \end{aligned}$$

**Producción**

$$\sum_{l \in PPL} \sum_{t=1}^{12} CQP_{l,t} * CVC_l + \sum_{j \in PPC} \sum_{t=1}^{12} CXC_{j,t} * CVA_j + \sum_{k \in PPA} \sum_{t=1}^{12} CCF_{k,t} * CVB_k \tag{1}$$

Donde:

- CCA<sub>k,l,t</sub>** Cantidad de palanquilla a distribuir de acería de conglomerado k a laminadora l de conglomerado.
- CCC<sub>i,j,t</sub>** Cantidad de chatarra cruda a pedir en fuente nacional.
- CCE<sub>i,j,t</sub>** Cantidad de chatarra a comprar a fuente de chatarra fuera de Colombia.

<b>CCF<sub>k,t</sub></b>	Cantidad de chatarra procesada a fundir en acería k.
<b>CCJ<sub>j,k,t</sub></b>	Cantidad de chatarra procesada a distribuir de procesador de chatarra de conglomerado j a acería de conglomerado k.
<b>CCK<sub>j,k,t</sub></b>	Cantidad de chatarra procesada a comprar a procesador de chatarra nacional (a) fuera del conglomerado para acería de conglomerado k.
<b>CCL<sub>j,k,t</sub></b>	Cantidad de chatarra procesada a comprar a procesador de chatarra internacional para acería k de conglomerado.
<b>CCQ<sub>k,l,t</sub></b>	Cantidad de palanquilla a comprar en acería fuera de Colombia para laminadora de conglomerado.
<b>CCX<sub>p,l,c,t</sub></b>	Cantidad de producto terminado p a comprar a laminadora fuera de Colombia para centro de distribución c.
<b>CCY<sub>p,l,c,t</sub></b>	Cantidad de producto terminado p a comprar a laminadora nacional fuera de conglomerado para centro de distribución c.
<b>CCZ<sub>k,l,t</sub></b>	Cantidad de palanquilla a comprar a acería nacional fuera de conglomerado para laminadora de conglomerado l.
<b>CLC<sub>p,l,c,t</sub></b>	Cantidad de producto terminado p a distribuir de laminadora l a centro de distribución c.
<b>CQPl<sub>p,,t</sub></b>	Cantidad de palanquilla a procesar en laminadora de conglomerado l por producto p.
<b>CVA<sub>j</sub></b>	Costo de procesar 1 tonelada de chatarra cruda en procesador de chatarra j
<b>CVB<sub>k</sub></b>	Costo de procesar 1 tonelada de chatarra procesada en acerba k
<b>CVCl</b>	Costo de procesar 1 tonelada de producto terminado en laminadora l
<b>CXC<sub>j,t</sub></b>	Cantidad de chatarra cruda a procesar en procesador de chatarra de conglomerado j
<b>FNA<sub>j,k</sub></b>	Costo de transporte entre proveedor de chatarra procesada j a acería k
<b>FNJ<sub>i,j</sub></b>	Costo de transporte entre fuente chatarra i a procesador de chatarra j
<b>FNL<sub>k,l</sub></b>	Costo de transporte entre acería k a laminadora l
<b>FNC<sub>l,c</sub></b>	Costo de transporte entre laminadora l a distribuidor c
<b>IABl<sub>p,t</sub></b>	Inventario de producto p en planta laminadora l
<b>IACp<sub>c,t</sub></b>	Inventario de producto p en el centro de distribución c
<b>ICAk</b>	Inventario de chatarra procesada en acería k
<b>ICFk<sub>t</sub></b>	Inventario de chatarra procesada en acería k
<b>ICO<sub>j,t</sub></b>	Inventario de chatarra procesada en el procesador de chatarra j
<b>ICP<sub>j,t</sub></b>	Inventario de chatarra cruda en procesador de chatarra j
<b>ICX<sub>j</sub></b>	Costo de manejo de inventario de la chatarra procesada en procesador de chatarra j.
<b>ICZ<sub>j</sub></b>	Costo de manejo de inventario de la chatarra cruda en procesador de chatarra j

<b>IPP<sub>p,l</sub></b>	Costo de manejo de inventario del producto en planta laminadora l.
<b>IPT<sub>p,c</sub></b>	Costo de manejo de inventario del producto en centro de distribución c
<b>IQAk</b>	Costo de manejo de inventario de la palanquilla en acería k.
<b>IQL<sub>k,t</sub></b>	Inventario de Palanquilla en acería k en el periodo t
<b>IQÑI</b>	Costo de manejo de inventario de la palanquilla en laminadora l.
<b>IUP<sub>l,t</sub></b>	Inventario de palanquilla en laminadora l
<b>PAS<sub>i</sub></b>	Precio de Chatarra nacional
<b>PCXi</b>	Precio de comprar chatarra extranjera
<b>PPFj</b>	Precio de comprar chatarra procesada nacional fuera del conglomerado
<b>PPXj</b>	Precio de comprar chatarra procesada extranjera w
<b>PQFk</b>	Precio de comprar Palanquilla nacional fuera del conglomerado
<b>PQXk</b>	Precio de comprar Palanquilla extranjera
<b>PRECIOSI<sub>p</sub></b>	Precio de comprar producto terminado p a laminadora nacional fuera del conglomerado y extranjera fuera del conglomerado

**Restricciones**

Las ecuaciones (2) y (3) están asociadas con el inventario de chatarra en las procesadoras, las ecuaciones (4) y (5) con el inventario de chatarra procesada y palanquilla en las acerías,

las ecuaciones (6) y (7) con el inventario de palanquilla y productos en las laminadoras y la ecuación (8) con el inventario de productos terminados en los centros de distribución.

$$ICP_{j,t-1} + \sum_{i \in FCS} CCC_{i,j,t} + \sum_{i \in FCE} CCE_{i,j,t} - CXC_{j,t} = ICP_{j,t} \quad \forall t, j \in PPC [Ton] \quad (2)$$

$$ICO_{j,t-1} + CXC_{j,t} * CWP - \sum_{k \in PPA} CCJ_{j,k,t} = ICO_{j,t} \quad \forall t, j \in PPC [Ton] \quad (3)$$

Donde:

**CWP** Rendimiento de la chatarra cruda para convertirse en chatarra procesada

$$ICF_{k,t-1} + \sum_{j \in PPC} CCJ_{j,k,t} + \sum_{j \in PPN} CCK_{j,k,t} + \sum_{j \in PPW} CCL_{j,k,t} - CCF_{k,t} = ICF_{k,t} \quad \forall t, K \in PPA [Ton] \quad (4)$$

$$IQL_{k,t-1} + CCF_{k,t} * CMP - \sum_{l \in PPL} CCA_{k,l,t} = IQL_{k,t} \quad \forall t, k \in PPA [Ton] \quad (5)$$

Donde

**CMP** Rendimiento de la chatarra cruda para convertirse en chatarra procesada

$$IUP_{l,t-1} + \sum_{k \in PPA} CCA_{k,l,t} + \sum_{K \in PAN} CCZ_{k,l,t} + \sum_{K \in PAW} CCQ_{k,l,t} - \sum_{p \in P} CQP_{l,p,t} = IUP_{l,t} \quad \forall t, l \in PPL \text{ [Ton]} \quad (6)$$

$$IAB_{l,p,t-1} + CQP_{l,p,t} * CIP - \sum_c CLC_{p,l,c,t} = IAB_{l,p,t} \quad \forall p, t, l \in PPL \text{ [Ton]} \quad (7)$$

$$IAC_{p,c,t-1} + \sum_{l \in PPL} CLC_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLW} CCX_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLN} CCY_{p,l,c,t} - DEMANDA_{p,c,t} = IAC_{p,c,t} \quad \forall p, c, t \text{ [Ton]} \quad (8)$$

Donde:

**DEMANDA<sub>p,c,t</sub>** Cantidad demandada de producto *p* en zona de distribución *c* en el periodo *t*

$$ICP_{j,t} \leq CPD \quad \forall t, J \in PPC. \text{ [Ton]} \quad (12)$$

La ecuación (9) está relacionada con la capacidad en las procesadoras de chatarra, las ecuaciones (10), (11), (12), (13), (14) y (15) con la capacidad de producción y almacenamiento en las acerías, las ecuaciones (16), (17), (18) y (19) con la capacidad de producción y almacenamiento en las laminadoras y las ecuaciones (20) y (21) con la capacidad de almacenamiento en los centros de distribución.

$$\sum_{j \in PPC} CCC_{i,j,t} \leq CPC_i \quad \forall t, i \text{ [Ton]} \quad (9)$$

Donde:

**CPC<sub>i</sub>** Capacidad de generación de Fuentes de chatarra *i*

$$CXC_{j,t} \leq CPP_j \quad \forall t, j \in PPC \text{ [Ton]} \quad (10)$$

Donde:

**CPP<sub>j</sub>** Capacidad de procesar chatarra en el procesador de chatarra de conglomerado *j*.

$$ICO_{j,t} \leq CPW_j \quad \forall t, J \in PPC. \text{ [Ton]} \quad (11)$$

Donde:

**CPD<sub>j</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de chatarra cruda en procesador de chatarra *j*

$$CCF_{k,t} \leq CPA_k \quad \forall t \in PPA \text{ [Ton]} \quad (13)$$

Donde:

**CPA<sub>k</sub>** Capacidad de producción de palanquilla en acería de conglomerado *k*.

$$ICF_{k,t} \leq CQA_k \quad \forall t, k \in PPA, \text{ [Ton]} \quad (14)$$

Donde:

**CQA<sub>k</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de chatarra procesada en acería *k*

$$IQL_{k,t} \leq CQW_k \quad \forall t, k \in PPA, \text{ [Ton]} \quad (15)$$

Donde:

**CQW<sub>k</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de palanquilla en acería *k*.

$$\sum_p CQP_{p,l,t} * CIP \leq CPT_l \quad (16)$$

$$\forall l \in PPL \text{ [Ton]}$$

$$IUP_{l,t} \leq CQL_l \quad (17)$$

$$\forall t, l \in PPL, \text{ [Ton]}$$

$$IAB_{l,p,t} \leq CBB_l \quad (18)$$

$$\forall t, l \in PPL, p \in PB \text{ [Ton]}$$

Donde:

**CBB<sub>l,p</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de barras en laminadora l

$$IAB_{l,p,t} \leq CAL_l \quad (19)$$

$$\forall t, l \in PPL, p \in PA \text{ [Ton]}$$

Donde:

**CAL<sub>l,p</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de alambrcn en laminadora l

$$IAC_{c,p,t} \leq CAP_{c,p} \quad (20)$$

$$\forall t, p \in PAP, \text{ [Ton]}$$

Donde:

**CAP<sub>c,p</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de alambrcn en distribuidor k

$$IAC_{c,p,t} \leq CEP_{c,p} \quad (21)$$

$$\forall t, p \in PBP, \text{ [Ton]}$$

Donde:

**CEP<sub>c,p</sub>** Capacidad máxima de almacenamiento de barras en distribuidor c

Las ecuaciones (22), (23) y (24) estn relacionadas con la capacidad de venta de las fuentes externas y las ecuaciones (25), (26), (27) y (28) con el mximo despacho de los agentes internacionales. Por ltimo la ecuacin (29) garantiza la satisfaccin de la demanda.

$$CAP2 : CCK_{ppn, ppa, t} \leq CAPNAL \quad (22)$$

$$\forall ppn, ppa, t \text{ [Ton]}$$

$$CAP3 : CCZ_{pan, ppl, t} \leq CAPNAL \quad (23)$$

$$\forall pan, ppl, t \text{ [Ton]}$$

$$CAP4 : CCY_{p, pln, c, t} \leq CAPNAL \quad (24)$$

$$\forall p, pln, c, t \text{ [Ton]}$$

Donde:

**CAPNAL** Capacidad de venta de instalaciones nacionales de producto intermedio

**CAPNALI** Capacidad de venta de instalaciones nacionales por producto final

$$CCE_{fce, ppc, t} \leq CAPINT; \quad (25)$$

$$\forall (fce, ppc, t) \text{ [Ton]}$$

$$CCL_{ppw, ppa, t} \leq CAPINT; \quad (26)$$

$$\forall (ppw, ppa, t) \text{ [Ton]}$$

$$CCQ_{paw, ppl, t} \leq CAPINT; \quad (27)$$

$$\forall (paw, ppl, t) \text{ [Ton]}$$

$$CCX_{p,plw,c,t} \leq CAPINT; \tag{28}$$

$$\forall (p, plw, c, t) \quad [Ton]$$

Donde:

**CAPINT** Máximo despacho de agentes internacionales.

$$\sum_{l \in PPL} CLC_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PLW} CCX_{p,l,c,t} + \sum_{l \in PPL} CCY_{p,l,c,t} \geq DEMANDA_{t,p,c} \quad \forall t, c \in C, [Ton] \tag{29}$$

### Resultados y conclusiones

El modelo construido fue implementado en el software General Algebraic Modeling System -GAMS por medio del solver CPLEX® y solucionado en un computador Pentium 4 con 2,0 GB de RAM, para un año con períodos de planeación anuales, los parámetros utilizados fueron obtenidos a partir de la operación real de una de las compañías mas representativas del sector en Colombia, las estadísticas computacionales son mostradas en la tabla 1.

**Tabla 1** Estadísticas computacionales de cada escenario

<b>Resultados Totales</b>	
Restricciones	11.945
Variables Continuas	13.289

Los resultados para las principales variables del modelo construido se esquematizan en la figura 3 para un período del horizonte de planeación, identificando la producción en las plantas procesadoras, acerías y laminadoras, así como los flujos de materia prima, productos intermedios y productos terminados. Estos resultados permiten identificar tendencias de producción, manejo de inventarios y distribución, presentadas a lo largo del periodo de planeación. La materia

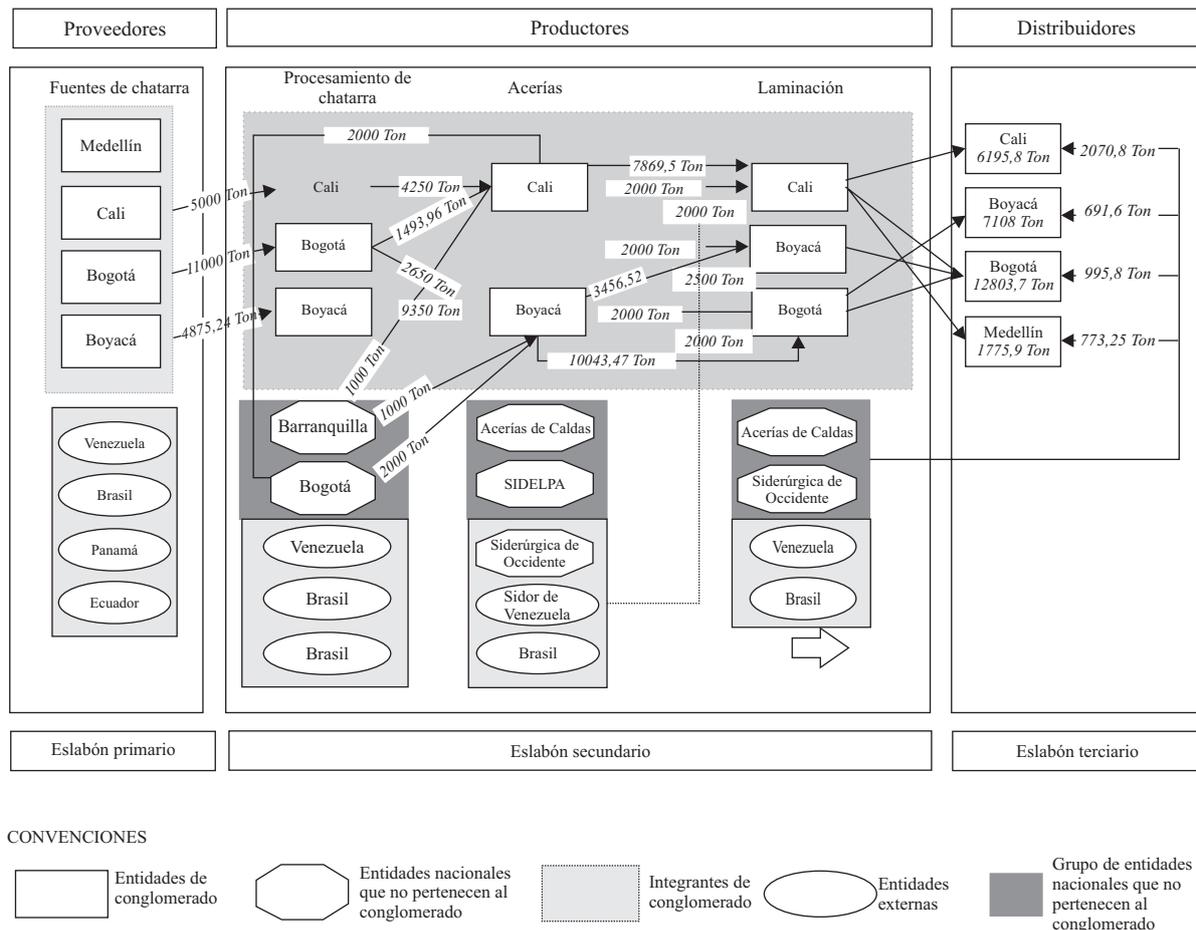
prima es comprada en las fuentes pertenecientes al conglomerado, principalmente a Boyacá, la cual abastece el 52,6% del total de chatarra cruda comprada por las plantas procesadoras, Bogotá abastece el 23,3%, mientras que Cali abastece el 24,1% restante. El procesamiento de chatarra se lleva a cabo en las tres entidades pertenecientes al conglomerado, Cali procesa el 23,9% de la chatarra, Boyacá el 52,8% y Bogotá el 23,3%, en total fueron procesadas 250.500 Toneladas a lo largo del periodo de planeación, manteniendo un volumen de producción constante en cada mes, las entidades externas no procesan chatarra. Debido a los costos de transporte, cada procesadora del conglomerado abastece de chatarra a las acerías ubicadas en su misma región, adicionalmente se presentan flujos de chatarra procesada entre las entidades nacionales no pertenecientes al conglomerado y las acerías, debido principalmente a la alta demanda presentada.

Del total de chatarra procesada, el 74,7% es adquirida en plantas pertenecientes al conglomerado, mientras que el 25,3% a entidades nacionales no pertenecientes al mismo.

En cuanto a la producción de palanquilla, las acerías ubicadas en Cali y Boyacá trabajan utilizando al máximo su capacidad productiva, convirtiéndose en el cuello de botella del sistema productivo. La acería de Boyacá procesa el 42% de la chatarra mientras que la acería ubicada en Cali procesa el 58% restante. Las plantas laminadoras por su parte trabajan en todos los periodos, Boyacá por ser la planta con la más alta cantidad producida tiene la más alta productividad, Boyacá y Cali producen de manera uniforme en todos los períodos y están en el limite de su capacidad, Bogota es la planta con la más alta variabilidad en cantidad producida en los meses del año y la única de todas las entidades del sistema productivo modelado que presenta estas fluctuaciones, este comportamiento puede esperarse ya que Bogota no cuenta en su mismo sitio geográfico con una acería, por tanto toda su materia prima (Palanquilla) debe ser proveída por las otras acerías del conglomerado o por

agentes externos. Esta entidad es por tanto el amortiguador del sistema que sopesa en mayor medida las fluctuaciones de la demanda, por esta situación en ningún periodo utiliza totalmente su capacidad, la cual se utiliza en un 75%. Los mayores flujos de productos se generan entre los centros de distribución que están en la misma planta de laminación esto debido al costo de flete igual a cero que esta transacción denota, este costo del flete hace que el modelo en busca de la minimización de los costos tienda a distribuir la mayor cantidad de productos por esta vía. Adicionalmente se genera transporte

entre la planta laminadora ubicada Boyacá y el centro de distribución ubicado en Bogotá, este flujo es permanente en todos los periodos y se debe en gran medida a que la planta laminadora ubicada en Bogotá tiene una baja capacidad de producción en comparación a la demanda, por tanto ésta es satisfecha por Boyacá la cual es una planta que tiene una alta capacidad de producción y es cercana. En cuanto las entidades externas, Venezuela es la única entidad que provee material al conglomerado debido a que presenta costos más competitivos y la relación con flete más favorable.



**Figura 3** Resultado de flujos de materia prima, productos intermedios y productos terminados para un mes determinado

La corrida del modelo de optimización arrojó un valor de \$ 384.522.211.387 (384.500 millones de

pesos), comparado con cálculos propios donde se promedia el cargo de costos por tonelada de cada

operación de esta industria se llega a la cifra de \$ 385.271.414.000 (385.271 millones de pesos) lo que equivale a un ahorro de aproximadamente \$ 749.200.00 anuales, la obtención de este valor se obtuvo con los valores promedios de operación por tonelada dados como aproximaciones de cada uno de los procesos de la empresa en la cual se basó el estudio, aunque este ahorro puede parecer pequeño al ser comparado con los ingresos de la compañía, puede ser invertido en bienestar para el personal como mejoras en infraestructura, incentivos, etc.

Al realizar un análisis de sensibilidad de los términos del lado derecho, se concluye que la capacidad de producción en las plantas procesadoras, laminadoras y acerías debe aumentar. Para el caso particular de la planta procesadora ubicada en Boyacá se observa que una capacidad de producción entre 7.875 y 11.000 toneladas hay un aumento de la función objetivo, de las 11.000 hasta las 12.000 toneladas hay una disminución y después de las 12.000 toneladas el valor de la función objetivo no cambia, por lo cual se recomienda aumentar la capacidad de la planta hasta 12.000 toneladas en caso de poderse ampliar con un estudio de costos que justifique dicho cambio, la tabla 2 muestra el valor de la función objetivo y el cambio en la misma para diferentes niveles de capacidad productiva.

La empresa de la cual se basó el estudio reconoce que la implementación de modelos matemáticos de optimización en cadenas de abastecimiento, es hoy en día reconocida como una herramienta clave para la competitividad de cualquier sector industrial, durante la elaboración del presente documento se obtuvieron fuentes bibliográficas que demuestran la implementación de metodologías y tecnologías propias de la investigación de operaciones dentro de diferentes compañías siderúrgicas en el mundo, como es el caso de Estados Unidos, Inglaterra y Japón, en Latinoamérica se han introducido modelos de optimización en la industria siderúrgica específicamente en Chile, y México. Colombia por su parte está aún en los comienzos de la implementación de estos tipos de sistemas a

nivel industrial, es representativo el número de organizaciones con sistemas ERP (Enterprise Resource Planning) los cuales se catalogan como organizadores y coordinadores de información compleja y dinámica, así mismo las grandes empresas han empezado a utilizar los APS (Advanced Planning and Scheduling) que además de las funciones del ERP son optimizadores. Este estudio presenta la construcción de modelos matemáticos como herramienta para la toma de decisiones en la industria siderúrgica semi-integrada en Colombia, integrando cada uno de los eslabones que componen la cadena de abastecimiento de forma estructurada, lo cual permite identificar tendencias en la producción y distribución de materias primas y productos terminados, dando un soporte para la toma de decisiones estratégicas en este sector.

**Tabla 2** Aumento en la capacidad productiva

<i>Capacidad de producción</i>	<i>Función objetivo</i>	<i>Diferencia</i>
7873	\$385.131.804.023,00	0
7874	\$385.131.804.023,00	\$-312.227,00
7875	\$385.131.491.796,00	\$-224.119,00
7876	\$385.131.267.677,00	\$-24.175.090,00
8000	\$385.107.092.587,00	\$-389.920.800,00
10000	\$384.717.171.787,00	\$-194.765.440,00
10999	\$384.522.406.347,00	\$-194.960,00
11000	\$384.522.211.387,00	
11001	\$384.522.016.427,00	\$194.960,00
11997	\$384.327.835.868,00	\$194.180.559,00
11998	\$384.327.640.908,00	\$194.960,00
11999	\$384.327.445.947,00	\$194.961,00
12000	\$384.327.250.987,00	\$194.960,00
13000	\$384.327.250.987,00	0
50000	\$384.327.250.987,00	0

Como investigación futura se plantea agregar competencia entre conglomerados o las plantas que procesan la chatarra, para abastecer otras plantas, así mismo hacer un análisis estocástico para el abastecimiento de chatarra, los niveles de demanda y la fluctuación de precios, también se podría extender el modelo para evaluar las localizaciones de las diferentes plantas que conforman el denominado conglomerado, por último se propone hacer un análisis desde el punto de vista del manejo de residuos sólidos, identificando su impacto medioambiental.

### Agradecimientos

Parte de este trabajo se desarrolló en marco de la visita hecha en por MSc Edgar Gutiérrez Franco CTL-MIT apoyada por el convenio CLI y la Universidad de La Sabana. Los autores agradecen también los comentarios del evaluador anónimo que permitieron mejorar el contenido y la presentación del artículo, así mismo a los Ingenieros Ricardo Carmona y Germán Escobar, que gracias a sus aportes se logró consolidar la validación final del modelo matemático de este trabajo

### Referencias

1. M. Goetschalckx, C. J. Vidal, K. Dogan. "Modeling and Design of Global Logistic System: A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms". *European Journal of Operational Research*. Vol. 143. 2002. pp.1-18.
2. J. Velásquez. *Optimización de la cadena de suministro en la industria de bebidas*. Congreso de Ingeniería de Producción. Medellín. Octubre 4-6. 2001. Universidad EAFIT. 2001. pp. 25-44.
3. E. Gutiérrez, A. Cadena, F. Palacios. "Strategic Planning of the biodiesel industry in Colombia". *Proceedings Congreso Latinoamericano de Investigación de Operaciones CLAIO*. Cartagena. Septiembre 9-12. 2008. pp. 45-46.
4. Decision Ware LTDA. A Knowledge Company. <http://www.decisionware-ltd.com/> . Consultada el 15 de junio de 2008.
5. SINMAF LTDA. <http://www.decisionware-ltd.com/>. Consultada el 23 de julio de 2008
6. Departamento de Planeación Nacional. Siderurgia. [www.dnp.gov.co/archivos/documentos/DDE\\_Desarrollo\\_Emp\\_Industria/Sidelerurgia.pdf](http://www.dnp.gov.co/archivos/documentos/DDE_Desarrollo_Emp_Industria/Sidelerurgia.pdf). Consultada el 12 de octubre de 2008.
7. H. Gunnarsson. *Supply chain optimization in the forest industry*. Dissertation N°. 1105. Linkoping University. Linkoping. 2007. pp. 31-63.
8. J. P. Antún. "Administración de la Cadena de Suministro". *Segmento. Revista de Mercadotecnia de la Escuela de Negocios*. N°. 17. 2002. pp. 10-17.
9. M. Porter. *Ventaja Competitiva: Creación y Sostentamiento de un Desempeño Superior*. Compañía Editorial Continental S.A. México. 1996. pp. 15-60.
10. C. J Vidal. *A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation*. Disertación Doctoral. Escuela de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Georgia Institute of Technology. Atlanta. (GA). 1998. pp. 15-50.
11. A. M Geoffrion, G. W. Graves, S. J. Lee. "A Management Support System for Distribution Planning". *Infor*. Vol. 20. 1982. pp. 287-314.
12. A. M Geoffrion, G. W Graves S. J. Lee. "Strategic Distribution System Planning: A Status Report". *Studies in Operations Management*. A. Hax (editor). Ed. Elsevier. Amsterdam. 1978. pp. 179-204.
13. A. M Geoffrion, G. W Graves. "Multicommodity distribution system design by Benders decomposition". *Management Science*. Vol. 20. 1974. pp. 822-844.
14. B. C. Arntzen, T. P Harrison, L. L. Trafton. "Global supply chain management at digital equipment corporation". *Interfaces*. Vol. 25. 1995. pp. 69-93.
15. M. Goetschalckx, C. J. Vidal, K. Dogan. "Modeling and Design of Global Logistic System: A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms." *European Journal of Operational Research*. Vol. 143. 2002. pp. 1-18.
16. E. Eskigun, R. Uzsoy, P Preckel, G. Beaujon, S. Krishnan, J. Tew. "Outbound Supply Chain Network Design With Mode Selection, Lead Times and Capacitated Vehicle Distribution Centers". *European Journal of Operational Research*. Vol. 165. 2005. pp. 182-206.
17. F Vasko, E. Flyd. "Wolf Systems Analysis Group Bethlehem Steel Corporation". *Interfaces* Vol. 21. 1991. pp. 1-7.
18. A Díaz, L Sancho. "Departamento de Control de proceso Empresa Nacional Siderúrgica ENSIDESA". *Interfaces*. Vol. 21. 1991. pp. 53-62.

19. F. Bielefeld. "A Computer-Based Strategic Planning System for Steel Production". *Interfaces*. Vol 16. 1986. pp. 41-46.
20. IMC. Información Minera de Colombia. "La Industria Siderúrgica Mantiene Ritmo de Crecimiento". <http://www.imcportal.com/newsfiles/20080817022222.pdf>. Consultada el 15 de octubre de 2008.
21. [http://www.ecuadorexporta.org/productos\\_down/perfil\\_del\\_sector\\_metalico\\_en\\_colombia494.pdf](http://www.ecuadorexporta.org/productos_down/perfil_del_sector_metalico_en_colombia494.pdf). Consultada el 10 de octubre de 2008.
22. M. Díaz, L. Mateus. "Estado del Sector Siderúrgico en Colombia". *Revista Ingeniería UNIANDES*. N°. 19. 2003. pp. 74-80.
23. DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Informe de Balanza comercial, Hierro y Hacer. [www.dane.gov.co/files/observatorio\\_competitividad/compet\\_industrial/comp\\_ind\\_hierro-acero\\_IIItrim05.xls](http://www.dane.gov.co/files/observatorio_competitividad/compet_industrial/comp_ind_hierro-acero_IIItrim05.xls). Consultada el 12 de octubre de 2008.