

# Rediseño de una red de distribución con variabilidad de demanda usando la metodología de escenarios

Redesign of a supply chain with the variability of the demand by using the methodology based on scenarios

Fecha de recepción: 3 de mayo de 2012  
Fecha de aprobación: 5 de junio de 2012

John Willmer Escobar\*

## Resumen

Este artículo presenta el problema del diseño de una red de distribución de gran escala con variabilidad en la demanda. Se parte de una estructura de red establecida, cuya problemática central radica en la determinación de las decisiones de cierre o apertura de los centros de distribución. El problema se ha solucionado utilizando la metodología de optimización mediante escenarios; dicha metodología usa un esquema de optimización basado en la generación de múltiples escenarios de los parámetros críticos de la red. El modelo está basado en el caso de una compañía multinacional de alimentos que abastece todo el territorio colombiano y varios mercados internacionales. Los resultados obtenidos reflejan la importancia y eficiencia de la metodología propuesta para el tratamiento de la variabilidad en la demanda, en el diseño de redes de distribución.

**Palabras clave:** Diseño de redes de suministro,

## Abstract

It presents the supply chain design problem with variability of the demand for a large-scale company. It is considered as starting point, for an established supply chain, which its main problem consists the distribution centers contraction or expansion's decisions. The problem is solved by using a methodology based on scenarios. This strategy uses an approximation scheme by generating the considered supply chain critical parameters' multiple scenarios. The model is based on a real-world case taken from a multinational food company, which supplies the Colombian territory and several international markets. The results show the importance and efficiency of the proposed approach as an alternative to the treatment of the variability of the demand for supply chain design.

**Keywords:** Supply Chain Design, Demand Variability, Methodology Based on Scenarios, Optimizing Methodology, Logistics.

\* Ingeniero Industrial, Universidad del Valle. Especialista en Finanzas, Universidad del Valle. Magister en Ingeniería Industrial, Universidad del Valle. Ph.D. in Operations Research and Computer Sciences, University of Bologna. Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia. Correo electrónico: johnwillmer.escobar2@unibo.it

Redes de distribución con variabilidad de demanda, Metodología de escenarios, Metodología de optimización.

## I. INTRODUCCIÓN

Una red de distribución se puede definir como un conjunto de instalaciones (proveedores, plantas, centros de distribución, etc.) que tienen un constante intercambio de flujo de productos e información, con el fin de satisfacer las necesidades de los consumidores finales (último eslabón de la red). La administración de una red de distribución incluye, normalmente, la coordinación y el control de operaciones de compra, procesamiento, transporte, almacenamiento y distribución de productos.

El proceso de administración de la cadena de abastecimiento comprende tres *niveles de decisión*, que dependen del horizonte de tiempo. El primer nivel está relacionado con *decisiones estratégicas*, las cuales tienen el mayor horizonte de tiempo (superior a un año); en este nivel, generalmente, se consideran las decisiones sobre selección de proveedores, número, tamaño y ubicación de instalaciones, tipo de productos para fabricar y/o distribuir y las decisiones de tercerización de alguna de las operaciones logísticas. El segundo nivel está relacionado con *decisiones tácticas*, que generalmente tienen un horizonte de tiempo menor de un año; este nivel considera decisiones como la selección de técnicas de pronóstico de demanda, la administración y control de inventarios, la determinación de políticas de producción, almacenamiento y distribución, y la selección de modos de transporte, entre otras. Finalmente, el tercer nivel incluye *decisiones operacionales*, que deben tomarse en términos de días u horas; generalmente, este nivel comprende decisiones de planificación de recursos, determinación de planes de emergencia, prioridades y asignación de *picking*, distribución de carga y ruteo de vehículos, entre otras.

El problema considerado en este artículo se refiere al rediseño de una red de distribución de productos de consumo masivo, que involucra la toma de *decisiones estratégicas* (cierre o apertura de centros de

distribución) y *decisiones tácticas* (determinación de flujos de abastecimiento y distribución de productos entre las instalaciones). El problema está relacionado con el caso de una compañía multinacional de alimentos que abastece a todo el territorio colombiano y a varios mercados internacionales, dentro de los que se destacan Venezuela, Ecuador, Chile y algunos países de Centro América. La compañía cuenta con más de 1.800 clientes nacionales y más de 2.000 internacionales. La red de distribución considera un flujo continuo de productos entre plantas y centros de distribución, por medio del transporte terrestre con un operador logístico.

En la actualidad, el diseño de redes de distribución es un asunto altamente complejo, considerando los efectos actuales y venideros de las medidas de apertura de mercados, procesos de globalización y diferentes tratados de libre comercio. Adicional a ello, a pesar de existir ciertos desarrollos teóricos relevantes relacionados con esta problemática, las compañías no cuentan con una metodología clara para la toma de decisiones a nivel estratégico y táctico frente a su red de distribución; a esto se suma que las herramientas computacionales (software y equipos de cómputo especializados) no parecen estar al alcance de ellas.

De acuerdo con Chen [1], las decisiones de orden estratégico y táctico en el diseño o rediseño de una red de distribución son, generalmente, difíciles de revertir e involucran inversiones significativas en términos de tiempo y dinero. Estas decisiones se tornan más complejas en ambientes de incertidumbre en cuanto a demandas, precios, costos, tasas de cambio, etc. En este contexto, lo que puede ser hoy una «inversión óptima», en términos del diseño de una red de distribución, en un futuro cercano podría ser una «inversión desastrosa»; de ahí que sea necesario representar la variabilidad de los parámetros críticos de la red en los modelos de decisión actuales.

En ambientes de incertidumbre no se encuentra disponible toda la información, y algunos parámetros de una red de suministro deben ser modelados como

variables aleatorias; en ese sentido, la construcción de modelos de programación lineal entera mixta, acompañados de técnicas de solución basadas en escenarios, proveen métodos eficientes para obtener soluciones frente al problema de rediseño de redes de distribución de productos de consumo masivo, con variabilidad de la demanda.

En el presente artículo se propone la solución de la problemática de diseño de redes de distribución de productos de consumo masivo, propuesta por Escobar *et al.* [2, 3], mediante la optimización basada en escenarios; en este problema se parte de un sistema de distribución de tres eslabones (plantas, centros de distribución y clientes), frente al cual se deben tomar decisiones de funcionamiento o cierre de centros de distribución. El principal aporte del artículo es la extensión de la literatura en términos de la aplicabilidad de la metodología de optimización basada en escenarios, para un caso real de una compañía multinacional. En la literatura son pocos los artículos que incluyen la solución de casos de rediseño de redes de distribución con variabilidad de la demanda, aplicando la metodología de optimización basada en escenarios.

En primera instancia, se ha reformulado el modelo matemático de programación entera mixta determinístico (MILP), propuesto por Escobar *et al.* [2], de acuerdo con la metodología de optimización basada en escenarios propuesta por Tsiakiset *al.* [4]. Esta metodología busca optimizar simultáneamente todos los escenarios propuestos mediante la formulación de un modelo de programación lineal entera mixta. En seguida, se han generado tres escenarios de demanda de acuerdo con la metodología propuesta por Kim [5], con los cuales se trata de validar el modelo mediante el análisis de respuestas y la experimentación.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección II se presenta la revisión de la literatura del diseño de redes de suministro con elementos estocásticos; la sección III presenta la formulación del modelo matemático de programación entera mixta y la estructura general de la metodología de solución, y finalmente, los resultados

computacionales y las conclusiones son presentados en las secciones IV y V, respectivamente.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

El problema de la apertura o el cierre de instalaciones (plantas, centros de distribución, almacenes, entre otros) es considerado una decisión de orden estratégico. En particular, este problema incluye decisiones de tamaño, cantidad y ubicación física de dichas instalaciones [6]. Algunas aplicaciones exitosas con modelos de diseño de redes, considerando decisiones de apertura y cierre a nivel nacional e internacional, pueden ser consultadas en los trabajos de Camm *et al.* [7] y Laval *et al.* [8]. De acuerdo con Chopra y Meindl [9], los elementos claves en estos modelos son tres: *instalaciones*, *ubicaciones geográficas* y *clientes*.

Las *instalaciones* hacen referencia a un conjunto de estructuras físicas que deben ser ubicadas en un espacio geográfico determinado. En la práctica, las *instalaciones* pueden ser plantas de producción, almacenes, centros de distribución, tiendas, entre otras.

Las *ubicaciones geográficas* representan el lugar o espacio físico donde se van a ubicar dichas *instalaciones*. Berman y Krass [10], reconocen tres tipos de modelos de diseño de redes de distribución de acuerdo con la tipología de la *ubicación geográfica*: localización en redes, donde la topología es una red y las *ubicaciones geográficas* son nodos que tienen límites dentro de una red; localización continua, en esta la topología es un espacio geográfico en general y las *instalaciones* se pueden ubicar en cualquier punto de dicho espacio, y la localización discreta, que permite contar con un listado de *ubicaciones geográficas* predeterminadas que deben ser evaluadas para la localización potencial de las *instalaciones*.

Los *clientes* son las personas o instituciones que requieren un servicio o un producto. Los clientes son los eslabones principales en el proceso de jalonar la actividad productiva de la red de suministro, ya que finalmente son ellos quienes definen la cantidad de

producto o servicio (demanda). De acuerdo con Scaparra y Scutella [11], la demanda de los clientes en una red de distribución se puede categorizar de la siguiente manera:

- Demanda determinística estática: se considera que la demanda se conoce con certeza y es constante en el tiempo, por lo que puede ser estimada a priori.
- Demanda determinística variable: se asume un comportamiento similar a la demanda determinística estática, con variación en el tiempo.
- Demanda incierta: se clasifica así cuando no se pueden conocer con certeza los valores de la demanda. Generalmente, se cuenta con información histórica para establecer una distribución probabilística de la demanda.
- Demanda desconocida: en este caso no se conoce la distribución de probabilidades de la demanda, por lo que se deben hacer estimados a priori que posteriormente se actualizan de acuerdo con la observación real del comportamiento de la demanda.

En particular, el problema de investigación considerado en este estudio se centra en el análisis del funcionamiento o cierre de centros de distribución (*instalaciones*), mediante modelos de diseño de redes de distribución discretos (*ubicaciones geográficas*), con demandas inciertas en las zonas de consumo nacional e internacional (*clientes*).

La literatura que considera el factor incertidumbre en los modelos de diseño de redes ha sido dividida en dos grandes aproximaciones: *aproximación probabilística* y *aproximación basada en escenarios*.

Modelos basados en la *aproximación probabilística* representan la incertidumbre mediante la consideración de los parámetros de la cadena de suministro como variables aleatorias, con distribución de probabilidad conocida. La solución de modelos de redes de distribución bajo esta aproximación requiere un alto grado de complejidad matemática para su solución. Este tipo de modelos han sido estudiados por Chen *et al.* [1], Dasci y Laporte [12], Gabor y Van Ommeren [13], y Yu y Li [14] entre otros.

En los modelos de *aproximación basada en escenarios*, la incertidumbre en la cadena es representada por un número discreto de escenarios de los parámetros aleatorios [4]. De acuerdo a Gupta y Maranas [15], cada escenario tiene un nivel de probabilidad asociado, que representa las expectativas de quien toma las decisiones respecto a la ocurrencia de un hecho. En la metodología basada en escenarios, la idea es encontrar soluciones robustas que tengan un buen desempeño en todos los escenarios.

En los análisis de Schilling [16] se consideró la aplicación de la metodología basada en escenarios frente al problema de cubrimiento máximo. En este trabajo, se utilizó una metodología comparativa entre los sitios potenciales en común para cada escenario y las diferencias máximas entre la solución promedio y el valor de la solución de los sitios óptimos de cada escenario. En Daskin *et al.* [6] se abarca el enfoque de escenarios para el problema de la p-mediana. En Tsiakis *et al.* [4] se considera el diseño de una cadena multiproducto con múltiples eslabones, utilizando la aproximación basada en escenarios. El sistema es modelado como un problema de programación lineal entera mixta. La función objetivo es la minimización de los costos totales de la red. En Serra y Marianov [17], se propone el uso de árboles de escenarios para la solución de un problema dinámico de localización. En este trabajo se demuestra que es posible establecer correlaciones causales entre escenarios para su posterior evaluación, como lo describen Lario *et al.* [18]. Una metodología basada en 12 pasos es la propuesta de Vanston *et al.* [19] para el desarrollo de escenarios de acuerdo con el impacto (o valor agregado) que generan al problema considerado.

Trabajos relacionados con el diseño de cadenas de suministros estocásticas multiobjetivo, que consideran la generación de escenarios como técnica de solución, han sido propuestos por Guillén *et al.* [20], Azaron *et al.* [21] y Cardona-Valdés *et al.* [22]. En los estudios de Guillén [20] se tiene en cuenta un problema relacionado con dos etapas del diseño de una cadena de abastecimiento con múltiples eslabones. La incertidumbre en el problema es representada mediante un conjunto de escenarios

con una probabilidad de ocurrencia dada. La maximización del valor presente neto (VPN) en la cadena de abastecimiento y la minimización del riesgo financiero son las funciones objetivo que se quieren optimizar. En Azaron *et al.* [21], varios parámetros (demandas, abastecimiento, costos de transporte, etc.) han sido considerados como inciertos. En este trabajo son tres los objetivos estudiados: i) minimización de los costos totales de logística, ii) minimización de la varianza del costo total y iii) minimización del riesgo financiero. Finalmente, en Cardona-Valdés *et al.* [22] se aborda un problema de diseño de redes biobjetivo con múltiples eslabones; en este trabajo se toma en cuenta un modelo de optimización estocástica con incertidumbre en la demanda modelada a través de escenarios.

Un modelo matemático para el problema de diseño de una red de abastecimiento con recursos compartidos e incertidumbre en la demanda es presentado por Georgiades *et al.* [23]. La incertidumbre en la demanda es modelada a través de escenarios durante el ciclo de vida de la red. El modelo es resuelto de manera exacta usando técnicas de ramificación y acotamiento. Un caso de aplicación en el mercado europeo se presenta como ilustración.

Una aplicación interesante del diseño de redes de distribución estocástica con incertidumbre en la demanda, para una compañía que produce y comercializa hidrógeno, puede ser consultada en Kim *et al.* [5]. En este trabajo son considerados tres escenarios para modelar la incertidumbre de la demanda.

Trabajos recientes sobre enfoque de escenarios para problemas de diseño de redes de abastecimiento han sido propuestos por Kilbi y Martel [24], Longinidis y Georgiadis [25] y Hsu y Li [26]. En [24] se propone un enfoque de modelado de riesgos para el diseño de cadenas de suministro con incertidumbre; la utilidad del enfoque ha sido validada en dos casos reales. La metodología *Simulación Montecarlo* ha sido usada para la generación de los escenarios futuros. Un modelo de diseño de redes que integra

consideraciones financieras bajo incertidumbre de demanda ha sido propuesto por Longinidis y Georgiadis [25]. Finalmente, Hsu y Li [26] presentan un trabajo asociado con el diseño de redes de abastecimiento, considerando economías de escala y variaciones de la demanda.

### III. REDISEÑO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Este trabajo considera el problema del rediseño de una red de distribución multiproducto de tres eslabones, considerado en Escobar *et al.* [2, 3]. La red consiste en un conjunto de plantas existentes con potencial ampliación de capacidad, un conjunto de centros de distribución ya establecidos y un conjunto de zonas de mercado nacional e internacional. En particular, se deben tomar decisiones de cierre y consolidación de centros de distribución y asignación de flujo de productos a través de la red.

La infraestructura de la red se valora dentro de un único país, con exportación de ítems hasta los puertos de despacho. Se busca minimizar los costos totales logísticos, los cuales incluyen costos de cierre de centros de distribución, costos de transporte, costos de producción, costos de manipulación de productos en centros de distribución y costos de inventario. En la red de distribución se permite el flujo de productos entre centros de distribución y hacia los clientes finales. No se consideran flujos de productos directos entre plantas y clientes. Se toma en cuenta una flota suficiente de vehículos homogéneos. La demanda de productos en cada zona de consumo (clientes) es variable y con una distribución de probabilidad conocida. Para modelar dicha variabilidad, son considerados tres escenarios de demanda con una probabilidad determinada [5]. La variabilidad en los tiempos de respuesta no se ha incluido, y se considera como un factor constante para todo el flujo de producto en una ruta determinada.

#### A. Conjuntos, variables y parámetros

El modelo propuesto por Escobar *et al.* [2, 3] se ha modificado incluyendo los escenarios usados para capturar la variabilidad de la demanda. Los siguientes conjuntos principales e inducidos son considerados:

### Conjuntos principales

- $PL$  = Conjunto de plantas de manufactura, indexadas por  $i$
- $CD$  = Conjunto de centros de distribución, indexados por  $j$
- $C$  = Conjunto de zonas geográficas de clientes, indexadas por  $k$
- $PT$  = Conjuntos de productos terminados, indexados por  $p$
- $S$  = Conjunto de escenarios, indexados por  $s$

### Conjuntos inducidos

- $CDEN$  = Conjunto de centros de distribución que pueden recibir productos enviados desde el centro de distribución  $j \in CD$ ,  $CDEN \subseteq CD$
- $CDRE$  = Conjunto de centros de distribución que pueden enviar productos al centro de distribución  $j \in CD$ ,  $CDRE \subseteq CD$

El modelo utiliza el siguiente conjunto de variables binarias y continuas:

### Variables de decisión

#### Variables binarias

- $w_j = 1$  si el centro de distribución  $j$  se decide dejar abierto, 0 de lo contrario.

#### Variables continuas

- $x_{ijps}$  = Cantidad de producto terminado  $p \in PT$  a fabricar en la planta  $i \in PL$ , enviado hacia el centro de distribución  $j \in CD$  en el escenario  $s \in S$ . [unidades de  $p$  / año].
- $u_{jj^*ps}$  = Cantidad de producto terminado  $p \in PT$  a enviar hacia centro de distribución  $j^* \in CDEN$  desde centro de distribución  $j \in CDRE$  en el escenario  $s \in S$ , donde  $j \neq j^*$ . [unidades de  $p$  / año].
- $y_{jkps}$  = Cantidad de producto terminado  $p \in PT$  enviado hacia las zonas de consumo  $k \in C$  desde el centro de distribución  $j \in CD$  en el escenario  $s \in S$ . [unidades de  $p$  / año].

- $Capad_{is}$  = Capacidad adicional de producción a considerar en la planta  $i \in PL$  para todos los productos terminados en el escenarios  $s \in S$ .

### Parámetros

- $Cf_j$  = Costo fijo de cierre del centro de distribución  $j \in CD$  [\$/año].
- $VIP_{jp}$  = Costo de mantenimiento de inventario de producto terminado  $p \in PT$  en el centro de distribución  $j \in CD$ ; [\$/unidad de  $p$ ].
- $FPT_{jp}$  = Factor de inventario de seguridad del producto  $p \in PT$  en centro de distribución  $j \in CD$ .
- $LTP_{jk}$  = Tiempo promedio de reposición de productos desde centro de distribución  $j \in CD$  hacia la zona de mercado  $k \in C$  [días].
- $LTB_{jj^*}$  = Tiempo promedio de reposición de productos desde centro de distribución  $j \in CDRE$  hacia centro de distribución  $j^* \in CDEN$ ,  $j \neq j^*$  [días].
- $CVLTP_{jk}$  = Coeficiente de variación del tiempo de reposición  $LTP_{jk}$ .
- $CVLTP_{jj^*}$  = Coeficiente de variación del tiempo de reposición  $LTB_{jj^*}$ .
- $CTRPT_{ij}$  = Costo de transporte de producto terminado  $p \in PT$  desde la planta  $i \in PL$  hacia el centro de distribución  $j \in CD$  [\$/kg].
- $CTRPTCD_{jj^*}$  = Costo de transporte de producto terminado  $p \in PT$  desde centro de distribución  $j \in CDRE$  hacia centro de distribución  $j^* \in CDEN$  [\$/kg],  $j \neq j^*$ .
- $CTRPTC_{jk}$  = Costo de transporte de producto terminado  $p \in PT$  desde el centro de distribución  $j \in CD$  hacia el cliente  $k \in C$  [\$/kg].
- $FP_p$  = Factor de peso por unidad de  $p \in PT$  [kg/unidad de  $p$ ].
- $CP_{ip}$  = Costo variable de fabricación del producto terminado  $p \in PT$  en la planta  $i \in PL$  [\$/kg. de  $p$ ].
- $CMANCD_{jp}$  = Costo de manipulación del producto terminado  $p \in PT$  en el centro de distribución  $j \in CD$  [\$/kg. de  $p$ ].
- $PCAP$  = Costo de penalización por cada unidad

de la variable  $Capd_{ips}$  [\$/ unidad].

- $CAPL_i$  = Capacidad de producción en la planta  $i \in PL$  para todos los productos  $p \in PT$  [kg/año].
- $CAPCD_j$  = Capacidad del flujo a través del centro de distribución  $j \in CD$  para todos los productos  $p \in PT$  [kg/año].

En adición, los parámetros de demanda inicialmente formulados por Escobar *et al.* [2], como  $DEM_{kp}$  = demanda del producto terminado  $p \in PT$  en la zona de mercado  $k \in C$ , han sido remplazados por los parámetros  $DEM_{kps}$ .

### B. Generación de escenarios

En este artículo se ha considerado que la demanda de cada producto en cada zona de consumo es un parámetro aleatorio independiente. Los escenarios  $s \in S$  son generados sobre la base de la metodología propuesta por Kim *et al.* [5]. El número de escenarios surge de la variación de los valores de demanda paracada producto en cada zona de consumo, de acuerdo con las siguientes consideraciones particulares: por encima del promedio (*above average*), iguales al promedio (*average*), por debajo del promedio (*below average*). De esta forma, tres escenarios son obtenidos para el análisis de la red de distribución. Numéricamente los escenarios «*above average*» y «*below average*» son asociados a los

límites superior e inferior del intervalo de confianza para cada producto, en cada zona de consumo. Para el cálculo de los intervalos de confianza se ha utilizado la metodología general, basada en funciones pivotes para cada distribución de probabilidad propuesta por Rice [27].

Para el cálculo de la función objetivo, se asume que la probabilidad de cada escenario  $s$  es conocida y es denotada por  $\varphi_s$ ; estas probabilidades deben satisfacer la siguiente ecuación:

$$\sum_{s=1}^{|S|} \varphi_s = 1 \quad (1)$$

Al igual que en los trabajos de Kim *et al.* [5], en estos se ha determinado que cada uno de los tres escenarios  $s \in S$  tienen igual probabilidad de ocurrencia  $\varphi_s = 1/3$ , para  $s = 1, 2, 3$ .

### C. Modelo matemático de rediseño de la red de distribución

De acuerdo con las consideraciones descritas en las secciones A y B del capítulo III, el modelo matemático estocástico de rediseño de la red utilizando escenarioses formulado de la siguiente manera:

Minimizar  $Z =$

$$\sum_{j \in CD} CF_j \times [1 - w_j] \quad (2)$$

$$+ \sum_{s \in S} \varphi_s \times \left( \sum_{j \in CD} \sum_{k \in C} \sum_{p \in PT} VIPT_{jp} [FPT_{jp} \times CVLTP_{jk} \times LTP_{jk}] \right) y_{jkps} \quad (3)$$

$$+ \sum_{j \in CD} \sum_{j^* \in CDEN} \sum_{p \in PT} VIPT_{jp} [FPT_{jp} \times CVLTP_{j^*p} \times LTP_{j^*p}] u_{j^*ps} \quad (4)$$

$$+ \sum_{i \in PL} \sum_{j \in CD} \sum_{p \in PT} CTRPT_{ij} \times FP_p \times x_{ijps} \quad (5)$$

$$+ \sum_{j \in CD} \sum_{j^* \in CDEN} \sum_{p \in PT} CTRPTCD_{jj^*} \times FP_p \times u_{jj^*ps} \quad (6)$$

$$+ \sum_{j \in CD} \sum_{k \in C} \sum_{p \in PT} CTRPTC_{jk} \times FP_p \times y_{jkps} \quad (7)$$

$$+ \sum_{i \in PL} \sum_{j \in CD} \sum_{p \in PT} CP_{ip} \times x_{ijps} \quad (8)$$

$$+ \sum_{j \in CD} \sum_{k \in C} \sum_{p \in PT} CMANCD_{jp} \times y_{jkps} + \sum_{j \in CD} \sum_{j^* \in CDEN} \sum_{p \in PT} CMANCD_{jp} \times u_{jj^*ps} \quad (9)$$

$$+ \sum_{i \in PL} PCAP \times Capad_{is} \quad (10)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j \in CD} \sum_{p \in PT} FP_p \times x_{ijps} \leq CAPL_i + Capad_{is} \quad \forall i \in PL, s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{i \in PL} \sum_{p \in PT} FP_p \times x_{ijps} + \sum_{j \in CDRE} \sum_{p \in PT} FP_p \times u_{jj^*ps} \leq CAPCD_j \times w_j \quad \forall j \in CD, s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{i \in PL} x_{ijps} + \sum_{j^* \in CDRE} u_{jj^*ps} = \sum_{k \in C} y_{jkps} + \sum_{j^* \in CDEN} u_{jj^*ps} \quad \forall j \in CD, p \in PT, s \in S \quad (13)$$

$$\sum_{j \in CD} y_{jkps} = DEM_{kps} \quad \forall k \in C, p \in PT, s \in S \quad (14)$$

$$x_{ijps}, y_{jkps}, u_{jj^*ps}, Capad_{is}, \geq 0 \quad \forall i, j, j^*, k, p, s; w_j \in [0,1] \quad \forall j \quad (15)$$

La función objetivo del modelo matemático considera la minimización de la suma de los costos fijos de cierre en centros de distribución (2) y de la suma del valor esperado de los costos de inventario de seguridad en centros de distribución (3) y (4), de los costos de transporte de producto terminado de plantas hacia centros de distribución (5), de los costos de transporte de producto terminado entre centros de distribución (6) y de centros de distribución hacia clientes (7), de los costos variables de producción en plantas (8), de los costos de manejo de productos en centros de

distribución (9), y de los costos de penalización por uso de capacidades adicionales en plantas (10).

Las ecuaciones (11) y (12) restringen la capacidad en las plantas y centros de distribución, respectivamente. Las restricciones (13) determinan el balance de productos en los centros de distribución. El grupo de restricciones (14) asegura el cumplimiento de la demanda de cada producto, en cada zona de consumo y para cada escenario. Finalmente, el grupo de las ecuaciones (15) están relacionadas con las



restricciones de no negatividad de las variables consideradas en el modelo.

El principal supuesto del modelo que se propone es que la estructura de la red de distribución es independiente del escenario. De acuerdo con Tsiakis *et al.* [4], en muchos casos esta presunción no es necesaria, debido a que los costos asociados con el transporte son relativamente pequeños (específicamente cuando el transporte es tercerizado).

#### IV. RESULTADOS COMPUTACIONALES

El modelo matemático fue adaptado de acuerdo con las características de la compañía multinacional de alimentos. La empresa cuenta con alrededor de 40 familias de productos que representan aproximadamente 410 SKU's. En este caso se consideran dos plantas de producción y cinco centros de distribución.

El modelo matemático ha sido implementado en C++ y los experimentos fueron desarrollados en una Intel CoreDuo CPU (2.00 GHz) bajo Linux Ubuntu 11.04 con 2 GB de memoria. Las distribuciones de demanda fueron obtenidas mediante el software Oracle Crystal Ball. El solver de optimización utilizado fue CPLEX 11.1.

En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos al aplicar al caso en estudio el procedimiento de optimización basado en escenarios.

**Tabla 1.** Reporte de resultados para el modelo basado en escenarios

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| Costo total esperado (en \$)     | 59.043.511 |
| Demanda (kg productos)           | 17.447.123 |
| Centros de distribución abiertos | 3          |
| Variables de decisión            | 50.578     |
| Número de restricciones          | 16.865     |
| Tiempo computacional (segundos)  | 17,23      |

La Tabla 1 presenta el costo total esperado de la red de distribución de acuerdo con la función objetivo descrita en el capítulo III, sección C; de igual forma, presenta la demanda, considera en kg de

productos, y el número de centros de distribución óptimos que se deben mantener operando. Finalmente, se presentan la información y las estadísticas computacionales sobre el número de variables, restricciones y tiempo computacional.

#### V. CONCLUSIONES

El diseño de redes de distribución es un problema altamente complejo debido a consideraciones de incertidumbre en la demanda de productos, en las diferentes zonas de consumo. Recientemente, esta problemática ha recibido una gran atención por parte de la comunidad científica, que ha estudiado el tema utilizando diversas metodologías.

Este trabajo ha propuesto un modelo basado en la generación de escenarios para considerar la variabilidad en la demanda en las diferentes zonas de consumo. En comparación con la metodología de optimización estocástica propuesta por Escobar *et al.* [2] y [3], la generación de escenarios basada en el concepto estadístico de intervalos de confianza, provee una metodología de solución de menor complejidad y de manejo más general a nivel empresarial. Básicamente, a medida que se aumenta la cantidad de parámetros con incertidumbre dentro de un modelo de diseño de redes, la metodología de optimización estocástica, utilizando la técnica de solución SAA [2], modelará dicha variabilidad con mayor precisión; sin embargo, los escenarios ofrecerán mayor versatilidad y sencillez a quien toma las decisiones para modelar el riesgo en el diseño de redes de distribución.

Un elemento fundamental de la metodología seleccionada basada en escenarios es que se considera de modo simultáneo la optimización de las variaciones propuestas para generar un óptimo global. Los resultados computacionales de la implementación de la metodología basada en escenarios reflejan la importancia y eficiencia como alternativa para el diseño de redes de suministro, bajo condiciones de riesgo en cadenas de abastecimiento nacional e internacional.

Los resultados obtenidos en la investigación son

importantes como precedente para el abordaje y solución de problemas reales de diseño de redes de abastecimiento de gran escala, en los cuales se considera la variabilidad y la incertidumbre en la demanda. Queda un interesante campo de investigación en el cual se pueden realizar extensiones en cuanto a la optimización de diversas funciones objetivo, como son el riesgo financiero y la maximización del valor presente neto. De igual manera, se pueden incluir criterios de minimización de arrepentimiento, complementando la modelación con elementos teóricos de incertidumbre, como el criterio Minimax, entre otros.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación e Investigación Italiano (MIUR), y la Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia. Este soporte es gratamente agradecido.

#### REFERENCIAS

- [1] G. Chen, *et al.* «A New Model for Stochastic Facility Location Modeling, Department of Industrial and Systems Engineering». *Research Report*, University of Florida, 2005.
- [2] J.W. Escobar *et al.* «Optimización de redes de distribución de productos de consumo masivo en condiciones de riesgo». Proceedings of XXXIII Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa (SEIO), Madrid, Spain. Mayo 2012.
- [3] J.W. Escobar *et al.* «Optimización de una red de distribución con parámetros estocásticos usando la metodología de aproximación por promedios muestrales». *Reporte Técnico*, Universidad del Valle, Agosto 2012.
- [4] P. Tsiakis *et al.* «Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty». *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 40(16), pp. 3585-3604, 2001.
- [5] J. Kim *et al.* «Optimization of a hydrogen supply chain under demand uncertainty». *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, pp. 4715–4729, 2008.
- [6] M. Daskin *et al.* « $\alpha$ -Reliable P – Minimax Regret: A new model for strategic facility location modeling». *Location Science*. vol. 5(1), pp. 227–246, 1998.
- [7] J.D. Camm *et al.* «Blending OR/MS, Judgment, and GIS: Restructuring P&G's Supply Chain». *Interfaces*, vol. 27(1), pp. 128-142, 1997.
- [8] C. Laval *et al.* «Hewlett-Packard combined OR and expert knowledge to design its supply chains». *Interfaces*, vol. 35(3), pp.238–247, 2005.
- [9] S. Chopra, and P. Meindl. *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation*, Upper Saddle River, New Jersey, 2007.
- [10] O. Berman and D. Krass. «Recent Developments in the Theory and Applications of Location Models: A Preview». *Annals of Operations Research*, vol. 111(1-14): pp. 15-16, 2002.
- [11] M.P. Scaparra., and M.G. Scutella. «Facilities, Locations, Customers: Building Blocks of Location Models: A Survey». *Technical Report: TR-01-18*, Università di Pisa, 2001.
- [12] A. Dasci and G. Laporte. «An analytical approach to the facility location and capacity acquisition problem under demand uncertainty». *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56(4), pp. 397-405, 2004.
- [13] A.F. Gabor and J.C.W. Van Ommeren. «An approximation algorithm for a facility location problem with stochastic demands and inventories». *Operations research letters*, vol. 34(3), pp. 257-263, 2006.

- [14] C.S. Yu and H.L.Li. «A robust optimization model for stochastic logistic problems». *International Journal of Production Economics*, vol. 64(1), pp.385-397, 2000.
- [15] A. Gupta and C.D. Maranas, «Managing demand uncertainty in supply chain planning». *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27(8-9): 1219-1227, 2003.
- [16] D.A.Schilling. «Strategy Facility Planning: The analysis of options». *Decision Sciences*, vol. 13(1), pp.1-14, 1982.
- [17] D.Serra and V.Marianov. «The P-median Problem in a Changing Network: The Case of Barcelona». *LocationScience*, vol. 6(1), pp. 383-394, 1998.
- [18] F.C.Lario *et al.* «Análisis y definición de escenarios en programación estocástica para la gestión de la cadena de suministros en el sector del automóvil». Presented at *IV Congreso de Ingeniería de Organización*, Sevilla, 2001.
- [19] J. Vanston *et al.* «Alternate scenario planning». *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 10(1), pp. 159-180, 1977.
- [20] G. Guillén *et al.* «Multiobjective supply chain design under uncertainty». *Chemical Engineering Science*, vol. 60(1), pp. 1535-1553, 2005.
- [21] A.Azaron *et al.* «A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk». *International Journal of Production Economics*, vol. 116, pp. 129-138, 2008.
- [22] Y. Cardona-Valdés *et al.* «A bi-objective supply chain design problem with uncertainty». *Transportation Research Part C*, vol. 19(1), pp. 821–832, 2011.
- [23] M.C.Georgiadis *et al.* «Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations». *Omega*, vol. 39, pp. 254-272, 2011.
- [24] W. Klibi and A. Martel. «Scenario-based Supply Chain Network risk modeling». *European Journal of Operational Research*. En: <http://dx.doi.org/bd.univalle.edu.co/10.1016/j.ejor.2012.06.027>, 2012.
- [25] P. Longinidis and M.C.Georgidis. «Integration of financial statement analysis in the optimal design of supply chain networks under demand uncertainty». *International Journal of Production Economics*, vol. 129, pp. 262-276, 2011.
- [26] C. Hsu and H. Li. «Reliability evaluation and adjustment of supply chain network design with demand fluctuations». *International Journal of Production Economics*, vol. 132, pp. 131-145, 2011.
- [27] J.A. Rice. «*Mathematical Statistics and Data Analysis*». Duxbury Press, 1995.