



Pontificia Universidad
JAVERIANA

Facultad de Ingeniería
Secretaría de la Facultad

Acta de Correcciones al Proyecto de Grado
Ingeniería Industrial

Fecha: 10/01/2017

Autores: ANDRÉS ARROYO MARÍN - JUAN DAVID LINCE MONTES

Nombre del Proyecto de Grado: MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI
OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO
CRITERIOS FINANCIEROS

Director: JOHN WILMER ESCOBAR VELÁSQUEZ

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Firma de Director(s) del Proyecto de Grado

Acta de Aprobación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Facultad de Ingeniería Industrial, como parte de grado de Ingeniería Industrial.

1 - 7 - 7.

DR. JAIME ALBERTO AGUILAR ZAMBRANO
Decano Facultad de Ingeniería



ING. LUIS ANDRÉS SAAVEDRA ROBINSON
Director Carrera Ingeniería Industrial



DR. JHON WILMER ESCOBAR VELASQUEZ
Director Trabajo de Grado



COMITÉ JURADO



ALVARO FIGUEROA CABRERA
Jurado 2

Santiago de Cali, octubre 29 del 2016

Señor

Atte.: Ing. LUIS ANDRÉS SAAVEDRA

Director de Carrera de Ingeniería Industrial

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Cali

Cordial Saludo

Por medio de la presente me permito informarle que los estudiantes de Ingeniería Industrial Andrés Arroyo Marín y Juan David Lince Montes con códigos 73629 y 72608 trabajaron bajo mi dirección en el proyecto de grado denominado "MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO CRITERIOS FINANCIEROS". Considero que cumple los requisitos para ser sometido al jurado.

Atentamente,



JOHN WILMER ESCOBAR VELÁSQUEZ

Director Trabajo de Grado

Santiago de Cali, octubre 29 del 2016

Señor

Atte.: Ing. LUIS ANDRÉS SAAVEDRA

Director de Carrera de Ingeniería Industrial

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

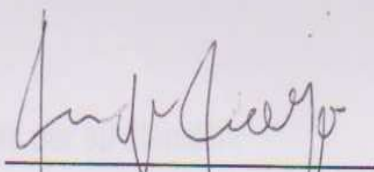
Cali

Cordial saludo.

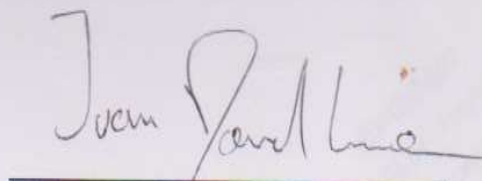
Nos permitimos presentar a su consideración el proyecto de grado denominado "MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO CRITERIOS FINANCIEROS", para ser sometido a revisión del jurado.

Esperamos haber cumplido con todos los requisitos exigidos por la universidad para tal fin.

Atentamente,



ANDRES ARROYO MARIN



JUAN DAVID LINCE MONTES

Santiago de Cali, 27 de septiembre de 2016

Doctor:
LUIS ANDRÉS SAAVEDRA ROBINSON
Director del programa de Ingeniería Industrial
Pontificia Universidad Javeriana Cali

Cordial Saludo,

Por medio de la presente Andrés Arroyo Marín con código 0073629 y Juan David Lince Montes con código 0072908, solicitamos de manera formal y respetuosa la prórroga de la entrega del trabajo de grado "DISEÑO Y DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL REDISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO CRITERIOS FINANCIEROS" sin efectos financieros, es decir los DERECHOS DE CONTINUIDAD que el estudiante debe pagar al no presentarlo en el periodo que se encuentre matriculado. El motivo de la solicitud de la prórroga, es debido a los imprevistos presentados con el equipo en el que estábamos desarrollando el modelo matemático, pues se dañó el sistema operativo y no permite acceder, razón por la cual hemos perdido los datos ordenados para el modelo.

Por este motivo, presentamos esta carta formal para notificar lo sucedido y solicitar la prolongación de la fecha de entrega 2 semanas a partir de la fecha estipulada, es decir 14 de octubre de 2016. Nos comprometemos a tener el trabajo de grado terminado y así poder culminar de manera satisfactoria el proceso académico de Ingeniería Industrial.

Gracias por su atención,

Cordialmente,

John Wilmer Escobar
Director de trabajo de grado

Andrés Arroyo Marín
C.C. 1.172.28.263

Juan David Lince
C.C. 144.078.023



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Santiago de Cali, Junio 1 de 2016

Estudiantes:

ANDRÉS ARROYO ID 0073629
JUAN DAVID LINCE ID 0072608
La Universidad

REFERENCIA: Entrega extemporánea de su trabajo de grado

Estimado(s) Estudiante(s):

La Facultad de Ingeniería previó la entrega de todos los trabajos de grado para los estudiantes que pretenden graduarse en la ceremonia de Octubre de 2016, de acuerdo con el calendario académico, hasta el día Junio 8 de 2016. Lo anterior por cuanto el proceso desde que inicia, con la entrega de los trabajos de grado, y hasta que termina, con la ceremonia de grado, es bastante dispendioso por los múltiples procesos que hay que llevar a cabo, entre ellos, la revisión por parte de los jurados del trabajo de grado; su sustentación; las correcciones sugeridas por los jurados que haya que hacer; revisión de notas, paz y salvos, firmas de actas, folios y diplomas, etc.

En esta oportunidad usted(es) está(n) solicitando prórroga para la entrega de su trabajo de grado en una fecha posterior a la fecha límite Junio 8 de 2016, por lo cual el programa de Ingeniería Industrial le informa que debido al tiempo que usted ha estipulado en su petición para la entrega del Trabajo de Grado no es posible que puedan optar a la ceremonia de grado de Octubre de 2016, y el 30 de Septiembre de 2016 es la fecha máxima de entrega aprobada por el Decano de la Facultad para el no cobro de los derechos de continuidad en el periodo 2016-2.

Así mismo recordar que si el Trabajo de Grado no se entrega en la fecha aprobada, y después del 7 de Diciembre de 2016 para aquellos que matricularon la asignatura trabajo de grado en el periodo 2016-1, deberá(n) cancelar lo correspondiente a los derechos de continuidad o lo estipulado por la directriz de Trabajo de Grado frente a este caso en particular.

La primera prórroga contará a partir del periodo siguiente a la matrícula de Trabajo de Grado que haya realizado cualquiera de los dos estudiantes.

Atentamente

Luis Andrés Saavedra-Robinson, I.E, Ph.D.
Industrial Engineering Undergraduated Director.
Professor. Department of Industrial Engineering
School of Engineering. Pontifical Xaverian University
e-mail: luisandres@javerianacali.edu.co
Phone: (57)(2)(3218200) ext 8269
Cali, Colombia. South America.

Facultad de Ingeniería

Calle 18 No. 118-250 Av. Cañasgordas • A.A. No. 26239 • PBX 321 8200 • www.puj.edu.co

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO CRITERIOS FINANCIEROS**

**ANDRÉS ARROYO MARÍN
JUAN DAVID LINCE MONTES**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERIA
INGENIERIA INDUSTRIAL
CALI
2016**

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN INTEGRANDO CRITERIOS FINANCIEROS**

ANDRÉS ARROYO MARÍN

JUAN DAVID LINCE MONTES

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Industrial**

Director:

JOHN WILLMER ESCOBAR VELÁSQUEZ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERIA INDUSTRIAL

CALI

2016

ARTÍCULO 23 de la Resolución No. 13 del 6 de julio de 1946, del reglamento de la Pontificia Universidad Javeriana.

“La universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Sólo velará por que no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque las tesis no contengan ataques o polémicas puramente personales; antes bien, se vea en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Aprobado por el Comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para otorgar el título de Ingeniero Industrial.

Dr. JAIME ALBERTO AGUILAR ZAMBRANO

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. John Wilmer Escobar Velasquez

Director tesis de grado

Jurado 1 Nicolás Clavijo Buritica

Jurado 2. Álvaro Figueroa Cabrera

Santiago de Cali, octubre 14 de 2016

DEDICATORIA

El desarrollo y ejecución de este trabajo quiero dedicárselo a todas las personas que estuvieron apoyándome y motivándome a dar lo mejor en la realización de este.

Andrés

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres por estar apoyándome de manera incondicional todos estos años de estudio, y por darme la oportunidad de tener una buena educación en esta institución. En segundo lugar, quisiera agradecer a mi compañero y coautor de este trabajo, Juan David Lince, por crear una sinergia en el método de trabajo, que no solo permitió la culminación de este sino de muchos otros trabajos a lo largo de la carrera. Finalmente quisiera agradecer al ingeniero John Wilmer Escobar por la confianza depositada en nuestra manera de trabajar y por ser un modelo a seguir. Sus enseñanzas fueron y serán de gran utilidad para el buen desarrollo profesional.

Andrés

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 Cadena de suministro	20
1.2 Diseño de redes de distribución	21
1.3 Problema de investigación	24
1.4 Objetivos	27
1.5 Justificación del proyecto.....	28
1.6 Estructura de la tesis.....	30
2. REVISIÓN DE LITERATURA	31
2.1 Semántica básica para un modelo de localización	31
2.2 Cadenas de suministro.....	33
2.3 Generalidades sobre el diseño de redes de distribución.....	35
2.4 Criterios financieros para evaluaciones de inversión.....	39
2.4.1 Valor Presente Neto	39
2.4.2 Riesgo financiero:	40
2.5 Modelos de localización determinísticos de una sola instalación.....	41
2.5.1 Problema de la Mediana P.....	41
2.5.2 Problema del método de centro de gravedad	42
2.6 Modelos de localización considerando múltiples instalaciones.....	42
2.6.1 Métodos exactos.....	42
2.6.2 Múltiple centro de gravedad	43
2.6.3 Programación lineal entera mixta.....	43
2.7 Metodología Epsilon constraint (ϵ -constraint).....	44
2.8 Técnica de generación de escenarios	45
3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN	47
3.1 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta.....	47

3.2	Generación de escenarios	47
3.3	Características y supuestos del modelo.....	48
3.3.1	Formulación Verbal del modelo.....	50
3.5	Notación del modelo	51
3.5	Descripción de los componentes del modelo	55
3.5.1	Restricciones en planta.....	56
3.5.2	Restricciones en centros de distribución	57
3.5.3	Análisis riesgo financiero.....	59
3.5.4	Restricciones generales	60
3.5.4	Análisis del Valor Presente Neto (Función objetivo).....	61
3.6	Estrategia de solución aplicada (ϵ -constraint)	65
3.7	Problema Multi objetivo	65
4.	ANÁLISIS RESULTADOS DEL MODELO.....	68
4.1	Experiencia computacional	69
4.2	Verificación del modelo de maximización del Valor Presente Neto	70
4.3	Verificación del modelo de minimización del riesgo financiero a la baja.....	72
4.4	Resultados Modelo optimizando VPN.....	73
4.5	Resultados Modelo Minimizando Riesgo Financiero	74
5	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES	76
	ANEXOS.....	85
	Anexo A. Nomenclatura modelo maximización de VPN en AMPL.....	85
	Anexo B. Nomenclatura modelo minimización riesgo financiero a la baja en AMPL	96
	BIBLIOGRAFÍA.....	79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas de la cadena de suministro	22
Figura 2. Análisis del porcentaje de utilidad deseado sin alcanzar por cada corrida.....	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resumen resultados maximización del Valor Presente Neto	62
Tabla 2. Resumen de resultados bajo la metodología ϵ -constraint.....	63

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Nomenclatura modelo maximización de VPN en AMPL.....	73
Anexo B. Nomenclatura modelo minimización riesgo financiero a la baja en AMPL.....	84

RESUMEN

La investigación que se presenta a continuación hace referencia al desarrollo de un modelo matemático multi objetivo con características determinísticas para el diseño de una red de distribución. Esta propuesta es una herramienta importante para el evaluador de la cadena de suministro, pues permite tomar decisiones con relación a la expansión de la red, primando la utilidad sobre los costos totales logísticos.

Este modelo es adaptado a una empresa colombiana de productos de consumo masivo que abastece otros países, con un periodo de evaluación de cinco años y una variabilidad en la demanda generada a partir de datos históricos. Se parte de una estructura de red establecida compuesta por plantas, centros de distribución y clientes, asumiendo que dos centros de distribución están abiertos y cuya problemática central radica en maximizar el valor presente neto y minimizar el riesgo a la baja de la inversión que se genera al expandir la red, teniendo en cuenta dos potenciales ubicaciones de expansión.

La estrategia de solución desarrollada para tratar los efectos del modelo multi objetivo, es la metodología Epsilon constraint (ϵ -constraint), que junto con la optimización basada en escenarios permiten que los resultados se ajusten a la maximización de los ingresos reduciendo el riesgo a la baja de inversión.

Palabras clave: red de distribución, modelo matemático, escenarios, optimización, valor presente neto, riesgo a la baja, épsilon constraint.

ABSTRACT

The research that presented below refers to the development a multi-objective mathematical model with deterministic features for designing a distribution network. This proposal is an important tool of the Supply Chain evaluator, allowing make decisions regarding the expansion of the network, giving priority to the profit on total logistics costs.

This model is adapted from a Colombian company of consumer products that supplies other countries with a trial period of five years and a variability in demand generated from historical data. It is part of a network structure established, composed of plants, distribution centers and customers, assuming that two distribution centers are open and whose central problem lies in maximizing the net present value and minimize downside risk investment generated to expand the network, considering two potential locations for expansion.

The solution strategy developed to treat the effects of multi-objective model is the Epsilon constraint (ϵ -constraint) methodology, which together with optimization based on scenarios allow the results fit the revenue maximization reducing downside risk investment.

Keywords: Distribution Network, mathematical model, scenarios, Optimization, net present value, downside risk, epsilon constraint.

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace introducción al trabajo de grado desarrollado para obtener el título de pregrado en Ingeniería Industrial, el cual centra su desarrollo en el rediseño de una red de distribución de productos de consumo masivo considerando criterios financieros. El objetivo es brindar una extensión en la optimización de diversas funciones objetivo basadas en la minimización de costos logísticos, integrando el riesgo financiero y la maximización del valor presente.

1.1 Cadena de suministro

El problema de optimización de la Cadena de suministro ha sido considerado por diferentes empresas multinacionales en las últimas décadas, un claro ejemplo se presenta en los esfuerzos realizados en los casos de Hewlett Packard (Laval et al., 2005) y Procter & Gamble (Camm et al., 1997) para mejorar el diseño de sus cadenas de suministro. Hoy en día los efectos venideros de la globalización y la apertura de mercados, han llevado a las compañías a pensar en el ámbito comercial no solo de manera local, sino también de manera internacional, de esta forma es más propenso a que las empresas manufactureras y detallistas consideren realizar un mejoramiento continuo en sus cadenas de suministro.

Una cadena de suministro está compuesta por diferentes eslabones que interactúan entre sí, cuya sincronización permite obtener mayores beneficios. Dado la cantidad de eslabones, el proceso de optimización puede desarrollarse en toda la cadena o en un eslabón específico. Los procesos de optimización y/o de mejora continua en la cadena de suministro incluyen decisiones

muy difíciles de tomar pues requieren de un análisis en términos de tiempo y dinero de la inversión a realizar.

El proceso de distribución, que hace parte de la cadena de suministro en diferentes eslabones, se refiere a los pasos requeridos para almacenar y/o entregar un producto desde el proveedor o fabricante a la planta o cliente final. Ballou (2004) manifiesta que el acertado diseño de una red de distribución es considerado una parte crítica de la rentabilidad global de una empresa, ya que afecta los costos de transporte, los cuales son uno de los rubros más altos, y al mismo tiempo la percepción del servicio al cliente.

Para hacer una definición más precisa de acuerdo con Taskis et al., (2001), la cadena de suministro se puede definir como “una red de instalaciones que realiza las funciones de obtener y transformar los materiales en un producto final y después distribuirlo al cliente final”. Estas funciones son asumidas por la Administración de la Cadena de Suministro que a través de técnicas ingenieriles y haciendo uso de sistemas de información integra las actividades de suministro y demanda dentro de y entre las compañías (Council of Supply Chain Management Professionals, 2016).

1.2 Diseño de redes de distribución

Una manera de mejorar la productividad y aumentar los ingresos de una compañía encargada la producción y/o venta de bienes es a través de la optimización de la red de distribución de su cadena de suministro. El diseño de una red de distribución incluye decisiones que se ejecutan a largo plazo tales como la configuración de la red, cantidad de producto y/o materia prima a

enviar y la determinación de localizaciones, capacidades y tecnología de las instalaciones que se requieren para configurarla. El principal problema de las redes de distribución se encuentra en determinar de manera óptima la localización de instalaciones y la asignación del cubrimiento de los clientes a esas instalaciones.

Es por tal motivo que los problemas concernientes a la red de distribución consisten en determinar la mejor manera de transferir o trasladar productos desde el proveedor o planta hasta los puntos de demanda, escogiendo la estructura de la red que minimice los costos y maximice el nivel de servicio al cliente.

Existen diferentes enfoques abordados por los investigadores para el diseño de una red. En un principio este problema solamente se aproximaba como un problema de localización pura. Más adelante se identificó que había una relación entre la localización y los costos de transporte, induciendo al estudio del problema de localización y ruteo de vehículos. Al ajustar los modelos a condiciones reales, estos se han vuelto más complejos, ahora no sólo involucran los anteriores aspectos, sino también relacionados con asignación de clientes y manejo de inventarios. Dentro de esta última clasificación según Ambrosino D., et al. (2005) se adicionan otras variables aumentando la complejidad del problema, como lo son los diferentes tamaños de localización que se pueden construir y los diferentes tipos de clientes. Dado que la configuración de la red de distribución impacta directamente en la rentabilidad de la compañía investigadores como Guillen G., et al (2004) y Bagajweicz M. J., et al. (2003) han abordado el problema del diseño de red desde un enfoque ingenieril y financiero.

Amir y Nader (2009) plantean que el diseño de una red de distribución se compone de tres sub-problemas: problema de localización y asignación, problema de ruteo de vehículos y problema control de inventarios. Estos problemas siempre se habían tratado individualmente o en parejas, como ejemplo se tiene el trabajo propuesto por Santoso, et al. (2005), quienes determinan el estudio de las capacidades de los almacenes y sus localizaciones los cuales cumplen con la demanda de los diferentes tipos de clientes, además trabajaron problemas como asignación y demanda de instalaciones; pero gracias a Amir y Nader (2009) se logró una apropiada combinación de los tres. En estos tres sub-problemas que componen el diseño de una red de distribución existen muchas condiciones de incertidumbre que brindan una gran importancia a los modelos estocásticos y han motivado a investigadores a proponer modelos de redes de distribución que acoplan parámetros estocásticos.

El desempeño de la red de distribución de acuerdo con Chopra (2001) se mide a través de importantes aspectos que determinan la tanto rentabilidad de la cadena como de la empresa, tales como (1) el cumplimiento de las necesidades del cliente y (2) el costo que se incurre en para alcanzar este cumplimiento. Existen otros aspectos secundarios para medir el desempeño de la red de distribución como el tiempo de respuesta, la variedad de productos, la disponibilidad de productos, la experiencia del cliente, la trazabilidad y visibilidad de los pedidos y el retorno de la inversión. Obtener el mejor desempeño en todas estas dimensiones al mismo tiempo puede ser muy complicado debido a que se enfrentan a un problema multiobjetivo, en el cual los clientes definen las prioridades de estos aspectos y deciden con cuáles de ellos se van a evaluar; de esta forma los escenarios pueden variar en el diseño óptimo de la red.

1.3 Problema de investigación

Ballou (2004) plantea que la misión de la logística es proveer los productos o servicios correctos, en el lugar correcto, en el momento adecuado, en la condición deseada, a un precio competitivo, contribuyendo a la obtención de la máxima utilidad, implicando cada etapa de la cadena de suministro. Para lograr esta misión, las empresas deben tomar decisiones relacionadas con la administración de red de distribución, las cuales se clasifican en tres fases según la longitud del periodo en el que se toman: estratégicas, tácticas y operacionales (Chopra y Meindl, 2007).

En primer lugar, se encuentran las decisiones en la fase estratégica caracterizadas por decisiones de largos plazos (años) para su ejecución. Por lo general se consideran decisiones de configuración de la red de distribución como la selección y asignación de proveedores y/o clientes, número, tamaño y localización de las instalaciones, tipo de productos a fabricar y/o distribuir y las decisiones de tercerización de alguna de las operaciones logísticas. Las decisiones tomadas en la fase táctica, tienden a ser realizadas en un periodo que varía de un trimestre a un año y 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. Finalmente, la tercera fase incluye decisiones operacionales, que deben tomarse en términos de días u horas; por lo general esta fase comprende decisiones de planificación de recursos, determinación de planes de emergencia, prioridades y asignación de distribución de carga y ruteo de vehículos, entre otras. (Escobar, 2012).

En el diseño de una red de distribución de productos de consumo masivo, es necesario replantear tanto la fase estratégica como la táctica, puesto que se deben tomar decisiones sobre la localización óptima, tamaño y cantidad de centros de distribución, y del mismo modo, decisiones respecto a qué mercados serán abastecidos, desde qué ubicaciones y con qué flujo de abastecimiento y distribución. Chen (2005) expone que las decisiones de orden estratégico y táctico en el diseño de una red de distribución son procesos difíciles de revertir e involucran inversiones significativas en términos de tiempo y dinero. De manera similar, Escobar (2008) señala que “lo que puede ser hoy una inversión óptima, en términos del diseño de una red de distribución minimizando los costos logísticos, en un futuro cercano podría ser una inversión desastrosa.”

Los nuevos desafíos de la globalización con el aumento de la apertura de mercados y tratados de libre comercio (Colombia posee 13 acuerdos vigentes con 56 países), hacen que el diseño de redes de distribución de grandes empresas se torne en un complejo problema pues las empresas deben adquirir una visión internacional de sus negocios, implementar estrategias de producción y logística que permitan la competitividad de la empresa en los nuevos mercados.

La apertura de mercados obliga a que las empresas y gremios económicos busquen estrategias de rediseño de su cadena de suministro con base en herramientas de optimización para mantener una alta competitividad. En esta búsqueda los administradores de la cadena se encuentran con decisiones complejas de expansión, consolidación o contracción, que abren los siguientes interrogantes.

¿Se debe abrir una nueva bodega? ¿Dónde sería conveniente, en Colombia o en otro país de la Región Andina? ¿Se debería tener una planta de manufactura o varias plantas en algunas ciudades del país? ¿Debemos expandirnos (abrir instalaciones) o contraernos (cerrar instalaciones)? ¿La red actual de suministro es óptima o beneficiosa para la empresa? (Escobar, 2008, p.19).

El objetivo de este estudio se centrará en rediseñar la red de distribución de una compañía multinacional de alimentos que abastece a todo el territorio colombiano y varios mercados internacionales. El modelo de Valor Presente Neto está basado en la idea propuesta por Escobar (2016) en su investigación “Optimización de redes de distribución con criterios financieros” a través del diseño de la configuración de la red de distribución asumiendo decisiones estratégicas (cierre o apertura de centros de distribución) y decisiones tácticas (determinación de flujos de suministro y distribución de productos entre las instalaciones) mediante la maximización de los ingresos.

Basado en lo expuesto por Chen (2005) y Escobar (2008) se hace necesario el uso de herramientas ingenieriles para el diseño de una red de distribución y en específico de la modelación logística para asegurar que las decisiones estratégicas y tácticas que las empresas del sector alimenticio van a tomar sean pertinentes, acertadas o plausibles económicamente, puesto que una mala decisión podría significar tanto el aumento de los costos logísticos como el no retorno de la inversión realizada. Es por esto que se encuentra la motivación a desarrollar un modelo matemático para empresas multinacionales del sector alimenticio ubicadas en Colombia que aborde el diseño de redes de distribución, no solo desde modelos tradicionales de

minimización de costos logísticos, sino que incluya la utilización de criterios financieros como base de la función objetivo.

Formulación del problema

¿Cuál es la configuración óptima de una red de distribución en una cadena de suministro de productos de consumo masivo que maximice el Valor Presente Neto (VPN) de la inversión realizada y costos operacionales de la red y al mismo tiempo minimice el riesgo financiero?

1.4 Objetivos

El objetivo general del proyecto es optimizar la configuración de una red de distribución de productos masivos mediante el diseño y desarrollo de un modelo matemático que integre criterios financieros tales como Valor Presente Neto y el riesgo financiero inherente a la inversión, logrando un balance entre los costos logísticos totales, el nivel de servicio y asegurar la sostenibilidad financiera de la organización.

Los objetivos específicos para alcanzar este proyecto son:

- Analizar los factores críticos de una red de distribución de productos de consumo masivo con el fin de definir las variables y los parámetros que acompañarán el modelo con sus respectivas características y comportamiento.
- Desarrollar un modelo matemático multi objetivo que represente la realidad de una red de distribución, cuya función objetivo es la maximización del Valor Presente Neto (VPN) y minimice el riesgo financiero, sujeto a las restricciones necesarias para su funcionalidad.

- Validar la funcionalidad del modelo propuesto a través la construcción de un caso adaptado de una compañía multinacional real considerando múltiples periodos de valoración y el comportamiento de las variables críticas de la red.
- Analizar la incidencia de la maximización del Valor Presente Neto (VPN) y minimización del riesgo financiero en los modelos de diseño de redes de distribución.

1.5 Justificación del proyecto

En la actualidad, el diseño de redes de distribución para realizar tareas de transporte-almacenamiento es un asunto altamente complejo en el cual el responsable logístico debe tomar decisiones de carácter estratégico y táctico en condiciones cambiantes y difíciles de revertir que involucran la estabilidad financiera de la organización a largo plazo. Basado en lo anterior y en aras de un mejoramiento continuo en el diseño de redes de distribución, “se hace necesario el desarrollo de investigaciones sobre modelos de diseño de redes de distribución que resuelvan problemas logísticos del mundo actual, de forma científica, integrando elementos de incertidumbre, y que estén al alcance de las empresas de la región” (Felizzola y Toledo, 2010, p.23). Es aquí donde se hacen evidentes los beneficios económicos relacionados con el desarrollo de este proyecto, dado que el modelo a desarrollar busca asegurar una óptima toma de decisiones a nivel táctico y estratégico para así lograr que el mejoramiento o el cambio en la red sea rentable.

Al momento de abordar problemáticas sobre expansión o contracción de la red de distribución con base a la demanda, los modelos basados en costes de diseño no proporcionan la solución

óptima tomando distintos periodos de valoración que indique al responsable logístico qué instalación abrir, en dónde, qué demanda suplir y con cuál capacidad de distribución sin poner en riesgo la estabilidad económica de la empresa, por ende es necesario incluir en la función objetivo del modelo matemático de este problema el máximo de los beneficios o la recuperación de las inversiones.

Desde el punto de vista teórico, el desarrollo de este Trabajo de Grado se justifica, pues a través de técnicas y conocimientos de la Ingeniería Industrial, como la modelación matemática de problemas de redes de distribución y el análisis económicos de variables financieras en inversiones estratégicas, se ampliará el campo de acción de la toma de decisiones en la administración de la cadena de suministro, constituyendo así otra herramienta de toma de decisiones alterna a la minimización de costos logísticos y nivel de demanda.

Aunque el tema de diseño de redes de distribución es abiertamente tratado a nivel mundial, la mayoría de sus enfoques, como ya se había mencionado, van dirigidos principalmente a la minimización de costos totales logísticos y la maximización del cumplimiento de la demanda, es por esto, que la realización de esta investigación resulta ser innovadora pues involucra variables de recuperación financiera de inversiones a realizar en la expansión o contracción de la red de distribución en la función objetivo a optimizar.

Del mismo modo este tipo de estudios motiva a los investigadores a estudiar nuevas metodologías y conocimientos, aplicados en contextos y lugares diferentes y adaptarlas a la realidad regional.

1.6 Estructura de la tesis

Esta investigación se desarrolla en la siguiente estructura. El capítulo 2 contiene la revisión de la literatura estudiada para adelantar la investigación y poder seleccionar los mejores métodos de solución del modelo propuesto. El capítulo 3 muestra el desarrollo del modelo matemático cuya función objetivo es la maximización del Valor Presente Neto integrando la minimización del Riesgo financiero, desarrollado en dos etapas. El capítulo 4 presenta la validación y análisis de los resultados del caso de estudio adaptado para aplicar al modelo propuesto. El capítulo 5 muestra las conclusiones de la investigación y las propuestas para futuras investigaciones derivadas de este proyecto de investigación.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se presenta el resultado de la investigación realizada sobre la literatura relacionada con el diseño y los criterios financieros de inversión de redes de distribución. Es una literatura bastante amplia a nivel mundial, por lo cual se abarcan diferentes teorías y metodologías de solución de problemas propuestas por cada investigador para dar mejor entendimiento y facilidad en la toma de decisiones.

2.1 Semántica básica para un modelo de localización

Todos los problemas de localización presentan tres elementos básicos que juegan un rol esencial, y que según lo expuesto por Scaparra et al. (2001) corresponden a las instalaciones, localizaciones y clientes. Las variaciones, extensiones y combinaciones de las características de estos elementos reflejan la particularidad del modelo.

1. Instalaciones: consideradas el elemento a ubicar en un espacio físico para proveer un servicio o producto, de tal manera que presente una interacción sincronizada con las demás instalaciones. Chopra S., et al. (2007) definen que las dos mayores categorías de instalaciones son las de almacenamiento y las de manufactura. Los principales ejemplos de instalaciones en modelos de localización son objetos como almacenes, plantas, centros de distribución, puntos de tránsito, y a muchas otras estructuras industriales.

Las principales propiedades características de las instalaciones son el número, tipo y costo asociado. Escobar (2008) argumenta que existen dos clasificaciones de los modelos de

localización de acuerdo al número de instalaciones a abrir. En primer lugar, se tiene los problemas de única instalación que consiste como su nombre lo dice en una sola instalación a ubicar con relación a una serie de instalaciones existentes. Por otro lado, los modelos que involucran una localización simultánea de varias instalaciones, son conocidos como problema de múltiple instalación. La segunda propiedad involucra el tipo de instalación a abrir, que puede ser de acuerdo a la capacidad, servicio o estructura. El costo asociado a las instalaciones incluye el costo fijo de apertura y el costo variable de la prestación del servicio.

2. Localizaciones: corresponde al espacio físico especial para ubicar las instalaciones, De acuerdo con Berman y Krass (2002), las localizaciones reconocen tres tipos de modelos de diseño de redes de distribución de acuerdo al tipo de representación espacial a tomar: localización en redes, donde la topología es una red y las ubicaciones geográficas son nodos que tienen límites dentro de una red; localización continua, todos los puntos son determinados por una o más coordenadas las cuales pueden variar interminablemente y las instalaciones se pueden ubicar en cualquier punto de dicho espacio, y la localización discreta, en la que se especifica una lista de ubicaciones reales para la localización de instalaciones que deben ser evaluadas para la localización potencial de estas.

La localización de instalaciones también depende de diferentes restricciones como que el espacio selección disponible sea restringido por zonas prohibidas, o requerimientos tales como seleccionar al menos una localización de un conjunto de posibles candidatos que garantice un servicio rápido en un área particular.

3. Clientes: consiste en las empresas o personas que requieren cierto servicio o producto con una demanda específica.

2.2 Cadenas de suministro

La cadena de suministro consiste como ya se había mencionado en una serie de eslabones o etapas (proveedores, plantas, distribuidor, detallista, clientes) que una compañía dispone para realizar todas las funciones implicadas en la recepción y satisfacción del pedido de un cliente. Por tanto, estas funciones, asumidas por la Administración de la Cadena de Suministro incluyen el desarrollo de un nuevo producto la gestión de la información, las operaciones de compra de materias primas y partes, el procesamiento en producto terminado, la distribución de productos y el nivel de servicio al cliente.

El término cadena de suministro puede implicar que sólo un actor participa en cada etapa, no obstante, a partir de la figura 1 se observa que un fabricante puede recibir material de varios proveedores y luego abastecer a varios distribuidores. Por tal motivo, la mayoría de las cadenas de suministro son redes. Cada etapa en una cadena de suministro está conectada por el flujo de productos, información y fondos que en algunas ocasiones puede llegar a ser un flujo en ambas direcciones y su diseño apropiado depende tanto de las necesidades del cliente como de las funciones realizadas por las etapas definidas.

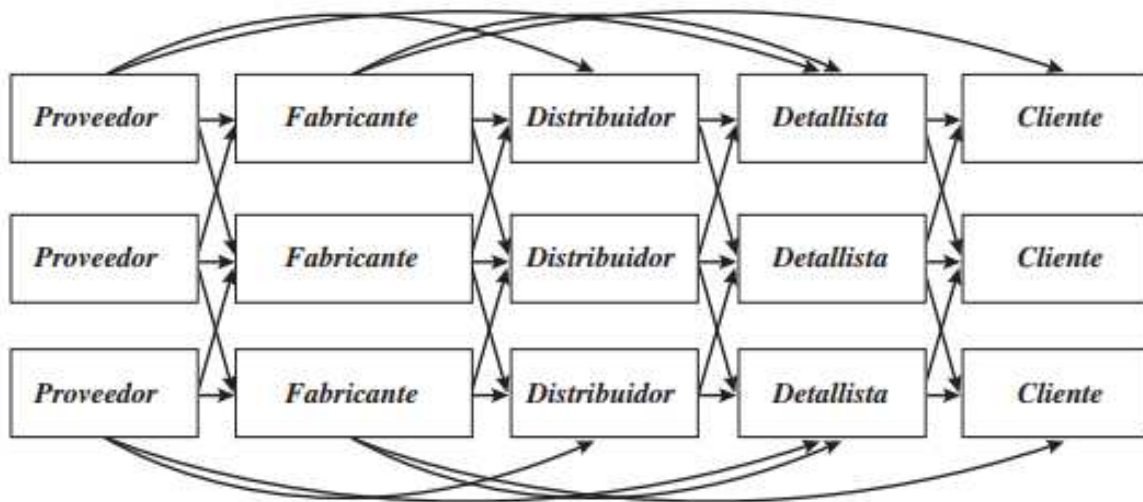


Figura 1. Etapas de la cadena de suministro. Fuente: Chopra, S. y Meindl, P (2007)

El objetivo principal de toda cadena de suministro es satisfacer las necesidades del cliente y, en el proceso, maximizar su superávit. El superávit de la cadena de suministro es la diferencia entre el ingreso generado por el cliente y el costo total en que se incurre a lo largo de todas sus etapas. Para cualquier cadena solo hay una fuente de ingresos: el cliente. El valor obtenido por un cliente que compra un producto en un detallista depende de varios factores, entre ellos la funcionalidad del producto, la distancia que recorrió para llegar al detallista, y la probabilidad de encontrar el producto disponible.

Como se puede entrever, la administración de la cadena de suministro gestiona procesos que determinan la rentabilidad y competitividad de una compañía, por tanto las decisiones acertadas relacionadas con el flujo de información, productos y fondos de la cadena de suministro determinan el éxito de una compañía.

2.3 Generalidades sobre el diseño de redes de distribución

Melo et al. (2009) aseguran que la configuración de la red solamente se veía como un problema de localización discreta donde se debía seleccionar el mejor lugar para ubicar una instalación restringida por un número limitado de opciones. El problema más sencillo con esta aplicación corresponde a la determinación de P instalaciones que minimicen la distancia o el costo total de atención a clientes. En este tipo de problemas el más conocido y desarrollado en la literatura es el de la P -Mediana, donde todas las alternativas son equivalentes en términos de costo de instalación. Las primeras teorías para su solución fueron propuestas por economistas agrarios y geógrafos, como Johann van Thunen, Alfred Weber, T. Palander, August Losch, Edgar Hoover, Melvin Greenhut y Walterd Isard (Ballou, 2004). Estos identificaron que había una relación entre la localización y los costos de transporte, lo que dio lugar al estudio problema de localización y ruteo de vehículos. Daskin (1995), Simchi-Levi et al. (2005) y Drezner y Hamacher (2004) han trabajado este problema con componentes determinísticos y Lin (2009) con componentes estocásticos.

Al añadir otras variables al problema de localización surgen problemas como el cubrimiento máximo cuyo objetivo es atender a toda la demanda en determinado tiempo minimizando los costos totales logísticos, un enfoque de este problema se da para solución de problemas de localización de unidades de emergencia. Otra extensión del problema descrita por Escobar (2008) es el centro de gravedad o minimax, que busca minimizar la distancia máxima entre algún nodo de demanda y su centro de distribución más cercano. Si la localización de la instalación es

restringida el problema es considerado problema de Centro Vértice, mientras que si la localización es libre, se denomina problemas de centro absoluto.

Al ajustar los problemas a condiciones reales se empezaron a relacionar variables como la asignación de inventarios, el tamaño de instalaciones a construir y la demanda de los diferentes tipos de clientes a atender en la que Scaparra y Scutella (2001) encuentran que: demanda determinística estática que se conoce con certeza y es constante con el tiempo, demanda determinística variable que tiene un comportamiento similar a la demanda determinística estática pero con variación a través del tiempo, demanda incierta no se conoce con certeza el valor de esta, pero con los datos históricos se puede determinar la distribución probabilística de la demanda y demanda desconocida en este caso se deben hacer estimados a priori dado que no se conoce la distribución de probabilidad de la demanda, posteriormente de acuerdo a la comportamiento real de la demanda se actualizan.

Amir y Nader plantean (2009) que el diseño de una red de distribución se compone de tres sub-problemas: localización y asignación, ruteo de vehículos y control de inventarios. Estos problemas siempre se habían tratado individualmente o en parejas, como ejemplo se tiene el trabajo de los investigadores Santoso., et al. (2005) que propusieron el estudio de las capacidades de los almacenes y sus localizaciones los cuales cumplen con la demanda de los diferentes tipos de clientes, además trabajaron problemas como asignación y demanda de instalaciones, pero gracias a Amir y Nader se logró una apropiada combinación de los tres.

En estos tres sub-problemas que componen el diseño de una red de distribución existen muchas condiciones de incertidumbre que brindan una gran importancia a los modelos estocásticos y han motivado a investigadores a proponer modelos de redes de distribución que acoplan parámetros estocásticos, no obstante no son muchos los trabajos realizados en este tema. Midler (1969) fue uno de los investigadores en incursionar en estos modelos, desarrollando una propuesta de modelo de programación dinámica que con un horizonte de múltiples periodos de tiempo encuentra el óptimo del flujo de productos, modo de transporte y re-ruteo de entregas a los clientes. Lee y Billington (1993) desarrollaron un modelo estocástico que tiene como objetivo el manejo de inventarios a nivel de política de solicitud de materiales, nivel de servicio al cliente y estrategias de aplazamiento.

Otro modelo estocástico para estrategias de aplazamiento fue presentado por Lee y Feitzinger (1995) y Swaminathan y Tayu (1999). Con la meta de minimizar costos de la sub-producción y la sobre-producción y llegar a un balance con demanda incierta Hammond et al. (1994) proponen un modelo estocástico que cuantifica los efectos del desbalance en la cadena de suministro. Basados en esta última investigación Lee et al. (1997) analizaron el efecto látigo generado por el desbalance y sujetos a restricciones de capacidad y desarrollaron un modelo para minimizar los costos de producción, inventario y exceso de demanda. En la década del 2000 se desarrollaron dos modelos estocásticos bajo condiciones de demanda incierta, el primero desarrollado por MirHassani et al. (2000) en el que usaron el método de descomposición de Benders para resolver un modelo de dos estaciones sujeto a restricciones de capacidad para múltiples periodos de

tiempo, y el segundo desarrollado por Tsiakis et al. (2001) en el que desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta a gran escala.

Un enfoque diferente para trabajar esta incertidumbre en el diseño de redes de distribución es la aproximación basada en escenarios en la que una cantidad discreta de escenarios de los parámetros aleatorios representa la incertidumbre. El investigador es el encargado de definir la probabilidad de ocurrencia de cada escenario. En los modelos basados en escenarios se tiene como objetivo hallar soluciones robustas que se desempeñen bien en todos los escenarios. Hay que tener en cuenta que a medida que aumenten los agentes en cada nodo de la red la complejidad para encontrar solución al modelo será mayor.

La aplicación de la metodología se basa en escenarios al problema de cubrimiento máximo fue considerada por Schilling en 1982, este se enfocó en utilizar un método comparativo entre las diferencias máximas entre la solución de los sitios óptimos de cada escenario y la solución promedio. Otro enfoque de los escenarios es aplicado por Daskin et al. (1998) para abarcar el problema de la p-mediana. Vanston et. Al (1977) propone una metodología de 12 pasos para el desarrollo de escenarios teniendo en cuenta el valor agregado que brindan al problema considerado.

Muchos de los modelos e investigaciones realizadas en el diseño de redes distribución tiene por objetivo la minimización de los costos logísticos que se determinan de forma precisa por medio de herramientas contables. Por otro lado, los modelos basados en ingresos no pueden ser determinados con tanta precisión, puesto que medir el impacto del diseño logístico sobre los

ingresos presenta alta complejidad dado el estado de incertidumbre y la dinámica de la económica cambiante. Sin embargo, Guillén (2005) plantea un modelo para la maximización del valor presente neto y la minimización del riesgo financiero en un problema relacionado con dos etapas del diseño de una red de distribución donde la incertidumbre es representada mediante un conjunto de escenarios. En Azaron et al. (2008), se estudian tres objetivos: minimización de los costos totales logísticos, minimización de la varianza del costo total y la minimización del riesgo financiero. Se consideraron inciertos parámetros como las demandas y los costos de transporte entre otros.

2.4 Criterios financieros para evaluaciones de inversión

Existen diferentes técnicas para medir la rentabilidad de un proyecto de ingeniería, ya sea de manera monetaria, porcentaje o en duración de tiempo. Dadas las consideraciones de una posible inversión monetaria a ejecutar se estudian los siguientes criterios financieros:

2.4.1 Valor Presente Neto

El Valor Presente Neto responde a la pregunta sobre qué cantidad de efectivo necesitará tener un inversionista el día de hoy como sustituto de la inversión. Si el Valor Presente Neto es positivo, se considera que vale la pena emprender la inversión, puesto que ello es esencialmente lo mismo que recibir un pago de efectivo igual al valor presente neto. Por el contrario, si el valor presente neto es negativo, emprender la inversión el día de hoy es equivalente a renunciar a una

cierta cantidad de efectivo en el momento actual, y consecuentemente la inversión debería ser abandonada. Ross, A., Westerfield, R., Jordan, B. (2000).

Cabe resaltar que en el Valor Presente Neto ya se está incluyendo el costo actual de la inversión al determinar su valor y no simplemente que reeditaré.

En general, las ideas anteriores pueden resumirse en términos de la regla del valor presente neto: Vale la pena hacer una inversión si se obtiene un Valor Presente Neto positivo. Si el valor presente neto de una inversión es negativo, debe ser rechazada.

Es por esto que en el problema de diseño de redes de distribución se desea encontrar la configuración de red que maximice el Valor Presente Neto, dado que así se garantiza que vale la pena realizar la inversión en la reconfiguración de la red y que al ser este positivo es equivalente a recibir un pago de efectivo igual a su valor.

2.4.2 Riesgo financiero:

El riesgo financiero asociado a un problema de diseño bajo incertidumbre está definido como la probabilidad de que los resultados de una decisión económica no alcancen un determinado nivel de beneficios (maximización) o nivel de costos (minimización) representado por Ω (Barbaro & Bagajewicz, 2002). El riesgo está influenciado por el horizonte de ejecución de la decisión a tomar, de acuerdo con Riggs et. Al entre mayor sea el tiempo que tome planear el horizonte, mayor es la posibilidad de obtener resultados al azar. Mientras que las decisiones de inversión a corto plazo suelen estar sujetas a menor variabilidad.

En contexto con el enfoque del modelo, se define el riesgo financiero como la probabilidad de que el Valor Presente Neto resultante de la inversión en la apertura y/o cierre de un o más centros de distribución no alcance la utilidad Ω esperada. El riesgo asociado a un diseño x y un determinado beneficio Ω está expresado por la siguiente probabilidad discreta:

$$Risk(x, \Omega) = P(Beneficio(x) < \Omega)$$

Sea:

Beneficio(x): el actual beneficio.

2.5 Modelos de localización determinísticos de una sola instalación

Los problemas de localización resueltos a través de estos modelos tienen como objetivo la ubicación de una sola instalación, teniendo en cuenta como factores determinantes la mayoría de las veces el costo de transporte y la demanda en cada nodo. Es por esto que son considerados los más básicos entre los problemas de localización, como modelos propuestos para la solución de estos problemas podemos encontrar el método exacto de centro de gravedad, la mediana p, el método de cuadrícula y el método del centroide entre otros.

2.5.1 Problema de la Mediana P

En el problema de la mediana p, la localización está determinada por la distancia existente de esta a quienes la visitan. El problema de la mediana p fue introducido por Hakimi (1964) y puede

ser formulado de la siguiente forma: Encontrar la localización de p instalaciones, minimizando la distancia recorrida entre los “pesos de la demanda” de cada uno de los nodos y las instalaciones.

2.5.2 Problema del método de centro de gravedad

El problema del centro de gravedad busca minimizar la distancia máxima entre un nodo de demanda y una instalación, siendo el número de instalaciones un parámetro de entrada para el modelo. En este problema se presentan dos variaciones, la del problema del centro del vértice, en la cual las soluciones de localización están restringidas a los nodos de la red del problema, y la del problema del centro absoluto, en la cual se permite la localización de las instalaciones tanto en los nodos como en cualquier ubicación de la red.

2.6 Modelos de localización considerando múltiples instalaciones

De acuerdo a Ballou (2004) estos modelos afrontan un problema de mayor complejidad y más cercano a la realidad, común en la mayoría de las compañías, sin tener en cuenta a las pequeñas, que tienen la necesidad de ubicar instalaciones adicionales a la que poseen actualmente o desean ubicar dos o más instalaciones simultáneamente y son resueltos principalmente a través de la programación lineal entera.

2.6.1 Métodos exactos

Estos métodos son ideales para garantizar una solución matemática óptima al problema de ubicación de múltiples instalaciones con una precisión conocida, una posible desventaja de estos

métodos es que pueden provocar largos tiempos computacionales de ejecución, altos requerimientos de memoria y una definición comprometida del problema cuando se aplique Ballou (2004).

2.6.2 Múltiplo centro de gravedad

De acuerdo a lo expuesto por Ballou (2004) este método exacto obtiene la solución de mínimo costo de transportación para una instalación intermedia ubicada entre los puntos de origen y de destino, en caso de que fuera más de una instalación intermedia a ubicar se hace necesario asignar los puntos de origen y destino a locaciones arbitrarias, formando grupos de puntos iguales al número de instalaciones que se ubicarán. Aunque este método brinda una solución óptima al problema es poco práctico para problemas de tamaño real debido a que evaluar todas las formas de asignar los grupos se torna complejo computacionalmente, es por esta razón que se hace necesario recurrir a otro método.

2.6.3 Programación lineal entera mixta

En los modelos matemáticos de localización esta metodología es la más popular debido a que desarrolla procedimientos eficientes para tratar problemas grandes y complejos, con suficiente capacidad para manejar de manera óptima los costos fijos y variables, además de la asignación de la demanda a través de la red.

En lenguaje descriptivo este problema según Ballou (2004), puede expresarse como encontrar el número, tamaño y ubicaciones de las instalaciones en una red de cadena de suministros que

minimizarán los costos fijos y variables lineales resultantes de desplazar todos los productos a través de la red seleccionada, sujeto a lo siguiente:

1. No puede excederse el suministro disponible de las plantas para cada producto.
2. Debe cumplirse la demanda para todos los productos.
3. La utilización de cada centro de distribución no puede exceder su capacidad.
4. Debe lograrse una utilización mínima de un almacén antes de que éste pueda abrirse.

Es por esto que esta metodología es muy atractiva para la solución del problema de diseño de redes, aunque presente dos desventajas que son el gran tiempo computacional y cantidad de memoria que puede llegar a requerir cuando se deseen explorar características especiales de un problema.

2.7 Metodología Epsilon constraint (ϵ -constraint)

La programación lineal es una fuerte herramienta para abordar modelos de diseño de redes de distribución, ya que permite maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a una serie de restricciones. No obstante, cuando se requiere obtener un mayor desempeño de la red de distribución al mismo tiempo, el administrador de la cadena de suministro debe evaluar diferentes funciones objetivo al mismo tiempo. Lo cual conlleva a que se deba realizar una optimización multi objetivo.

Ehrgott (2005) enfatiza que en la optimización multi objetivo, es a menudo poco claro qué constituye una solución óptima, pues una solución puede ser óptima para una función objetivo, pero sub óptima para otra, en contexto con el caso de estudio, el VPN puede ser el máximo, pero el riesgo financiero no es el mínimo posible.

Con base a lo expuesto por Hwang y Massud (1979) ϵ -constraint es uno de los métodos de solución a posteriori de problemas de Programación Matemática Multi-Objetivo (MOMP por sus siglas en inglés), es decir un método en que el tomador de decisiones integra sus preferencias al proceso de toma de decisión luego de ejecutar la fase de cálculo, teniendo así la oportunidad de observar todas o al menos una representación suficiente de las soluciones a través de diagramas de Pareto, pudiendo contrastar así las soluciones y elegir entre ellas la que lo satisfaga. Ideal para cuando se trabaja con tomadores de decisiones que son difíciles de contactar, ya que el proceso de solución de este método está dividido en dos fases independientes, en la primera se realiza la generación de soluciones eficientes y en la segunda, cuando toda la información de soluciones está disponible, se realiza la inclusión del tomador de decisiones.

2.8 Técnica de generación de escenarios

Para la elaboración de escenarios se hace uso aplicado de las matemáticas, que mediante variables y parámetros bases del modelo de estudio se generan valores futuros. De manera general Sodhi et al. (2009) plantea que existen dos métodos cuantitativos para la generación de estos:

Generación paramétrica:

Las técnicas paramétricas de generación de escenarios se basan en parámetros estadísticos para elaborar escenarios que son totalmente hipotéticos. Entre los más destacados se encuentran:

1) Simulación Montecarlo la cual genera escenarios de acuerdo a una distribución estadística y 2)

Generación de árboles de escenarios caracterizados como procesos estocásticos

Generación no paramétrica:

Las técnicas no paramétricas se caracterizan por tener escenarios representados por datos reales que tiene el tomador de decisión. Una de las técnicas más conocidas es la generación por datos históricos, donde se consideran los datos del pasado como potenciales escenarios.

3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN

En este capítulo se realiza una descripción detallada del modelo de programación lineal entera mixta propuesto para determinar la nueva configuración de la red de distribución en análisis.

3.1 Modelo de Programación Lineal Entera Mixta

El modelo desarrollado que se presenta está pensado en un plano estratégico de cinco años tomando 3 escenarios de demanda, para lo cual se deben de tener algunas consideraciones especiales que se indicarán a continuación

3.2 Generación de escenarios

Usualmente los escenarios son usados como herramientas de soporte para la toma de decisiones financieras, es por esto que, como lo menciona Klibi et al. (2012), se pueden generar diferentes escenarios de demanda con el fin de estudiar el riesgo financiero en el diseño de la red de suministro. La probabilidad de ocurrencia de cada uno de los escenarios es dada como una entrada para el **modelo, con base a los lineamientos del diseño de un modelo determinístico propuestos en los objetivos**. De esta manera se toman en cuenta variaciones en la demanda que se asemejan más a la realidad y se deja abierta la posibilidad de ingresar parámetros estocásticos al problema de investigación. La técnica de generación de escenarios elegida es la de generación a partir de datos históricos, en esta se asume que el comportamiento histórico de la demanda dicta su comportamiento futuro, así se genera un escenario base del cual se realizan dos variaciones para generar dos escenarios alternos, uno en el que se presenta una demanda superior

a la histórica y otro en el que se presenta una menor, dando así como resultado a la técnica de generación tres escenarios; uno base, uno pesimista y uno optimista, cada uno con una probabilidad ocurrencia igual es decir de un tercio (definida en conjunto con el director de proyecto). La cantidad de escenarios y su probabilidad de ocurrencia puede variar dependiendo el enfoque de estudio que tome el evaluador de la cadena de suministro y los parámetros con incertidumbre que se deseen incluir en el modelo.

3.3 Características y supuestos del modelo

El modelo tiene los siguientes supuestos:

- Toda la infraestructura física de la red se supone al interior un único país considerando la exportación de productos o distribución física internacional, los cuales se harán a través de los puertos de despacho.
- El modelo se diseña para hacer consideraciones relativas a diferentes periodos de planeación durante cinco años incluyendo el año cero como el valor de la inversión inicial y se admite la consideración de múltiples productos.
- El modelo incluye como variables de decisión la apertura de centros de distribución y el flujo de productos a través de la red. Se considera un proceso de distribución de varios eslabones. Uno de los eslabones lo constituyen los Centros de Distribución (CD's), los cuáles son de gran magnitud y tienen considerable cantidad de capacidad.

- Se parte de una infraestructura de plantas y centros de distribución ya establecida y se busca revisar el cierre, apertura, expansión y consolidación de la operación de distribución en CD's. El número máximo de centros de distribución a analizar dada la configuración de la cadena de la empresa caso de estudio queda abierto a consideración propia.

- Se consideran restricciones de capacidad y almacenamiento en cada nodo. La capacidad se ha determinado en relación a las unidades de producto terminado que se manejan a través de la red.

- Las plantas de manufactura envían productos terminados únicamente a los CD's, es decir que no se consideran envíos entre plantas y clientes; esto por la característica del sistema de distribución de la empresa de referencia que se tomó para este estudio. Se asume que todos los CD's pueden recibir cualquier producto terminado del conjunto de plantas de la organización.

- El modelo permite envío de productos desde un centro de distribución hacia otros centros de distribución (traslado de productos entre centros de distribución), y hacia los clientes finales. No se consideran limitaciones en la capacidad del transporte.

- Se trabaja con valores de demanda determinísticos, que han de ser satisfechos para cada cliente o zona de consumo nacional e internacional. La demanda se ha considerado en unidades de producto terminado, y se ha convertido a kilogramos por el factor de peso de cada uno de los ítems.

- Los clientes internacionales se van a considerar ubicados en los puertos más cercanos a su destino.

- Se considera como único modo de transporte el terrestre (no se incluye las decisiones de selección de modos de transporte), y no se incluyen las decisiones de selección de tipos de camiones. Se ha incluido la variabilidad en los tiempos de respuesta como un factor constante para todo el flujo de producto en una ruta determinada.

- El modelo tiene en cuenta de manera explícita consideraciones de tipo financiero relativas a impuestos y beneficios tributarios típicos de procesos de comercialización. Además, se considera explícitamente la modelación del riesgo.

- El objetivo del modelo matemático de la cadena de suministro es desarrollar una técnica multiobjetivo para maximizar el Valor Presente Neto y minimizar el riesgo financiero inherente a la inversión realizada, modelando el flujo de productos desde plantas hacia centros de distribución, entre centros de distribución y desde centros de distribución hacia clientes.

3.3.1 Formulación Verbal del modelo

Minimizar: El riesgo a la baja inherente a la inversión de n CD's y de la operación de la red de distribución.

Sujeto a:

En plantas: Capacidad de producción

En centros de distribución: Capacidad de centros de distribución y manejo de centros de distribución.

Generales: Ecuación de balance en cada centro de distribución. Satisfacción de la demanda para cada cliente o zona de consumo. Restricciones para flujos y/o relaciones mutuamente excluyentes. Restricciones lógicas de correspondencia entre flujos. Restricciones de no-negatividad.

3.5 Notación del modelo

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 Mercado o Clientes, indexadas por k .

PT = Conjuntos de Productos Terminados, indexados por p .

T = Conjunto de periodos de valoración, indexados por t .

S = Conjunto de escenarios, indexados por s .

Conjuntos inducidos

CD_RE(j) = Conjunto de centros de distribución que pueden recibir productos enviados desde el centro de distribución $j \in CD$; $CD_RE(j) \subseteq CD$.

$CD_EN(j)$ = Conjunto de centros de distribución que pueden enviar productos al centro de distribución $j \in CD$; $CD_EN(j) \subseteq CD$.

$CDA(j)$ = Conjunto de Centros de Distribución $j \in CD$ que están abiertos y pueden ser cerrados; $CDA(j) \subseteq CD$.

$CDL(j)$ = Conjunto de Centros de Distribución $j \in CD$ que pueden ser abiertos; $CDL(j) \subseteq CD$.

Parámetros

$CTRPTPLCD_{pijt}$ = Costo de transporte de producto terminado $p \in PT$ desde la planta $i \in PL$ hacia el centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ [\$/Unidades de p].

$CTRPTCDD_{pjj^*t}$ = Costo de transporte de producto terminado $p \in PT$ desde centro de distribución $j \in CD$ hacia centro de distribución $j^* \in CD$ en el periodo $t \in T$ [\$/Unidades de p], $j \neq j^*$.

$CTRPTCDC_{pjkt}$ = Costo de transporte de producto terminado $p \in PT$ desde el centro de distribución $j \in CD$ hacia el cliente $k \in C$ en el periodo $t \in T$ [\$/Unidades de p].

$CVFPT_{ipt}$ = Costo variable de fabricación del producto terminado $p \in PT$ en la planta $i \in PL$ en el periodo $t \in T$ [\$/Unidades de p].

$CMIPTCD_{jpt}$ = Costo de mantenimiento del inventario de producto terminado $p \in PT$ en el centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ [\$/Unidades de p].

$CFOPL_{it}$ = Costo fijo de operación de la planta $i \in PL$ en el periodo $t \in T$ [\$/periodo].

$GAMPPL_{it}$ = Gastos de amortización y depreciación de la planta $i \in PL$ en el periodo $t \in T$ [\$/periodo].

$CFOCD_{jt}$ = Costo fijo de operación del centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ [\$/periodo].

$GAMPD_{jt}$ = Gastos de amortización y depreciación del centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ [\$/periodo].

$CPFUE_{ipt}$ = Costo de penalización por fabricar una unidad extra $p \in PT$ superando la capacidad de producción de la planta $i \in PL$ en el periodo $t \in T$ [\$/unidad de p].

$KPLPT_i$ = Capacidad de producción en la planta $i \in PL$ para todos los productos $p \in PT$ [Unidades de p/año].

$KFCDPT_j$ = Capacidad del flujo a través del centro de distribución $j \in CD$ para todos los productos $p \in PT$ [Unidades de p/año].

$PVPTN_{pkt}$ = Precio de venta del producto terminado $p \in PT$ al cliente $k \in C$ en el periodo $t \in T$ [\$/Unidades de p].

$DEMCP_{kpts}$ = Demanda del cliente $k \in C$ del producto terminado $p \in PT$ en el periodo $t \in T$ y en el escenario $s \in S$ [Unidades de p/ periodo].

$IIACD_j$ = Inversión inicial generada por la apertura del centro de distribución $j \in CD$ [\\$].

FP_p = Factor de peso por unidad de producto $p \in PT$ [$\frac{und}{kg}$]

$WACC$ = Costo del capital invertido por la compañía.

$TIMPR$ = Tasa de impuesto de renta.

Variables de decisión

Variables Flujo

X_{ijpst} = Cantidad de producto terminado $p \in PT$ enviado desde la planta $i \in PL$ hacia el centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ y en el escenario $s \in S$. [Unidades de p / periodo].

Y_{jkpst} = Cantidad de producto terminado $p \in PT$ enviado hacia el cliente $k \in C$ desde el centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ y en el escenario $s \in S$. [Unidades de p / periodo].

V_{jj^*pst} = Cantidad de producto terminado $p \in PT$ a enviar hacia centro de distribución $j^* \in CD_{RE}$ desde centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ y en el escenario $s \in S$, donde $j \neq j^*$. [Unidades de p / periodo].

I_{pjst} = Cantidad de inventario final de producto terminado $p \in PT$ almacenado en el centro de distribución $j \in CD$ en el periodo $t \in T$ y en el escenario $s \in S$. [Unidades de p / periodo].

Kad_{its} = Capacidad adicional de producción extra a considerar en la planta $i \in PL$ en el periodo $t \in T$ y el escenario $s \in S$.

Variables Binarias

$A_j = 1$ si se decide mantener abierto el centro de distribución $j \in CDA$, 0 de lo contrario.

$L_j = 1$ si se decide invertir en la construcción de un centro de distribución $j \in CDL$, 0 de lo contrario.

3.5 Descripción de los componentes del modelo

Dado los supuestos y características de la empresa caso de estudio se hará una breve explicación de cada restricción perteneciente a cada eslabón. Se iniciará la descripción partiendo del análisis del primer eslabón de la cadena, es decir, las plantas de producción y así sucesivamente. Posteriormente se analizará la función objetivo.

3.5.1 Restricciones en planta

El caso de estudio no considera el flujo de proveedores ni la consolidación de materias primas para fabricar los productos, por lo tanto, en las restricciones de plantas solo se encuentra la restricción de capacidad de producción.

Capacidad de Producción

El modelo plantea que cada una de las plantas i debe de fabricar los productos p asignados a esta planta de acuerdo a su capacidad de producción en un periodo t y en el escenario s . Por esta razón el flujo de productos p estaría restringido por la capacidad de fabricación de los productos para cualquier periodo t y escenario s . Existe flexibilidad de producción en caso de que una planta deba producir por encima de su capacidad, para lo cual se utiliza una variable que indica el valor que se puede aumentar la capacidad denominada $Capad_{its}$. Esta variable es penalizada en caso de ser utilizada con el parámetro $PCAP_{ipt}$. Por otra parte, la restricción considera una holgura de capacidad por ser la restricción del tipo “menor o igual. La restricción de capacidad de la planta se presentaría de la siguiente manera:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{ijpst} \leq KPLPT_i + Kad_{its} \quad \forall i \in PL, t \in T, s \in S \quad (3.1)$$

3.5.2 Restricciones en centros de distribución

Los centros de distribución tienen dos tipos de restricciones: Capacidad de despacho de los centros de distribución y Balance de flujos. A continuación, se detalla cada una de ellas:

Restricciones de Capacidad en Centros de Distribución

Esta restricción indica que el peso total despachado en un periodo correspondiente a los flujos de salida de un CD, no debe exceder al peso máximo permisible a despachar desde dichos centros. Esta restricción está sujeta a la apertura o cierre de los centros de distribución, mediante la inclusión de la variable binaria al final de la inecuación. Las restricciones de capacidad para los centros de distribución se representan a continuación:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P V_{jj^*pst} \leq KFCDPT_j \cdot L_j \quad \forall j \in CD, s \in S, t \in T \quad (3.2)$$

$$\sum_{k=1}^C \sum_{p=1}^P Y_{jkpst} + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P V_{j^*jpst} \leq KFCDPT_j \cdot L_j \quad \forall j \in CD, s \in S, t \in T \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P V_{jj^*pst} \leq KFCDPT_j \cdot A_j \quad \forall j \in CD, s \in S, t \in T \quad (3.4)$$

$$\sum_{k=1}^C \sum_{p=1}^P Y_{jkpst} + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P V_{j^*jpst} \leq KFCDPT_j \cdot A_j \quad \forall j \in CD, s \in S, t \in T \quad (3.5)$$

Además, Escobar (2008) plantea que el uso de la variable binaria en el lado derecho de la ecuación controla la apertura o cierre de cada centro de distribución, si en cualquier caso el modelo determina que un centro de distribución se cierra, entonces todas las variables del lado izquierdo se hacen automáticamente iguales a cero, lo que en la práctica significa que un centro de distribución cerrado no puede colocar ningún flujo de producto en ningún nodo siguiente de la red de distribución; o que no podrá recibir producto de ningún nodo anterior. Ello asegura la estructura lógica del modelo, y se cumple porque las variables de decisión se restringen a valores positivos (reales mayores que cero).

Ecuaciones de Balance de Flujo en Centros de Distribución

Esta restricción garantiza que el flujo de productos por los centros de distribución, ingresen y salgan de los mismos se mantenga a lo largo del tiempo. La restricción de balance se presenta a continuación:

$$I_{pjst} + \sum_{k=1}^K Y_{jkpst} + \sum_{j^*=1}^J V_{jj^*pst} - I_{pjs(t-1)} = \sum_{i=1}^I X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J V_{j^*jpst}$$

$$\forall j \in CD, s \in S, t \in T, p \in P \quad (3.6)$$

3.5.3 Análisis riesgo financiero

De acuerdo con Bagajewicz et. Al, la expresión de riesgo financiero definida en el capítulo 2 puede ser redefinida como:

$$Riesgo(x, \Omega) = P_s * Z_s(x, \Omega)$$

Donde P_s es la probabilidad discreta del escenario s y $Z_s(x, \Omega)$ una variable binaria que toma el valor de 1 cuando $VPN_s < \Omega$, y 0 de lo contrario.

Una manera más sencilla de entender la compensación entre riesgo y VPN es a través de la curva del riesgo acumulado, la cual indica que el beneficio proveniente del VPN es proporcional al riesgo, es decir, se obtiene un beneficio alto a un riesgo alto.

En situaciones que involucran grandes cantidades de capital, es posible de evitar el uso de variables binarias para determinar el riesgo y disminuir la carga computacional, reformulando la anterior definición al hacer uso del concepto de *Riesgo a la baja*. Según Eppen et. Al (1989) el riesgo a la baja es el riesgo financiero asociado a las pérdidas. Es decir, es el riesgo de que el rendimiento real esté por debajo del rendimiento esperado. El riesgo a la baja denominado $RiesgoAB(x, \Omega)$ es calculado de la siguiente manera:

$$RiesgoAB(x, \Omega) = \sum_s P_s \cdot \delta_s(x, \Omega)$$

Sujeto a:

$$\delta_s(x, \Omega) \geq \Omega - VPN_s \forall s.$$

$$\delta_s(x, \Omega) \geq 0 \forall s$$

Donde $\delta_s(x, \Omega)$ es una variable continua positiva y Ω el beneficio o rendimiento deseado para la determinación del riesgo a la baja. El $RiesgoAB(x, \Omega)$ puede ser utilizado en el control del riesgo financiero en diferentes objetivos de VPN mediante la variación de Ω a partir de valores pequeños hasta valores más altos, obteniendo una completa gama de soluciones para ser utilizadas por el encargado de las decisiones como un apoyo para la decisión final.

3.5.4 Restricciones generales

Restricción de demanda

Con el fin de restringir que los centros de distribución envíen a los clientes más de la demanda de estos y brindar la posibilidad de encontrar un nivel de satisfacción de demanda que permita obtener el ingreso máximo para la red de distribución se plantea la restricción a continuación:

$$\sum_{j=1}^J Y_{jkpst} \leq DEMCPT_{kpts} \quad \forall k \in C, p \in PT, s \in S, t \in T \quad (3.7)$$

Restricciones de no negatividad de las variables

Esta restricción garantiza que todas las variables tomen valores reales y no negativos para que el problema tenga solución factible. La representación de estas restricciones es como sigue:

$$X_{ijpst}, Y_{jkpst}, V_{jj^*pst}, I_{pjst}, Kad_{its} \geq 0 \forall i, j, j^*, k, p, s, t; L_j \in [0,1] \quad \forall j \quad (3.8)$$

3.5.4 Análisis del Valor Presente Neto (Función objetivo)

Costos operación de centros de distribución

Representan los costos que se incurren en el proceso de cierre o de apertura de algún centro de distribución. También se incluye el costo de operación que tiene el CD. La representación de estos costos para la función objetivo es de la siguiente forma:

$$\sum_j^{\in CD} CFOCDj * Lj \quad (3.10)$$

Nota: la inversión inicial de apertura no se tomará en cuenta como un costo.

Costos variables de producción

Estos costos hacen referencia a los costos que periodo a periodo se incurren en la fabricación de los productos para satisfacer la demanda de los clientes. Estos costos se relacionan de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CPFUE_{ipt} \cdot X_{ijpst}) \quad \forall t \quad (3.11)$$

Costos de transporte desde las plantas a los centros de distribución

Estos costos hacen referencia a los gastos que se incurren de mover la mercancía o producto termina desde las plantas de producción a cada uno de los centros de distribución donde se dispondrá de ellas. La representación de estos costos se muestra a continuación:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CTRPTPLCD_{ijt} \cdot X_{ijpst}) \quad \forall t \quad (3.12)$$

Costos de transporte desde los centros de distribución a las zonas comerciales o clientes y entre centros de distribución

Estos son los costos en los que se incurre cuando se produce la entrega de los productos solicitados a los clientes. Estos costos se representan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (CTRPTCDC_{jkt} \cdot Y_{jkpst}) \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P (CTRPTCDD_{jj^*t} \cdot V_{jj^*pst}) \quad \forall t \quad (3.13) \end{aligned}$$

Costos variables de manipulación:

Estos son los costos que se incurren por cada centro de distribución cuando hay manipulación de materiales en ellos, es decir hay flujo de producto de entrada y salida. La representación de estos costos es como sigue:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^C (CMPTCD_{jt} \cdot Y_{jkpst}) + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^C (CMPTCD_{jt} \cdot V_{jj^*pst}) \quad \forall t \quad (3.14)$$

Costo de mantenimiento de inventario

Este es el costo asociado a almacenar el inventario de producto terminado al final de cada periodo en cada centro de distribución. El parámetro asociado a este costo permite que se asigne un valor promedio de costo de mantenimiento de inventario o se maneje como un costo específico para cada tipo de producto terminado, es decir que se adapta a la manera en la que se maneja el costo de inventario de la compañía.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CMIPTCD_{jpt} \cdot I_{pjst}) \quad \forall t \quad (3.15)$$

Costos de penalización por capacidades adicionales

Los costos de penalización ocurren cuando se necesita capacidad en exceso de las plantas para cubrir la demanda y las necesidades de inventario de los centros de distribución.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P (CPFUE_{ipt} \cdot Kad_{its}) \quad \forall t \quad (3.16)$$

Gastos y costos de amortización y depreciación en plantas y centros de distribución

Gastos y costos inherentes al desgaste o agotamiento que sufren tanto las plantas como los CD's a medida que con su utilización contribuyen a la generación de los ingresos de la empresa. También se incluyen los costos fijos de operación para cada uno. Estos están representados de la siguiente manera:

$$Depam_t = \sum_{i=1}^I GAMDPPL_{it} + \sum_{j=1}^J GAMDPCD_{jt} \cdot L_j \quad \forall t \quad (3.19)$$

$$Depam_t = \sum_{i=1}^I (CFOPL_{it} + GAMDPPL_{it}) + \sum_{j=1}^J (CFOCD_{jt} + GAMDPCD_{jt}) \cdot L_j \quad \forall t \quad (3.17)$$

Flujo de caja libre

Es una variable que permite medir la capacidad que tiene una empresa para generar dinero que esté disponible luego de atender los pagos obligatorios. Este dinero disponible normalmente se utiliza para remunerar a los accionistas.

$$FCL_t = [Ingresos_t - Costos_t] * (1 - TIMPR) + Depam_t \quad \forall t \quad (3.18)$$

Inversión de apertura del CD:

Es el costo inherente a la apertura de un nuevo CD para cualquier periodo de tiempo y escenario.

$$Inv_0 = \sum_{j=1}^J IIACD_j \cdot L_j \quad (3.20)$$

3.6 Estrategia de solución aplicada (ε -constraint)

En particular, Pike-Burke (2015) explica que ε -constraint consiste en optimizar una función objetivo, $f_i(x)$ sujeta a una o más funciones objetivos consideradas como restricciones como $f_j(x) < \varepsilon_j$ para cada $j \neq i$ donde x es un vector de variables de decisión y S la región de factibilidad ($x \in S$).

El conjunto de soluciones eficientes es obtenido a través de variación paramétrica del valor del lado derecho de las restricciones de las funciones objetivo. Este valor corresponde a la representación del peor valor que podrían tomar las funciones objetivo alternas.

3.7 Problema Multi objetivo

De acuerdo a la formulación verbal del modelo de la sección anterior y la explicación de las restricciones y ecuaciones de costo en la función objetivo en la sección subsiguiente, la formulación del modelo matemático es la siguiente:

Maximizar el riesgo a la baja

Sujeto a:

Ecuaciones 3.1 a 3.8

$$RiesgoAB(x, \Omega) < \epsilon_1$$

Con el cambio de valores tanto del peso de ϵ_1 y como de la utilidad esperada Ω se obtiene un conjunto de soluciones. Cada resultado implica una configuración de red diferente.

$$Maximizar VPN = \sum_{s=1}^S \varphi_s \left[\sum_t \frac{FCL_t}{(1 + WACC)^t} \right] - Inv_0$$

Donde:

$$FCL_t = [Ingresos_t - Costos_t] * (1 - TIMPR) + Depam_t \quad \forall t$$

$$Inv_0 = \sum_{j=1}^J IIACD_j \cdot L_j$$

De esta manera es posible detallar el cálculo de cada uno de los factores que componen FCL_t :

$$Ingresos_t = \sum_j^{CD} \sum_k^C \sum_p^{PT} (PVPTN_{pkt} \cdot Y_{jkpst}) \quad \forall t$$

$$Costos_t = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CTRPTPLCD_{ijt} \cdot X_{ijpst})$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P (CTRPTCDCD_{jj^*t} \cdot V_{jj^*pst})$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P (CTRPTCDC_{jkt} \cdot Y_{jkpst})$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CVFPT_{ipt} \cdot X_{ijpst})$$

$$+ \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P (CMIPTCD_{jpt} \cdot I_{pjst})$$

$$+ \sum_{i=1}^I (CFOPL_{it} + GAMDPPL_{it})$$

$$+ \sum_{j=1}^J (CFOCD_{jt} + GAMDPCD_{jt}) \cdot L_j$$

$$+ \sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P (CPFUE_{ipt} \cdot Kad_{its}) \quad \forall t$$

$$Depam_t = \sum_{i=1}^I GAMDPPL_{it} + \sum_{j=1}^J GAMDPCD_{jt} \cdot L_j \quad \forall t$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P X_{ijpst} \leq KPLPT_i + Kad_{its} \quad \forall i \in PL, t \in T, s \in S$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{p=1}^P X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J \sum_{p=1}^P V_{j^*jpst} \leq KFCDPT_j * L_j \quad \forall j \in CD, s \in S, t \in T$$

$$I_{pjst} + \sum_{k=1}^K Y_{jkpst} + \sum_{j^*=1}^J V_{j^*jpst} - I_{pjs(t-1)} = \sum_{i=1}^I X_{ijpst} + \sum_{j^*=1}^J V_{j^*jpst} \quad \forall j \in CD, s \in S \in T, p \in P$$

$$\sum_{j=1}^J Y_{jkpst} \leq DEMCPT_{kpts} \quad \forall k \in C, p \in PT, s \in S, t \in T$$

$$X_{ijpst}, Y_{jkpst}, V_{j^*jpst}, I_{pjst}, Kad_{its} \geq 0 \quad \forall i, j, j^*, k, p, s, t; w_j \in [0,1] \quad \forall j$$

4. ANÁLISIS RESULTADOS DEL MODELO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para el caso de estudio abordado, cabe resaltar que el modelo desarrollado es genérico, es decir, que puede ser adaptado y/o ajustado a cualquier otro caso de estudio que corresponda a una empresa manufacturera de productos de consumo masivo. De acuerdo a lo anterior, el análisis de resultados y el diseño de red obtenido son únicos para cada caso de estudio.

Con base en la metodología ε -constraint, en primer lugar, se valida el modelo de maximización del Valor Presente Neto, para la verificación de sus restricciones frente a las variables resultantes y la obtención de un valor de ganancia deseada. En segundo lugar, se cambia la función objetivo para validar el modelo de minimización del riesgo financiero a la baja. Finalmente se valida el modelo maximización del Valor Presente Neto incluyendo el riesgo financiero a la baja como una restricción. Para cada modelo se utilizó una tasa de retorno del 25%, es decir $WACC = 25\%$.

4.1 Experiencia computacional

Con la información ajustada al caso de estudio, suministrada y supervisada por el director del trabajo de grado, se construyó un modelo para correr a pequeña escala¹ el problema planteado, y así validar su funcionalidad. Una vez este modelo matemático funcionaba, se incorporó toda la información relacionada con la empresa, construyendo una base de datos en Excel 2016, posteriormente se ajustó la información de la base de datos al lenguaje de programación AMPL a través de la herramienta Bloc de notas, en la cual se programaron las dos etapas del modelo. Cada modelo fue resuelto a través del servidor NEOS, el cual contiene el solver CPLEX utilizado para resolver problemas de programación lineal entera en lenguaje AMPL.

Todos los datos se programaron y procesaron en un computador de escritorio con un procesador Inter Core i7 con 16GB de RAM. Los modelos consideraron una planta en operación ubicada en la ciudad de Cali, dos Centros de distribución en operación y un Centro de

¹ Se considera pequeña escala una red con una planta, dos centros de distribución, catorce clientes nacionales e internacionales y diez tipos de productos, con tres escenarios posibles y un periodo de evaluación de cinco años.

distribución potencial para realizar una inversión de expansión de la red, sesenta clientes a nivel nacional y doscientos cincuenta productos fabricados por la empresa.

Para el modelo de maximización del VPN se trabajó con 663.318 variables, siendo tres de ellas variables binarias y 217.455 restricciones, donde 11.250 eran restricciones de igualdad y 206.250 restricciones basadas en desigualdad.

De manera similar, para el modelo de minimización del riesgo a la baja se trabajó con 663.322 variables, siendo 3 de ellas variables binarias y 217.459 restricciones, donde 11.254 eran restricciones de igualdad y 206.250 restricciones basadas en desigualdad.

4.2 Verificación del modelo de maximización del Valor Presente Neto

Para validar el modelo se corroboraron las restricciones en todos los escenarios y la coherencia entre los resultados obtenidos.

Restricción Capacidad de la planta:

- Todos los productos “p” fueron fabricados en la planta sin exceder su capacidad.

SI_X_ NO__

- Si se requiere Capacidad adicional para fabricar los productos “p” en la planta, la variable kad_{ist} registra dicho valor:

SI_X_ NO__

Restricción Capacidad del Centro de Distribución de productos que ingresan:

- No existen flujos de entrada de productos en un CD cerrado:

SI_X_ NO__

- No existen flujos de salida de productos en un CD cerrado

SI_X_ NO__

Restricción Capacidad del Centro de Distribución de productos que despachan:

- El flujo de entrada e inventario inicial del CD es equivalente al flujo de salida e inventario final del mismo.

SI_X_ NO__

- No ocurre envío de productos desde un CD sin haberlo tenido disponible

SI_X_ NO__

Restricción demanda:

- No se ha sobrepasado la demanda de cada cliente.

SI_X_ NO__

Las pruebas iniciales de las restricciones del modelo se realizaron con datos simulados. Una vez se confirmó que el modelo corría correctamente, se modificó el archivo de datos para llevar a cabo las mismas pruebas con los datos reales suministrados por el director de tesis. El resultado final de esta validación fue la coherencia total entre los datos obtenidos y la acertada relación entre variables y ecuaciones.

4.3 Verificación del modelo de minimización del riesgo financiero a la baja

Para validar el modelo se corroboraron las restricciones en todos los escenarios y la coherencia entre los resultados obtenidos.

Restricción Capacidad de la planta:

- Todos los productos “p” fueron fabricados en la planta sin exceder su capacidad.

SI_X_ NO__

- Si se requiere Capacidad adicional para fabricar los productos “p” en la planta, la variable kad_{ist} registra dicho valor:

SI_X_ NO__

Restricción Capacidad del Centro de Distribución de productos que ingresan:

- No existen flujos de entrada de productos en un CD cerrado:

SI_X_ NO__

- No existen flujos de salida de productos en un CD cerrado

SI_X_ NO__

Restricción Capacidad del Centro de Distribución de productos que despachan:

- El flujo de entrada e inventario inicial del CD es equivalente al flujo de salida e inventario final del mismo.

SI_X_NO__

- No ocurre envío de productos desde un CD sin haberlo tenido disponible

SI_X_NO__

Restricción demanda:

- No se ha sobrepasado la demanda de cada cliente.

SI_X_NO__

Las pruebas iniciales de las restricciones del modelo se realizaron con los datos que fueron simulados para la validación anterior. Una vez se confirmó que el modelo corría correctamente, se modificó el archivo de datos para llevar a cabo las mismas pruebas con los datos reales suministrados por el director de tesis. El resultado final de esta validación fue la coherencia total entre los datos obtenidos y la acertada relación entre variables y ecuaciones.

4.4 Resultados Modelo optimizando VPN

Para el modelo de maximización del VPN se decide continuar trabajando con los centros de distribución de Cali y Bogotá y además se decide dar apertura al centro de distribución de Medellín, dando como resultado un valor presente neto de \$ 85.940.867.150 y unos costos totales logísticos de \$ 21.135.836.678, se puede observar que el VPN equivale aproximadamente a cuatro veces los costos totales logísticos, con esta observación podemos concluir que la operación es rentable. Cabe resaltar que los resultados para el VPN y los costos totales logísticos son el promedio de los resultados de estos para cada uno de los tres escenarios.

Tabla 1

Resumen resultados maximización del Valor Presente Neto:

VPN	\$ 85.940.867.150
Costos	\$ 21.135.836.678
CD a invertir	1
Ubicación	Medellín
CD a cerrar	0
Total CD	3
Ubicación	Cali, Bogotá y Medellín

Fuente: el autor.

Fuente: los autores.

En la tabla 1 podemos observar la configuración de red de distribución que brinda el modelo, como principal novedad se resalta el hecho de que sugiere la apertura del centro de distribución en Medellín, opción que se tenía a consideración, y además decide no cerrar ambos de los centros de distribución que operan actualmente en Cali y Bogotá.

4.5 Resultados Modelo Minimizando Riesgo Financiero

Para el modelo de minimización del riesgo financiero a la baja se realizaron diez corridas en el solver CPLEX, en cada una de estas corridas se cambió el valor del parámetro omega (Ω) que es el parámetro base para el cálculo del riesgo a la baja. En la primera corrida se definió el valor de omega como el valor que resultó del modelo de maximización del VPN, en esta se obtuvo el valor del riesgo a la baja y el VPN que se obtendría el modelo, para la segunda corrida del modelo se tomó omega como el valor del VPN resultante de la primera corrida, y así mismo se realizó para las siguientes corridas, tomando omega como el VPN resultante de la corrida

anterior hasta completar las 10 corridas. A continuación se presenta el resumen de las 10 corridas realizadas con sus respectivas configuraciones de red de distribución.

Tabla 2

Resumen de resultados bajo la metodología ε -constraint.

Corrida	Omega	Riesgo a la baja	VPN	Porcentaje de utilidad alcanzada	Porcentaje de utilidad sin alcanzar
1	\$ 85.940.867.150	\$ 18.011.868.813,40	\$ 67.843.057.469,50	78,94%	20,96%
2	\$ 67.843.057.469,50	\$ 11.985.298.189,60	\$ 55.789.916.221,90	82,23%	17,67%
3	\$ 55.789.916.221,90	\$ 7.971.602.154,00	\$ 47.762.524.150,80	85,61%	14,29%
4	\$ 47.762.524.150,80	\$ 5.298.480.594,40	\$ 42.416.281.031,50	88,81%	11,09%
5	\$ 42.416.281.031,50	\$ 3.518.181.635,00	\$ 38.855.683.114,20	91,61%	8,29%
6	\$ 38.855.683.114,20	\$ 2.332.502.529,40	\$ 36.484.324.901,50	93,90%	6,00%
7	\$ 36.484.324.901,50	\$ 1.542.840.244,00	\$ 34.905.000.331,00	95,67%	4,42%
8	\$ 34.905.000.331,00	\$ 1.016.925.162,00	\$ 33.853.170.168,00	96,99%	3,00%
9	\$ 33.853.170.168,00	\$ 666.665.718,00	\$ 33.152.651.279,00	97,93%	2,01%
10	\$ 33.152.651.279,00	\$ 433.392.928,00	\$ 32.686.105.699,00	98,59%	1,33%

Fuente: el autor.

En la tabla 2 se puede observar cómo se llevó a cabo la dinámica para definir el omega en cada corrida, además del resumen de resultados para cada una de estas. A partir de estos resultados se abre un espacio para realizar varias observaciones. En primer lugar es notorio como a medida que disminuye el VPN que se desea alcanzar también disminuye el porcentaje de utilidad que no se alcanzará o riesgo a la baja y como tiende este a cero, en la figura 2 se puede observar claramente esta tendencia. Lo anterior indica que entre menor sea el VPN (omega) que se desea alcanzar, va a ser más grande el porcentaje de este que se alcanzará, llegando casi al 100%. En segundo lugar es pertinente mencionar que aunque se define el omega en la primera corrida como el VPN resultante del modelo de maximización del VPN, se obtiene como resultado que no se alcanzará el 100% de este si no un 78,94%. En tercer lugar se puede verificar que el modelo cumple su cometido de presentar al tomador de decisiones una muestra

representativa de soluciones y queda en manos de él elegir el objetivo al que apuntará y el riesgo a la baja al cual se someterá.

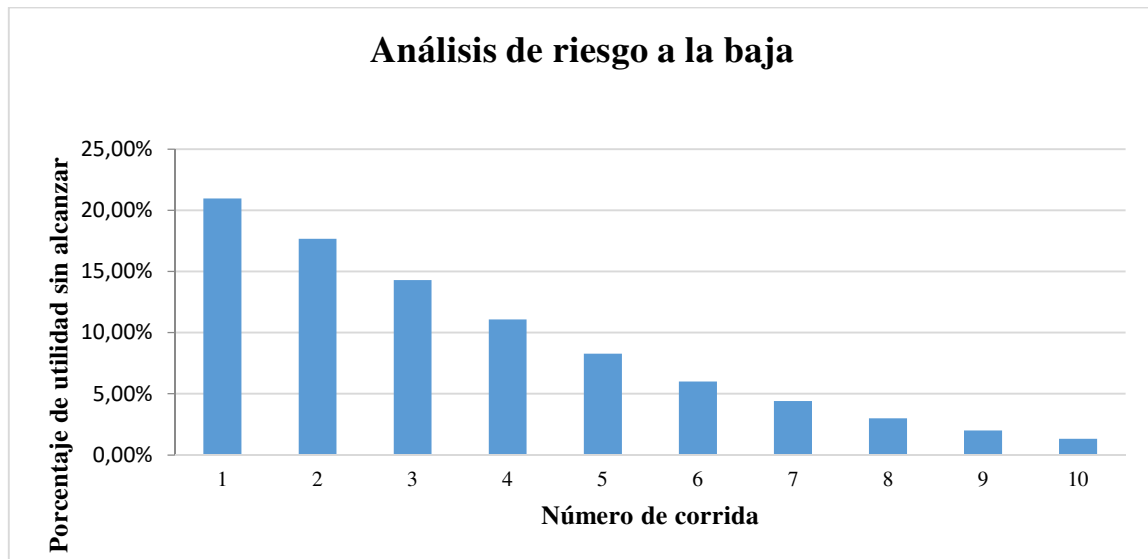


Figura 2. Análisis del porcentaje de utilidad deseado sin alcanzar por cada corrida. Fuente: El autor.

5 CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En este trabajo de grado se ha formulado y solucionado un modelo de programación lineal entera mixta multi objetivo, desarrollado en dos etapas de acuerdo a la metodología Epsilon constraint (ϵ -constraint) definida anteriormente. Se realizó una revisión de literatura de diversos enfoques desarrollados en el diseño de redes de distribución y extensivas pruebas computacionales del modelo propuesto para solucionar el problema de la configuración óptima de una red de distribución, permitiendo concluir los siguientes aspectos:

El modelo no evalúa los escenarios de manera independiente, sino una eventual ocurrencia bajo un esquema de optimización. Cabe resaltar que el objetivo de la presente investigación no consistió en explicar las fuentes de variación cualitativamente sino encontrar posibles resultados futuros basados en técnicas cuantitativas. En ese orden de ideas, para la eficaz operación de la red de distribución, el modelo desarrollado buscó optimizar el desempeño de esta bajo todos los escenarios propuestos de manera simultánea. De este modo, se realizó un enfoque de optimización basado en escenarios, verificando que la red fuera capaz de soportarlos conservando el cumplimiento de la demanda que obtuviera el mayor beneficio posible al menor riesgo financiero de pérdida.

La funcionalidad de los modelos matemáticos desarrollados se validó a través de un caso de estudio que incluye factores críticos suficientes de una red de distribución de productos de consumo masivo para ajustar a la realidad. Además, mediante un análisis de los resultados se evidenció la coherencia de las restricciones en cada escenario, especialmente la restricción de flujo de producto por los centros de distribución en operación y en potencial construcción.

No existe el mejor método general para resolver problemas de optimización multi objetivo, no obstante la implementación de ε -constraint como metodología para la solución de modelos de programación lineal entera mixta con criterios multi objetivo es prometedora dado que en primer lugar su implementación es sencilla y en segundo lugar se ajusta a los requerimientos de solución deseados al obtener resultados coherentes. Se ha demostrado que el grupo de soluciones obtenidas por el método ε -constraint permite la evaluación efectiva de decisiones de carácter

estratégico al considerar el riesgo de pérdida de inversión o el costo en que se incurre al tomar una decisión y no otra.

Futuras investigaciones:

Los resultados obtenidos en el trabajo presentado son considerables para facilitar la toma de decisiones estratégicas y tácticas del administrador de la red de distribución, queda abierto un interesante campo de futuras investigaciones que se pueden derivar de aquí para complementar la investigación y proponer modelos más robustos. Algunas de estas extensiones pueden ser:

- Ampliación de la red de distribución a los clientes fuera de Colombia, es decir, incluir la red que se forma después de que los productos salen de los puertos de exportación.
- Estudio e inclusión de las políticas de inventario propias para cada centro de distribución y lead time para cada planta de acuerdo al comportamiento de sus productos.
- Definir la selección de tipo de transporte a utilizar y ruteo de vehículos que optimice estos costos. Este puede considerarse un estudio independiente al ser una profundización de los resultados.
- Incluir las variaciones estocásticas que se generan en los parámetros para cada año y escenarios posibles. De esta manera se logrará ajustar más a la realidad, pues dadas las condiciones de la economía colombiana, se presentan variaciones semestrales.

BIBLIOGRAFÍA

- Ambrosino, D. & Scutella, M. G. (2001). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operation Research*, 165, 610-624.
- Amir, A. & Javi, N. A. (2009) Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E*, 46, 582-597.
- Azaron, A., Brown, K.N., Tarim S.A., & Modarrese, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116, 129-138.
- Ballou, R. (2004). *Logistica: Administración de la cadena de suministro*. Mexico D.F.: 5 ed. Pearson Education.
- Berman, O. & Krass, D. (2002). Recent Developments in the Theory and Applications of Location Models. *A Preview. Annals of Operations Research*, 111, 15- 16.
- Bagajweicz, M. J. & Barbaro, F. A. (2003). Financial risk management in planning under uncertainty. *Proceedings Foundations of Computer-Aided Process Operations*.
- Camm, J. D., Chorman, T., Dill, F., Evans, J., Sweeney, D. & Wegryn, G. (1997). Source – Blending ORIMS, Judgment, and GIS: Restructuring P&G's Supply Chain. *Interfaces*, 1, 128 – 142.

Chen, G., Daskin, M. & Shen, Zuo-Jun. (2005). A model For Stochastic Facility Location Modeling. *Research Report*, University of Florida.

Council of Supply Chain Management Professionals. (2016). Glosary of Recuperado de https://cscmp.org/imis0/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossery_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921

Chopra, S. (2001). Designing the distribution network in a supply chain. *Evanston. Northwestern University: Kellogg School of Management.*

Chopra, S y Meindl, P. (2007) *Supply chain management: Strategy, planning and operation.* New Jersey: 3 ed. Prentice Hall, Inc.

Daskin, M.S. (1995). Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications. *New York: Wiley-Interscience.*

Daskin, M., Hesse, S.M., y Reville, C.S. (1998), α -Reliable P – Minimax Regret: A new model for strategic facility location modeling. *Location Science* 5, 227 – 246.

Drezner, Z. & Hamacher, H.W. (2004). Facility Location: Applications and Theory. Berlin: *Springer.*

Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization 2 ed.* Recuperado de <http://www.math.hcmus.edu.vn/~nvthuy/om/Multicriteria%20Optimization.pdf>

- Escobar, John Wilmer. (2008). *Modelo de Diseño de Redes de Distribución de Productos de Consumo Masivo con Elementos Estocásticos*. (Trabajo de grado Maestría en Ingeniería Industrial). Universidad del Valle. Cali.
- Escobar, J. W. (2012). Rediseño de una red de distribución con variabilidad de demanda usando la metodología de escenarios. Bogotá: *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*, 9-19.
- Escobar, J.W. (2016). Optimización de redes de distribución con criterios financieros. *En trámite de publicación*.
- Felizzola, Jaime Andrés Y Toledo, Natalia. (2010). *Modelo de optimización para el diseño de redes de distribución de productos de consumo masivo con variabilidad de demanda*. (Trabajo de grado Ingeniero Industrial). Pontificia Universidad Javeriana Cali. Facultad de ingeniera. Ingeniera Industrial. Cali.
- Fisher, M.L., Hammond, J.H., Obermeyer, W.R. & Raman, A. (1994). Making Supply Meet Demand in an Uncertain World. *Harvard Business Review*, 83–93.
- Friedman, T.L. (2007). *The World is Flat: A Brief History of the Twenty-First Century*, Picador/Farra, *Stratus and Giroux: New York*.
- Guillén, G., Mele, F., Bagajewicz. M., Espuña. A. & Puigjaner. L.(2005). Multiobjective supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 60(1), 1535-1553.
- Klibi, W. & Martel, A. (2012). Scenario-bases Supply Chain Network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 223, 644-658.

- Laval, C., Feyh, M., Y Kakouros, S. (2005). Hewlett-Packard Combined OR and Expert Knowledge to Design Its Supply Chains. *Interfaces*, 35(3), 238 – 247.
- Lee, H., & Billington, C. (1993). Material management in decentralized supply chains. *Operations Research*, 41(5), 835–847.
- Lee H., & Feitzinger, E. (1995). Product configuration and postponement for supply chain efficiency. *4th Industrial Engineering Research Conference*, 43-48.
- Lee, H., Padmanabhan, V. y Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review* 38 (3), 93–102.
- Lin, C.K.Y. (2009). Stochastic single-source capacitated facility location model with service level requirements. *International Journal of Production Economics* 117(2), 439–451.
- Melo, M.T., Nickel, S. & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196, 401–412
- Ministerio de comercio, industria y turismo. (2016). *Acuerdos Comerciales De Inversión. Acuerdos vigentes*. Recuperado de <http://www.tlc.gov.co/publicaciones.php?id=5398>
- Mirhassani, S., Lucas, C., Mitra, G., Messina, E., Poojari, C. (2000). Computational Solutions of Capacity Planning Models under Uncertainty. *Parallel Comput*, 26, 511-538.
- Sabriá, F. (2004). *La cadena de suministro. Modelos y herramientas de planificación y optimización de la cadena de suministro*. Barcelona: 1 ed. ICG Marge; Logis Book.

- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167, 96–115.
- Scaparra, M. & Scutella, M. (2001). Facilities, Locations, Customers: Building Blocks of Location Models. *A Survey. Pisa: Technical Report: TR – 01 – 18.*
- Schilling, D. (1982). Strategic Facility Planning: The Analysis of Options. *Decisions Sciences*, 13, 1-14.
- Simchi-Levi, D., Bramel, J., Chen, X. (2005). *The Logic of Logistic. New York: Springer.*
- Snyder, L. (2006). Facility Location Under Uncertainty: A Review. *Bethlehem. IIE Transactions*, 38(7), 537-554.
- Sodhi, M. & Tang, C. (2009). Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset–liability management. *International Journal of Production Economics*, 121, 728-738.
- Swaminathan, J.M. & Tayur, S.R. (2003). Models for Supply Chains in E-Business. *Management Science*, 49(10).
- Tsiakis, P., Shan, N., & Pantelides, C.C. (2001). Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty. *Industry & Engineering Chemistry Research*, 40, 3585 – 3604.

Vanston, J., Frisbie, W., Lopreato, S., & Proston, D. (1977). Alternate scenario planning, 10, 159-180.

ANEXOS

Anexo A. Nomenclatura modelo maximización de VPN en AMPL

#Conjuntos Principales

set PL; #Conjunto de Plantas de Manufactura indexadas por i

set CD; #Conjunto de Centros de Distribución, indexados por j.

param cstart integer;

param cend > cstart integer;

param cinterval > 0 integer;

set C:= cstart .. cend by cinterval; #Conjunto de Zonas Geográficas de Mercado o Clientes, indexadas por k.

param pstart integer;

param pend > pstart integer;

param pinterval > 0 integer;

set PT:= pstart .. pend by pinterval; #Conjuntos de Productos Terminados, indexados por p.

set T; #Conjunto de periodos de valoración, indexados por t.

set S; #Conjunto de escenarios, indexados por s.

#Conjuntos Inducidos

set CD_RE within CD; #Conjunto de centros de distribución que pueden recibir productos enviados desde el centro de distribución j

set CD_EN within CD; #Conjunto de centros de distribución que pueden enviar productos al centro de distribución j

set CDA within CD; #Conjunto de Centros de Distribución que pueden ser cerrados

set CDL within CD; #Conjunto de Centros de Distribución que pueden ser abiertos

set TS within T;

#Parámetros

#Costo fijo de cierre de los centros de distribución

#[\$/periodo]

param CFCCD{ j in CD, t in T}>=0;

param omega>=0;

#Costo de transporte de producto terminado desde las plantas hacia los centros de distribución

#[\$/Unidades de p]

param CTRPTLCD{p in PT,i in PL,j in CD, t in T}>=0;

#Costo de transporte de producto terminado entre centros de distribución

#[\$/Unidades de p]

param CTRPTCDCD{p in PT,j in CD,t in T,m in CD_RE:j<>m}>=0;

#Costo de transporte de producto desde los centros de distribución a los clientes

#[\$/Unidades de p]

param CTRPTCDC{j in CD,k in C,p in PT, t in T}>=0;

#Costo de fabricación de productos

#[\$/Unidades de p]

param CVFPT{i in PL,p in PT,t in T}>=0;

#Costo de mantenimiento de inventarios en los centros de distribución

#[\$/Unidades de p]

param CMIPTCD{p in PT,j in CD,t in T}>=0;

#Costo fijo de operación de las plantas

#[\$/periodo]

param CFOPL{i in PL,t in T}>=0;

#Gastos de amortización y depreciación de las plantas

#[\$/periodo]

param GAMDPPL{i in PL,t in T}>=0;

#Costo fijo de operación de los centros de distribución

#[\$/periodo]

param CFOCD{j in CD,t in T}>=0;

#Gastos de amortización y depreciación de los centros de distribución

#[\$/periodo]

param GAMDPCD{j in CD,t in T}>=0;

de penalización por fabricar unidades extras a la capacidad de las plantas

#[\$/unidad de p]

param CPFUE{i in PL,p in PT,t in T}>=0;

#Capacidad de producción al año de las plantas

#[Unidades de p/año]

param KPLPT{i in PL}>=0;

#Capacidad de flujo al año a través de los centros de distribución

#[Unidades de p/año]

param KFCDPT{j in CD}>=0;

#Precio de venta de producto terminado a mercado nacional

#[\$/Unidades de p]

param PVPTN{p in PT,k in C,t in T}>=0;

#Demanda por producto de los clientes al año

#[Unidades de p/periodo]

param DEMCPT{p in PT,k in C,t in T, s in S}>=0;

#Número de centros de distribución

param NUMCD>=0;

#Probabilidad de ocurrencia del escenario s

param PROBE{s in S}>=0;

#Inversión inicial para apertura de centros de distribución

#[\$]

param IIACD{j in CD}>=0;

#Costo del capital invertido

param WACC>=0;

#Tasa de impuesto de renta

param TIMPR>=0;

#Variables de decisión

#Variables de flujo

#Cantidad de producto terminado a enviar de plantas hacia centros de distribución

#[Unidades de p/ periodo]

var $x_{\{i \text{ in PL}, j \text{ in CD}, p \text{ in PT}, s \text{ in S}, t \text{ in T}\}} \geq 0;$

#Cantidad de producto terminado a enviar de centros de distribución hacia clientes

#[Unidades de p/ periodo]

var $y_{\{j \text{ in CD}, k \text{ in C}, p \text{ in PT}, s \text{ in S}, t \text{ in T}\}} \geq 0;$

#Cantidad de producto terminado a enviar entre centros de distribución

#[Unidades de p/ periodo]

var $v_{\{j \text{ in CD}, m \text{ in CD_RE}, p \text{ in PT}, s \text{ in S}, t \text{ in T}; j < m\}} \geq 0;$

#Cantidad de inventario final de producto terminado en centros de distribución

#[Unidades de p/ periodo]

var $I_{\{j \text{ in CD}, p \text{ in PT}, s \text{ in S}, t \text{ in T}\}} \geq 0;$

#Capacidad adicional de producción de plantas

var $kad_{\{i \text{ in PL}, s \text{ in S}, t \text{ in T}\}} \geq 0;$

#Variables binarias

#Si invierte en la construcción de un centro de distribución

var L{1 in CDL} binary;

#Si se deja abierto el centro de distribución

var A{a in CDA} binary;

var costos >= 0;

#Función Objetivo

maximize VPN:

sum{s in S}(PROBE[s]*sum{t in T}((sum{j in CD,k in C,p in PT}(PVPTN[p,k,t]*y[j,k,p,s,t])-

(sum{i in PL, j in CD,p in PT}(CTRPTPLCD[p,i,j,t]*x[i,j,p,s,t])

+sum{j in CD,m in CD_RE,p in PT:j <> m}(CTRPTCDCD[p,j,t,m]*v[j,m,p,s,t])

+sum{j in CD,k in C,p in PT}(CTRPTCDC[j,k,p,t]*y[j,k,p,s,t])

+sum{i in PL,j in CD,p in PT}(CVFPT[i,p,t]*x[i,j,p,s,t])

+sum{j in CD,p in PT}(CMIPTCD[p,j,t]*I[j,p,s,t])

+sum{i in PL}(CFOPL[i,t]+GAMPPL[i,t])

+sum{a in CDA}((CFOCD[a,t]+GAMDPCD[a,t])*A[a])

+sum{l in CDL}((CFOCD[l,t]+GAMDPCD[l,t])*L[l])

+sum{a in CDA}(CFCCD[a,t]*(1-A[a]))

$$+\sum\{i \text{ in PL}, p \text{ in PT}\}(CPFUE[i,p,t]*kad[i,s,t])*(1-TIMPR)+\sum\{i \text{ in PL}\}GAMPDPL[i,t]+\sum\{a \text{ in CDA}\}(GAMDPCD[a,t]*A[a])+\sum\{l \text{ in CDL}\}(GAMDPCD[l,t]*L[l])/(1+WACC)^t)-\sum\{l \text{ in CDL}\}(IIACD[l]*L[l]);$$

#Restricciones

subject to costoslg:

$$\text{costos}=\sum\{s \text{ in S}\}(\text{PROBE}[s]*\sum\{t \text{ in T}\}(\sum\{i \text{ in PL}, j \text{ in CD}, p \text{ in PT}\}(\text{CTRPTPLCD}[p,i,j,t]*x[i,j,p,s,t])$$

$$+\sum\{j \text{ in CD}, m \text{ in CD_RE}, p \text{ in PT}: j < m\}(\text{CTRPTCDCD}[p,j,t,m]*v[j,m,p,s,t])$$

$$+\sum\{j \text{ in CD}, k \text{ in C}, p \text{ in PT}\}(\text{CTRPTCDC}[j,k,p,t]*y[j,k,p,s,t])$$

$$+\sum\{i \text{ in PL}, j \text{ in CD}, p \text{ in PT}\}(\text{CVFPT}[i,p,t]*x[i,j,p,s,t])$$

$$+\sum\{j \text{ in CD}, p \text{ in PT}\}(\text{CMIPTCD}[p,j,t]*I[j,p,s,t])$$

$$+\sum\{i \text{ in PL}\}(\text{CFOPL}[i,t]+GAMPDPL[i,t])$$

$$+\sum\{a \text{ in CDA}\}((\text{CFOCD}[a,t]+GAMDPCD[a,t])*A[a])$$

$$+\sum\{l \text{ in CDL}\}((\text{CFOCD}[l,t]+GAMDPCD[l,t])*L[l])$$

$$+\sum\{a \text{ in CDA}\}(\text{CFCCD}[a,t]*(1-A[a]))$$

$$+\sum\{i \text{ in PL}, p \text{ in PT}\}(CPFUE[i,p,t]*kad[i,s,t]));$$

Capacidad de producción en plantas

(Unidades de PT/año)

subject to caplant {i in PL,t in T,s in S}:

sum {j in CD, p in PT} x[i,j,p,s,t] <= (KPLPT[i]+kad[i,s,t]);

Capacidad de flujo de PL a CD en CD's posibles de abrir

(Unidades de PT/año)

subject to caplcda {l in CDL,t in T,s in S}:

sum {i in PL, p in PT} x[i,l,p,s,t]+sum {m in CD_EN, p in PT:l<>m} v[m,l,p,s,t] <= (KFCDPT[l]*L[l]);

Capacidad de flujo de PL a CD en CD's ya abiertos

(Unidades de PT/año)

subject to caplcda {a in CDA,t in T,s in S}:

sum {i in PL, p in PT} x[i,a,p,s,t]+sum {m in CD_EN, p in PT:a<>m} v[m,a,p,s,t] <= (KFCDPT[a]*A[a]);

Capacidad de flujo de CD a CD Abiertos

(Unidades de PT/año)

subject to capcdc {l in CDL,t in T,s in S}:

sum {k in C, p in PT} y[l,k,p,s,t]+sum {m in CD_RE, p in PT:l<>m} v[m,l,p,s,t] <= (KFCDPT[l]*L[l]);

Capacidad de flujo de CD a CD con posibilidad de apertura

(Unidades de PT/año)

subject to capcdeda {a in CDA,t in T,s in S}:

sum {k in C, p in PT} y[a,k,p,s,t]+sum {m in CD_RE, p in PT:a<>m} v[m,a,p,s,t] <= (KFCDPT[a]*A[a]);

Cumplimiento de la demanda

(Unidades de PT/año)

subject to deman {k in C,p in PT,s in S, t in T}:

sum {j in CD} y[j,k,p,s,t] <= DEMCPT[p,k,t,s];

Balance de flujo en CD's

(Unidades de PT/año)

subject to balflcduno {j in CD,p in PT,s in S}:

I[j,p,s,1]+sum {k in C} y[j,k,p,s,1]+sum {m in CD_RE:j<>m}v[m,j,p,s,1] = sum{i in PL}x[i,j,p,s,1]+sum {m in CD_EN:j<>m}v[m,j,p,s,1];

Balance de flujo en CD's

(Unidades de PT/año)

subject to balflcddos {j in CD,p in PT,s in S, g in TS}:

$$I[j,p,s,g] + \sum \{k \text{ in } C\} y[j,k,p,s,g] + \sum \{m \text{ in } CD_RE:j < m\} v[m,j,p,s,g] - I[j,p,s,g-1] = \sum \{i \text{ in } PL\} x[i,j,p,s,g] + \sum \{m \text{ in } CD_EN:j < m\} v[m,j,p,s,g];$$

Anexo B. Nomenclatura modelo minimización riesgo financiero a la baja en AMPL

#Modelo de Tesis

#Conjuntos Principales

set PL; #Conjunto de Plantas de Manufactura indexadas por i

set CD; #Conjunto de Centros de Distribución, indexados por j.

param cstart integer;

param cend > cstart integer;

param cinterval > 0 integer;

set C:= cstart .. cend by cinterval; #Conjunto de Zonas Geográficas de Mercado o Clientes,
indexadas por k.

param pstart integer;

param pend > pstart integer;

param pinterval > 0 integer;

set PT:= pstart .. pend by pinterval; #Conjuntos de Productos Terminados, indexados por p.

set T; #Conjunto de periodos de valoración, indexados por t.

set S; #Conjunto de escenarios, indexados por s.

#Conjuntos Inducidos

set CD_RE within CD; #Conjunto de centros de distribución que pueden recibir productos enviados desde el centro de distribución j

set CD_EN within CD; #Conjunto de centros de distribución que pueden enviar productos al centro de distribución j

set CDA within CD; #Conjunto de Centros de Distribución que pueden ser cerrados

set CDL within CD; #Conjunto de Centros de Distribución que pueden ser abiertos

set TS within T; #Conjunto de periodos del 2 al 5; necesario para cuadrar la ecuación de balance de flujo en los CD's

#Parámetros

#Costo fijo de cierre de los centros de distribución

#[\$/periodo]

param CFCCD{ j in CD, t in T }>=0;

param omega>=0;

#Costo de transporte de producto terminado desde las plantas hacia los centros de distribución

#[\$/Unidades de p]

param CTRPTPLCD{p in PT,i in PL,j in CD, t in T}>=0;

#Costo de transporte de producto terminado entre centros de distribución

#[\$/Unidades de p]

param CTRPTCDCD{p in PT,j in CD,t in T,m in CD_RE:j<>m}>=0;

#Costo de transporte de producto desde los centros de distribución a los clientes

#[\$/Unidades de p]

param CTRPTCDC{j in CD,k in C,p in PT, t in T}>=0;

#Costo de fabricación de productos

#[\$/Unidades de p]

param CVFPT{i in PL,p in PT,t in T}>=0;

#Costo de mantenimiento de inventarios en los centros de distribución

#[\$/Unidades de p]

param CMIPTCD{p in PT,j in CD,t in T}>=0;

#Costo fijo de operación de las plantas

#[\$/periodo]

param CFOPL{i in PL,t in T}>=0;

#Gastos de amortización y depreciación de las plantas

#[\$/periodo]

param GAMDPPL{i in PL,t in T}>=0;

#Costo fijo de operación de los centros de distribución

#[\$/periodo]

param CFOCD{j in CD,t in T}>=0;

#Gastos de amortización y depreciación de los centros de distribución

#[\$/periodo]

param GAMDPCD{j in CD,t in T}>=0;

#Costo de penalización por fabricar unidades extras a la capacidad de las plantas

#[\$/unidad de p]

param CPFUE{i in PL,p in PT,t in T}>=0;

#Capacidad de producción al año de las plantas

#[Unidades de p/año]

param KPLPT{i in PL}>=0;

#Capacidad de flujo al año a través de los centros de distribución

#[Unidades de p/año]

param KFCDPT{j in CD}>=0;

#Precio de venta de producto terminado a mercado nacional

#[\$/Unidades de p]

param PVPTN{p in PT,k in C,t in T}>=0;

#Demanda por producto de los clientes al año

#[Unidades de p/periodo]

param DEMCPT{p in PT,k in C,t in T, s in S}>=0;

#Número de centros de distribución

param NUMCD>=0;

#Probabilidad de ocurrencia del escenario s

param PROBE{s in S}>=0;

#Inversión inicial para apertura de centros de distribución

#[$\$$]

param IIACD{j in CD}>=0;

#Costo del capital invertido

param WACC>=0;

#Tasa de impuesto de renta

param TIMPR>=0;

#Variables de decisión

#Variables de flujo

#Cantidad de producto terminado a enviar de plantas hacia centros de distribución

#[Unidades de p/ periodo]

var x{i in PL,j in CD,p in PT,s in S,t in T}>=0;

#Cantidad de producto terminado a enviar de centros de distribución hacia clientes

#[Unidades de p/ periodo]

var y{j in CD,k in C,p in PT,s in S,t in T}>=0;

#Cantidad de producto terminado a enviar entre centros de distribución

#[Unidades de p/ periodo]

var v{j in CD,m in CD_RE,p in PT,s in S,t in T:j<>m}>=0;

#Cantidad de inventario final de producto terminado en centros de distribución

#[Unidades de p/ periodo]

var I{j in CD,p in PT,s in S,t in T}>=0;

#Capacidad adicional de producción de plantas

var kad{i in PL,s in S,t in T}>=0;

#Variables binarias

#Si invierte en la construcción de un centro de distribución

var L{l in CDL} binary;

#Si se deja abierto el centro de distribución

var A{a in CDA} binary;

#Riesgo a la baja

var riesgo{s in S};

var VPN;

#Función Objetivo

minimize R1:

sum{s in S}(PROBE[s]*(riesgo[s]));

#Restricciones

subject to vpn1:

$$\begin{aligned} \text{VPN} = & \sum\{s \text{ in } S\}(\text{PROBE}[s]*((\sum\{t \text{ in } T\}((\sum\{j \text{ in } CD, k \text{ in } C, p \text{ in } \\ & \text{PT}\}(\text{PVPTN}[p, k, t]*y[j, k, p, s, t]) - (\sum\{i \text{ in } PL, j \text{ in } CD, p \text{ in } PT\}(\text{CTRPTPLCD}[p, i, j, t]*x[i, j, p, s, t]) \\ & + \sum\{j \text{ in } CD, m \text{ in } CD_RE, p \text{ in } PT; j \neq m\}(\text{CTRPTCDCD}[p, j, t, m]*v[j, m, p, s, t]) \\ & + \sum\{j \text{ in } CD, k \text{ in } C, p \text{ in } PT\}(\text{CTRPTCDC}[j, k, p, t]*y[j, k, p, s, t]) \\ & + \sum\{i \text{ in } PL, j \text{ in } CD, p \text{ in } PT\}(\text{CVFPT}[i, p, t]*x[i, j, p, s, t]) \\ & + \sum\{j \text{ in } CD, p \text{ in } PT\}(\text{CMIPTCD}[p, j, t]*I[j, p, s, t]) \\ & + \sum\{i \text{ in } PL\}(\text{CFOPL}[i, t] + \text{GAMDPPL}[i, t]) \\ & + \sum\{a \text{ in } CDA\}((\text{CFOCD}[a, t] + \text{GAMDPCD}[a, t])*A[a]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\sum\{l \text{ in } CDL\}((CFOCD[l,t]+GAMDPCD[l,t])*L[l]) \\
& +\sum\{a \text{ in } CDA\}(CFCCD[a,t]*(1-A[a])) \\
& +\sum\{i \text{ in } PL,p \text{ in } PT\}(CPFUE[i,p,t]*kad[i,s,t])*(1-TIMPR)+\sum\{i \text{ in } \\
& PL\}GAMDPPL[i,t]+\sum\{a \text{ in } CDA\}(GAMDPCD[a,t]*A[a])+\sum\{l \text{ in } \\
& CDL\}(GAMDPCD[l,t]*L[l])/(1+WACC)^t)-\sum\{l \text{ in } CDL\}(IIACD[l]*L[l])); \\
& \text{subject to } riesgo_uno \{s \text{ in } S\}: \\
& riesgo[s]=\omega-\left(\sum\{t \text{ in } T\}\left(\sum\{j \text{ in } CD,k \text{ in } C,p \text{ in } PT\}(PVPTN[p,k,t]*y[j,k,p,s,t])-\right.\right. \\
& \left.\left.\sum\{i \text{ in } PL,j \text{ in } CD,p \text{ in } PT\}(CTRPTPLCD[p,i,j,t]*x[i,j,p,s,t])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{j \text{ in } CD,m \text{ in } CD_RE,p \text{ in } PT;j <> m\}(CTRPTCDCD[p,j,t,m]*v[j,m,p,s,t])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{j \text{ in } CD,k \text{ in } C,p \text{ in } PT\}(CTRPTCDC[j,k,p,t]*y[j,k,p,s,t])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{i \text{ in } PL,j \text{ in } CD,p \text{ in } PT\}(CVFPT[i,p,t]*x[i,j,p,s,t])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{j \text{ in } CD,p \text{ in } PT\}(CMIPTCD[p,j,t]*I[j,p,s,t])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{i \text{ in } PL\}(CFOPL[i,t]+GAMDPPL[i,t])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{a \text{ in } CDA\}((CFOCD[a,t]+GAMDPCD[a,t])*A[a])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{l \text{ in } CDL\}((CFOCD[l,t]+GAMDPCD[l,t])*L[l])\right.\right. \\
& \left.\left.+\sum\{a \text{ in } CDA\}(CFCCD[a,t]*(1-A[a]))\right.\right)
\end{aligned}$$

$$+\sum\{i \text{ in PL}, p \text{ in PT}\}(\text{CPFUE}[i,p,t]*\text{kad}[i,s,t])*(1-\text{TIMPR})+\sum\{i \text{ in PL}\}\text{GAMDPPL}[i,t]+\sum\{a \text{ in CDA}\}(\text{GAMDPCD}[a,t]*A[a])+\sum\{l \text{ in CDL}\}(\text{GAMDPCD}[l,t]*L[l])/(1+\text{WACC})^t)-\sum\{l \text{ in CDL}\}(\text{IIACD}[l]*L[l]);$$

subject to riesgo_dos {s in S}:

riesgo[s]>=0;

Capacidad de producción en plantas

(Unidades de PT/año)

subject to caplant {i in PL,t in T,s in S}:

sum {j in CD, p in PT} x[i,j,p,s,t] <= (KPLPT[i]+kad[i,s,t]);

Capacidad de flujo de PL a CD en CD's posibles de abrir

(Unidades de PT/año)

subject to caplcda {l in CDL,t in T,s in S}:

$$\sum\{i \text{ in PL}, p \text{ in PT}\} x[i,l,p,s,t]+\sum\{m \text{ in CD_EN}, p \text{ in PT:l}<>m\} v[m,l,p,s,t] <=$$

$$(\text{KFCDPT}[l]*L[l]);$$

Capacidad de flujo de PL a CD en CD's ya abiertos

(Unidades de PT/año)

subject to capplcdc {a in CDA,t in T,s in S}:

sum {i in PL, p in PT} x[i,a,p,s,t]+sum {m in CD_EN, p in PT:a<>m} v[m,a,p,s,t] <=
(KFCDPPT[a]*A[a]);

Capacidad de flujo de CD a CD Abiertos

(Unidades de PT/año)

subject to capcdcdc {l in CDL,t in T,s in S}:

sum {k in C, p in PT} y[l,k,p,s,t]+sum {m in CD_RE, p in PT:l<>m} v[m,l,p,s,t] <=
(KFCDPPT[l]*L[l]);

Capacidad de flujo de CD a CD con posibilidad de apertura

(Unidades de PT/año)

subject to capcdca {a in CDA,t in T,s in S}:

sum {k in C, p in PT} y[a,k,p,s,t]+sum {m in CD_RE, p in PT:a<>m} v[m,a,p,s,t] <=
(KFCDPPT[a]*A[a]);

Cumplimiento de la demanda

(Unidades de PT/año)

subject to deman {k in C,p in PT,s in S, t in T}:

sum {j in CD} y[j,k,p,s,t] <= DEMCPT[p,k,t,s];

Balance de flujo en CD's

(Unidades de PT/año)

subject to balflcduno {j in CD,p in PT,s in S}:

$I[j,p,s,1] + \sum \{k \in C\} y[j,k,p,s,1] + \sum \{m \in CD_RE:j < m\} v[m,j,p,s,1] = \sum \{i \in PL\} x[i,j,p,s,1] + \sum \{m \in CD_EN:j < m\} v[m,j,p,s,1];$

Balance de flujo en CD's

(Unidades de PT/año)

subject to balflcddos {j in CD,p in PT,s in S, g in TS}:

$I[j,p,s,g] + \sum \{k \in C\} y[j,k,p,s,g] + \sum \{m \in CD_RE:j < m\} v[m,j,p,s,g] - I[j,p,s,g-1] = \sum \{i \in PL\} x[i,j,p,s,g] + \sum \{m \in CD_EN:j < m\} v[m,j,p,s,g];$

