

**DISEÑO DE UN MODELO MULTIOBJETIVO PARA LA CONFIGURACIÓN DE
CADENA DE SUMINISTRO INVERSA**

MAYRA ALEJANDRA MACÍAS JIMÉNEZ



CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

ÉNFASIS EN GESTIÓN DE OPERACIONES

BARRANQUILLA

2018

**DISEÑO DE UN MODELO MULTIOBJETIVO PARA LA CONFIGURACIÓN DE
CADENA DE SUMINISTRO INVERSA**

MAYRA ALEJANDRA MACÍAS JIMÉNEZ

**Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería
con Énfasis en Gestión de Operaciones**

Tutor: PhD (C) MSc. THALIA OBREDOR BALDOVINO

Co - Tutor: PhD (C) MSc. KATHERINNE SALAS NAVARRO

CORPORACIÓN UNIVERSIDAD DE LA COSTA

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

ÉNFASIS EN GESTIÓN DE OPERACIONES

BARRANQUILLA

2018

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Agradecimientos

Agradezco a Dios por su infinita gracia, amor y fidelidad, elementos que se han manifestado a diario a través de dones y obras maravillosas en mi vida.

A mi familia por creer en mí y en mis sueños, por su invaluable apoyo, y motivación en cada proyecto que emprendo.

A la Universidad de la Costa, por ser el claustro que me ha formado profesionalmente durante varios años y me ha abierto sus puertas para crecer académicamente.

A mis tutoras, PhD(C) Thalía Obredor Baldovino y PhD(C) Katherinne Salas Navarro, por su gran apoyo y dedicación en el desarrollo del presente trabajo investigativo.

A mis amigos, colegas y todos aquellos que de alguna u otra forma contribuyeron al cumplimiento de esta meta.

Resumen

La presente investigación tiene como propósito establecer la configuración de una cadena de suministro de flujo inverso considerando variables ambientales y económicas a través de la formulación de un modelo multiobjetivo de programación entera mixta. Los objetivos del problema estudiado fueron la minimización de los costos totales y las emisiones de dióxido de carbono generadas en la operación de la red posconsumo de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla. El conjunto de soluciones que integran la frontera de Pareto fue obtenido a partir del método de restricciones de ϵ aumentado, y la solución a implementar se determinó mediante el uso de reglas basadas en lógica difusa. El modelo permitió la integración de aspectos ambientales y económicos, considerando incertidumbre. Así mismo, se evidenció la influencia de las cantidades retornadas en la operación de la red, específicamente con relación a las emisiones de dióxido de carbono.

Palabras claves: *Cadena de suministro de flujo inverso, modelo multiobjetivo, programación entera mixta, restricciones de ϵ aumentado, medicamentos vencidos*

Abstract

This work has the objective of establishing the reverse logistics supply chain configuration taking into account environmental and economic variables through the formulation of a multi-objective mixed integer programming model. The objectives of the problem studied were minimizing total cost and carbon dioxide emissions due to the network operation of expired medication in Barranquilla city. The set of solutions for the Pareto frontier was obtained through augmented epsilon constraint method, and the solution for implementation was determined through fuzzy logic rules. The model allowed integrating environmental and economic aspects, under uncertainty. In the same way, there was found an influence of the returned products in the network performance, specifically related to carbon dioxide emissions.

Keywords: *Reverse supply chain, multi-objective model, mixed integer programming, augmented epsilon constraint, expired medications*

Contenido

1. Introducción 13

2. Planteamiento del problema 15

3. Justificación 19

4. Objetivos 21

 4.1. General 21

 4.2. Específicos 21

5. Metodología de la investigación 22

 5.1. Tipo de estudio 22

 5.2. Procedimiento metodológico 22

6. Marco de referencia 24

 6.1. Logística inversa 24

 6.2. Cadenas de suministro 25

 6.2.1. Actividades propias de las cadenas de suministro de flujo inverso 27

 6.2.1.1. Toma de decisiones en redes de logística inversa 29

 6.3. Modelos de optimización en logística inversa 32

 6.3.1. Planeación de la producción y administración de inventarios. 32

 6.3.2. Diseño y planeación de redes. 35

 6.3.3. Aspectos ambientales en la formulación. 40

 6.4. Enfoques de modelación 42

 6.4.1. Programación lineal entera mixta 42

 6.4.2. Optimización multiobjetivo 43

 6.4.2.1. Optimalidad de Pareto. 44

 6.4.2.2. Métodos de solución 46

7. Modelo para configuración de cadena de suministro inversa 53

 7.1. Caso aplicado al programa posconsumo de medicamentos vencidos. 54

 7.1.1. Generalidades 54

 7.1.2. Caracterización del programa posconsumo de medicamentos vencidos 56

 7.1.3. Programa nacional posconsumo de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla. 64

 7.2. Modelo matemático para configuración de cadena de suministro inversa 68

7.2.1. Modelo matemático multiobjetivo para la configuración de una cadena de suministro de flujo inverso. 69

7.3. Consideraciones y parámetros 78

7.3.1. Datos de entrada 93

7.4. Resultados 97

7.4.1. Solución del modelo matemático considerando cantidad de productos retornados como parámetro determinístico 97

7.4.2. Solución del modelo matemático considerando cantidad de productos retornados como parámetro incierto. 110

7.4.3. Análisis comparativo entre la solución determinística y estocástica 117

7.4.4. Análisis de Sensibilidad 123

8. Conclusiones 132

9. Bibliografía 135

10. Anexos 150

Anexo 1: Análisis de las cantidades retornadas en los puntos azules 150

Anexo 2: Código del modelo determinístico en GAMS V. 25.0.3. 153

Anexo 3. Código del modelo estocástico en GAMS V. 25.0.3..... 163

Anexo 4. Solución de los problemas WS individuales 173

Anexo 5. Cumplimiento de los supuestos estadísticos para el análisis de los tratamientos... 175

Lista de figuras

Figura 1. Configuración general de una cadena de suministro de ciclo abierto. 26

Figura 2. Configuración general de una cadena de suministro de ciclo cerrado. 26

Figura 3. Alternativas de tratamiento del flujo inverso. 28

Figura 4. Número de publicaciones relacionadas con el tratamiento de la incertidumbre en logística inversa. 31

Figura 5. Concepto de dominancia. 45

Figura 6. Concepto de no dominancia. 45

Figura 7. Concepto de frontera de Pareto. 46

Figura 8. Técnicas de Optimización Multiobjetivo. 47

Figura 9. Cantidad de residuos recolectados a través del Programa nacional posconsumo de medicamentos vencidos (kg). Fuente: Corporación Punto Azul (2017). 57

Figura 10. Contenedor punto azul y sus partes. Fuente: Corporación Punto Azul (2014) 59

Figura 11. Distribución porcentual de medicamentos recolectados vs. residuos impropios. Fuente: Corporación Punto Azul (2014). 61

Figura 12. Tipo de tratamiento al que fueron sometidos los residuos posconsumo de medicamentos. Fuente: Elaboración propia a partir de Corporación Punto Azul (2017). 63

Figura 13. Cadena de Valor del Programa Posconsumo Nacional de Medicamentos Vencidos. Fuente: Corporación Punto Azul (n.d.). 63

Figura 14. Generación de residuos Y3 (Medicamentos vencidos) en el período 2009-2014. Fuente: Elaboración Propia a partir de Castillo Ramírez, Martínez Burgos, & Parody Muñoz (2018). 65

Figura 15. Porcentaje de contribución por departamento al total de recolección agregada en la Zona Norte durante el año 2017. Fuente: Elaboración propia a partir de Corporación Punto Azul (2017b). 67

Figura 16. Configuración de la cadena de suministro inversa seleccionada. 68

Figura 17. Puntos de recolección de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla. Fuente: Elaboración propia a partir de Corporación Punto Azul (2018b). 82

Figura 18. Ubicaciones potenciales de centros de inspección y clasificación i (naranja) y ubicación de centro de aprovechamiento energético (amarillo). 84

Figura 19. Ubicación de centros potenciales de incineración (gestores RESPEL autorizados para el tratamiento de medicamentos vencidos por la CRA)..... 84

Figura 20. Metodología de solución del modelo multiobjetivo 100

Figura 21. Frontera de Pareto para el problema multiobjetivo 105

Figura 22. Frontera de Pareto y solución con la calificación más alta. 108

Figura 23. Frontera de Pareto y mejor solución para el problema multiobjetivo considerando incertidumbre. 117

Figura 24. Comparación entre la frontera de Pareto determinística y estocástica para el problema multiobjetivo estudiado..... 118

Figura 25. Configuración de la red de logística inversa de medicamentos posconsumo en la ciudad de Barranquilla 119

Figura 26. Variación de los costos totales (F_1) ante fluctuaciones de las cantidades retornadas 124

Figura 27. Variación de las emisiones de CO_2 (F_2) ante fluctuaciones en las cantidades retornadas..... 124

Figura 28. Gráfico de efectos principales para F_1 129

Figura 29. Gráfico de efectos principales para F_2 130

Figura 30. Gráfica de probabilidad normal para las cantidades promedio de recolección. 152

Figura 31. Histograma para los datos de recolección promedio anual por contenedor. 152

Figura 32. Gráfico de probabilidad normal para residuos de F_1 175

Figura 33. Gráfico de residuos vs. predichos para F_1 175

Figura 34. Gráfico de probabilidad normal para residuos F_2 176

Figura 35. Gráfico de residuos vs predichos para F_2 176

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de problemas abordados en logística inversa..... 39

Tabla 2. Formulación del método de restricciones de ϵ 49

Tabla 3. Ubicación de los contenedores para disposición de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla..... 66

Tabla 4. Costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación de residuos posconsumo..... 87

Tabla 5. Elementos del costo considerados en la estimación del costo de transporte de referencia..... 89

Tabla 6. Rendimiento de camiones C2. 91

Tabla 7. Declaración de conjuntos..... 94

Tabla 8. Cantidad de productos retornados en el punto azul c, Pc (kg/año)..... 94

Tabla 9. Costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación. 95

Tabla 10. Parámetros para la estimación de emisiones de dióxido de carbono derivadas del transporte de medicamentos posconsumo entre los nodos de la red..... 95

Tabla 11. Datos por defecto para la estimación de emisiones de CO2 procedentes de la incineración de residuos peligrosos. 95

Tabla 12. Otros parámetros del modelo..... 95

Tabla 13. Distancia entre punto azul c y centro de inspección y clasificación i (km)..... 96

Tabla 14. Distancia entre centro de inspección i y centro de incineración d (km) 97

Tabla 15. Distancia entre centros de inspección i y centro de aprovechamiento energético r (km) 97

Tabla 16. Planteamiento del método lexicográfico..... 101

Tabla 17. Matriz de pagos del problema estudiado 101

Tabla 18. Rango de las funciones objetivo en la matriz de pagos. 102

Tabla 19. Puntos no dominados a partir del método de restricciones de ϵ 103

Tabla 20. Puntos no dominados a partir del método de restricciones de ϵ (continuación) 104

Tabla 21. Aplicación de lógica difusa para la calificación de las soluciones 106

Tabla 22. Aplicación de lógica difusa para la calificación de las soluciones (continuación).... 107

Tabla 23. Cantidad de productos a enviar del punto de consumo c al centro de inspección i... 109

Tabla 24. Cantidad de residuos posconsumo a enviar del punto de inspección i al centro de aprovechamiento energético r. 109

Tabla 25. Cantidad de residuos posconsumo a enviar del punto de inspección i al centro de incineración d..... 110

Tabla 26. Matriz de pagos del problema considerando incertidumbre 115

Tabla 27. Conjunto de soluciones de Pareto y calificación de la solución aplicando lógica difusa. 115

Tabla 28. Conjunto de soluciones de Pareto y calificación de la solución aplicando lógica difusa (continuación). 116

Tabla 29. Cuadro comparativo del modelo determinístico y estocástico. 118

Tabla 30. Matriz de pagos del problema WS..... 120

Tabla 31. EVPI del problema estudiado. 120

Tabla 32. Matriz de pagos del problema usando el enfoque del valor esperado (EV) 121

Tabla 33. Matriz de pagos del problema EEV 122

Tabla 34. Cuadro comparativo de la variación de las funciones objetivo respecto a las cantidades retornadas..... 125

Tabla 35. Variación del parámetro costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación. 126

Tabla 36. Factores y niveles por analizar a través del diseño factorial..... 127

Tabla 37. Resultados del diseño experimental..... 128

Tabla 38. Análisis de varianza del efecto de los factores sobre F_1 129

Tabla 39. Análisis de varianza del efecto de los factores sobre F_2 130

Tabla 40. Promedio de recolección de medicamentos por contenedor (kg/año). 150

Tabla 41. Prueba de Bondad de Ajuste para datos de recolección promedio. 151

Tabla 42. Prueba de normalidad para datos de recolección promedio 151

Tabla 43. Resumen estadístico para los datos de recolección promedio. 151

1. Introducción

La dinámica organizacional actual y la producción en masa han traído consigo la generación de una gran cantidad de desechos que suelen disponerse de forma inapropiada. La logística inversa surge como una alternativa sostenible que le permite a las organizaciones mitigar el efecto de tales residuos, dando cumplimiento a la normatividad ambiental, consolidando políticas de responsabilidad social empresarial, así como contribuyendo a la recuperación de valor a partir del tratamiento de los productos recuperados procedentes del consumidor final.

Para la operación eficiente de una red de logística inversa, deben tomarse una serie de decisiones de tipo estratégico, táctico y operativo, dependiendo del horizonte de planeación deseado. De esta forma, en el largo plazo, el tomador de decisiones debe determinar la configuración de la red, es decir, el número de instalaciones a abrir, su ubicación y capacidad. En tanto que, en el mediano y corto plazo, las decisiones se encuentran relacionadas, en su mayoría, con el flujo de materiales en la red, y la planeación y el control de inventarios.

Por consiguiente, para la incorporación de las actividades de logística inversa en una cadena de suministro, se requiere en primera medida, tomar decisiones estratégicas considerando aspectos ambientales y económicos. Por ello, la presente investigación tiene como propósito el diseño de un modelo multiobjetivo para la configuración de una cadena de suministro de flujo inverso, el cual contempla como objetivos la minimización de los costos totales, y la optimización de las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la operación de la red.

La formulación del problema derivó en un modelo de programación lineal entero mixto, cuya solución requirió el uso del método de restricciones de ϵ aumentado. Para la validación del modelo matemático se consideró la operación del programa de medicamentos posconsumo en la

ciudad de Barranquilla, en la medida que esta iniciativa posee un impacto importante en la mitigación de daños potenciales a la salud y el medio ambiente.

De esta forma, el documento inicia presentando las nociones introductorias, el problema y la motivación que dio origen a la investigación (secciones 1-3), al igual que los objetivos y el marco metodológico usado para el desarrollo del proyecto (secciones 4 y 5). Luego, en la sección 6 se realiza una conceptualización de los ejes temáticos que enmarcan la investigación, así como una revisión de los modelos matemáticos desarrollados para la toma de decisiones a nivel estratégico y táctico en la logística inversa. Después, se introduce la caracterización del caso de estudio (subsección 7.1), y se presenta la formulación del modelo de programación lineal entero mixto para la configuración de una cadena de suministro inversa (subsección 7.2).

Posteriormente, se describen los datos del problema (subsección 7.3) y se realiza la validación del modelo matemático propuesto a partir de la solución determinística y estocástica del mismo (subsección 7.4), presentando, además, un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto de la variabilidad debida a las cantidades retornadas en los objetivos de la modelación. Finalmente, se presentan las conclusiones (sección 8) y anexos (sección 10) que soportan la investigación.

2. Planteamiento del problema

La industrialización, el aumento en la oferta de productos y servicios, de la mano del crecimiento económico y la modificación de los patrones de consumo, son algunos de los factores que han incidido en el incremento en la generación de residuos sólidos a nivel mundial (Favela Ávila, Ojeda Benítez, & Lozano Olvera, 2009). En Colombia, se producen alrededor de 12 millones de toneladas al año de residuos sólidos, de los cuales sólo se recicla alrededor del 17% (Departamento Nacional de Planeación, 2016; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Lo anterior, sumado a los incentivos y normativas gubernamentales para regular la disposición de productos posterior a su consumo, ha generado el interés colectivo de grandes y pequeñas empresas de proponer e implementar estrategias tendientes a minimizar el impacto ambiental y económico de los productos generados.

En efecto, la logística inversa se ubica como una de las iniciativas de mayor auge para el logro de estos objetivos, a tal punto que en el Plan Nacional de Desarrollo, se contempla como eje de especial importancia la realización de investigaciones en el área, orientadas a la optimización de la gestión de residuos, en el marco de lo que el estado colombiano ha denominado: Logística para la Competitividad (Departamento Nacional de Planeación, 2014).

A pesar de su relevancia e impacto sobre la competitividad organizacional a nivel económico y ambiental, la adopción de la logística inversa en los sectores productivos sigue representando grandes retos. El mercado de medicamentos no es la excepción a este comportamiento. Justamente, la creciente circulación de fármacos ha desencadenado la preocupación del sector, respecto a los medicamentos vencidos o que superan su vida útil mientras se conservan en el inventario del minorista, o en manos del consumidor final.

Lo anterior, considerando los daños a la salud y al medio ambiente que pueden generarse como resultado de una inadecuada disposición. Se ha demostrado, por ejemplo, que pueden contaminar el agua potable, interferir en los procesos de tratamiento para la recuperación de aguas residuales, perjudicar la vida acuática y, además, al ser descartados en la basura, pueden ser recolectados ilegalmente para su falsificación o reventa (Campos, Paula, Pagani, & Guarnieri, 2017; Xie & Breen, 2012).

De esta forma, el reto más importante, desde una perspectiva estratégica, lo constituye la incorporación de los procesos de logística inversa en las organizaciones habituadas a la logística tradicional, incluyendo la adaptación de sus sistemas productivos y logísticos a la dinámica de recuperación y disposición apropiada de los desechos a partir de las actividades de logística inversa (Cely Torres, 2013).

Con referencia a lo anterior, en la literatura es frecuente encontrar un amplio uso de modelos de optimización como soporte a la toma de decisiones en la logística inversa (Fleischmann et al., 1997; Listes, 2002; Qi & Hongcheng, 2008), en su mayoría, centrados a nivel estratégico para el diseño y planeación de redes (Ortega, M., 2008 citado en Flórez, Toro, & Granada, 2012), y en una menor proporción, modelos tácticos y operativos, cuya finalidad es la gestión de inventarios y administración de la producción en cadenas de suministro inversa (Bazan, Jaber, & Zanoni, 2015).

Sin embargo, en la formulación de los modelos propuestos se suelen despreciar factores como: retrasos en la producción, satisfacción del cliente, y diversos riesgos de tipo social, ambiental, económico, político y organizacional; los cuales influyen significativamente en la toma de decisiones (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015). Así mismo, no existen modelos suficientemente robustos que consideren la incertidumbre asociada con la cantidad o calidad del

producto retornado, y que, además, incluyan un número significativo de parámetros y costos que permitan representar el sistema de manera fidedigna.

De igual forma, una gran proporción de modelos de optimización en logística inversa están enfocados en el potencial económico que se encuentra en la recuperación de productos al finalizar su vida útil o posterior a su consumo, centrando su objetivo en la reducción de costos o maximización de ganancias. No obstante, en muchas ocasiones, el reproceso de los productos va en detrimento de aspectos ambientales que pueden aumentar los niveles de contaminación derivados de la implementación de nuevas técnicas de procesamiento de materiales retornados a la cadena tradicional (Bazan, Jaber, & El Saadany, 2015).

Al respecto, en la literatura existen pocos esfuerzos en la integración de variables ambientales al momento de formular modelos como soporte a la toma de decisiones en el diseño de redes de logística inversa (Yu & Solvang, 2016). Oportunidad importante, considerando que la integración de aspectos ambientales, sostenibles y verdes se considera la extensión más importante dentro de las funciones objetivo actuales en problemas de logística inversa (Govindan et al., 2015).

De esta manera, es posible identificar la necesidad de formular modelos que empleen técnicas alternativas, de forma tal que permitan considerar la incertidumbre característica de las cadenas de suministro de flujo inverso, involucrando factores ambientales y económicos, sumados al flujo de materiales e información característico, permitiendo así garantizar una toma de decisiones integral.

Así mismo, el caso del programa posconsumo de medicamentos vencidos representa una oportunidad para mejorar el funcionamiento de esta red de logística inversa en la ciudad de Barranquilla a través de la configuración de la cadena, lo que permitirá una operación sostenible

de esta iniciativa que ayuda a reducir los potenciales daños a la salud y al medio ambiente derivados de una inadecuada disposición de fármacos.

Considerando los planteamientos expuestos anteriormente, surgen las siguientes preguntas:

¿Cómo pueden integrarse aspectos ambientales y económicos para el diseño de cadenas de flujo inverso sostenibles y eficientes?

¿De qué forma la formulación de un modelo que considere la incertidumbre característica del sistema, contribuirá a la definición de una red de logística inversa sostenible y eficiente?

3. Justificación

La generación descontrolada de residuos a nivel mundial es un fenómeno que ha desencadenado la exploración de alternativas de mitigación. De esta manera, el diseño de redes de logística inversa constituye una base para el desarrollo de iniciativas a nivel gubernamental, orientadas a la gestión de residuos como estrategia para hacer frente a los efectos secundarios derivados de la industrialización.

La adopción de actividades de logística inversa sigue representando un reto para países en vías de desarrollo como Colombia, lo que se refleja en resultados conservadores de recolección y aprovechamiento de residuos, y en una escasa implementación en varios sectores económicos. Situación que no es ajena al sector farmacéutico, en donde se generan alrededor de 200 toneladas al año de medicamentos vencidos, solo en la ciudad de Barranquilla (Castillo Ramírez, Martínez Burgos, & Parody Muñoz, 2018).

Por tanto, en la presente investigación se pretende diseñar un modelo de optimización para la configuración de una red de logística inversa de medicamentos vencidos, usando técnicas de programación entera mixta y un enfoque multiobjetivo.

El desarrollo de un modelo de estas características permitirá contar con una herramienta que sirva de apoyo al proceso de toma de decisiones para la definición de las variables estratégicas que requiere una cadena de suministro de flujo inverso como esta, para funcionar adecuadamente.

De igual manera, la implementación de estas decisiones contribuirá a la recuperación de valor a partir del tratamiento de los productos retornados, y a la reducción del impacto ambiental y mitigación de daños a la salud resultante de la inadecuada disposición de estos.

Finalmente, la investigación permitirá abordar un vacío en el estado del arte de los modelos de optimización en el área de la logística inversa, considerando un enfoque multiobjetivo que contempla dimensiones económicas y ambientales, a través de la minimización de los costos de transporte, procesamiento y apertura de instalaciones, y las emisiones de dióxido de carbono generadas en la operación de la red posconsumo de medicamentos vencidos; así como la incorporación de una fuente de incertidumbre en la modelación, como lo es la cantidad de productos retornados.

4. Objetivos

4.1. General

Diseñar un modelo multiobjetivo para la configuración de una cadena de suministro inversa, considerando aspectos económicos y ambientales.

4.2. Específicos

- Revisar antecedentes a nivel nacional e internacional sobre el uso de metodologías de modelado de sistemas complejos en logística inversa.
- Formular un modelo para optimizar el desempeño de una cadena de suministro considerando la incertidumbre característica y variables seleccionadas.
- Analizar la aplicabilidad del modelo diseñado a un caso de estudio.

5. Metodología de la investigación

En esta sección se presentan los aspectos metodológicos considerados para la elaboración de la investigación.

5.1. Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo descriptivo en la medida en que se pretende caracterizar una cadena de suministro de flujo inverso, describiendo el número de eslabones que la integran y las actividades a su cargo, para una posterior representación a través de un modelo matemático. Así mismo, se considera de tipo cuantitativo, teniendo en cuenta la orientación de la modelación que incluye factores económicos y ambientales, empleando técnicas de programación lineal entera mixta y enfoque multiobjetivo.

5.2. Procedimiento metodológico

De acuerdo con los objetivos planteados, el proyecto se divide en las siguientes fases:

- **Fase 1: Revisión de literatura.** En esta fase se lleva a cabo una revisión sistemática de literatura para la construcción de los referentes conceptuales en los que se enmarca la investigación, así como la revisión del estado del arte y antecedentes en el área de logística inversa, utilizando fuentes primarias de información (artículos científicos, libros, guías, normas) recuperadas de sistemas de información nacionales, y bases de datos especializadas como WOS (*Web of Science*) y Scopus.
- **Fase 2: Caracterización del caso de estudio seleccionado.** En esta etapa se realizó un análisis de la información disponible asociada al programa de medicamentos posconsumo, utilizando para ello informes de gestión, infografías, páginas web, y consultas a entes gubernamentales. Como resultado de esta fase, se determinan los actores involucrados en la red de logística inversa y su interrelación.

- **Fase 3: Formulación del modelo matemático.** En esta fase, se definieron los parámetros, variables, objetivos, y restricciones del problema en estudio. Así mismo, se listan los datos de entrada requeridos para la fase siguiente.
- **Fase 4: Validación del modelo.** En esta etapa, se resolvió el modelo utilizando para ello, el método de restricciones de épsilon aumentado (Mavrotas, 2009), el cual fue aplicado al caso de la red posconsumo de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla, y la selección de la solución a partir de la implementación de normas basadas en lógica difusa (Reza Norouzi, Ahmadi, Esmael Nezhad, & Ghaedi, 2014). La primera fase de la solución considera la cantidad de productos retornados como parámetro determinístico y en la segunda fase, se considera como un parámetro incierto, convirtiendo el problema, en un problema multiobjetivo estocástico. Esta etapa finaliza con un análisis de sensibilidad para verificar el efecto de las cantidades retornadas en los objetivos considerados.

6. Marco de referencia.

A continuación, se describen los fundamentos conceptuales que enmarcan la presente investigación.

6.1. Logística inversa

Previo a la definición del concepto de logística inversa, se hace necesaria la definición del término: logística, noción ampliamente utilizada, y que de acuerdo con el *Council of Supply Chain Management Professionals* (2009) citado en Contreras Castañeda & Silva Rodríguez (2014), se refiere al proceso de planeación, implementación y control del flujo de materias primas, inventario en proceso, productos terminados, así como los flujos de información asociados, desde el punto de origen al punto de consumo.

Para fines de la presente investigación, el modelo a desarrollar se ubica como soporte a la toma de decisiones en la logística inversa, puesto que tratará las actividades relacionadas con la recolección de productos posterior a su utilización, configurando así el flujo desde el punto de consumo (cliente final) hasta el punto de origen (fabricante), a través de la cadena de suministro.

Justamente, esta noción, corresponde al concepto de logística inversa, el cual ha ganado gran popularidad en los últimos años, gracias a las tendencias en responsabilidad social empresarial, normativas ambientales y competitividad sostenible que han surgido alrededor del mundo (Agrawal, Singh, & Murtaza, 2015a) .

De esta forma, es posible definir la logística inversa como el proceso de “planear, implementar y controlar el flujo eficiente de materias primas, inventario en proceso y productos terminados así como la información relacionada, desde el punto de consumo al punto de origen, con el fin de recapturar valor o brindar una adecuada disposición” (*American Reverse Logistics Executive Council* citado en Bhuyar & Shahare, 2013; Govindan & Soleimani, 2016).

Así, la logística inversa agrupa el conjunto de actividades orientadas a recuperar los productos después de su consumo o utilización, para ser reincorporados a la cadena de suministro tradicional o garantizar su disposición final.

6.2. Cadenas de suministro

Ahora bien, conviene definir qué se entiende por cadena de suministro. Definición que corresponde al conjunto de empresas y procesos necesarios para la planeación, abastecimiento, producción y entrega de bienes o servicios al cliente final (De la Arada Juárez, 2015; Hugos, 2010). En general, la administración de cadenas de suministro es fundamental para el éxito organizacional. Sin embargo, el término SCM -por sus siglas en inglés (*Supply Chain Management*)- inició a acuñarse solo a finales de la década de los 80, alcanzando su uso extendido durante los años 90.

Una cadena de suministro cuyo flujo de mercancías se rige bajo el enfoque clásico o de flujo tradicional, es también llamada, cadena de suministro hacia adelante. En tanto, aquellas cadenas que integran las actividades de logística inversa se denominan: cadenas de suministro de flujo inverso o cadenas de suministro inversas.

En la literatura, es posible también distinguir dos tipos de cadenas de suministro en función de las actividades de logística inversa de las que se hace cargo: las cadenas de ciclo abierto y cadenas de ciclo cerrado. Las cadenas de ciclo abierto (Figura 1) son aquellas en donde se originan nuevas actividades de recolección, clasificación, reproceso y distribución, mediante la creación de nuevos mercados y cadenas de recuperación (Flórez et al., 2012). Así mismo, las cadenas de ciclo abierto normalmente surgen a partir de las redes de reparación, siempre que en estos casos las actividades de soporte de productos no involucren la logística tradicional (Fleischmann et al. 2000 citado en Agrawal et al., 2015a).

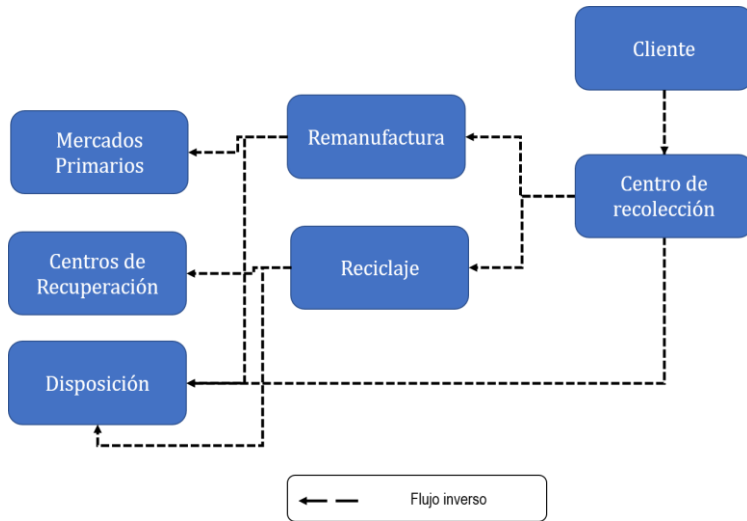


Figura 1. Configuración general de una cadena de suministro de ciclo abierto.
Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, las cadenas de ciclo cerrado (Figura 2) son aquellas en las que los mismos actores de la red se hacen cargo tanto de la logística tradicional como la inversa (Fleischmann et al. 2004; Krikke, 2001; Schultmann et al., 2003; Spengler y Schröter, 2003; Thierry et al., 1995; citados en Arroyo, Villanueva, Gaytán, & García, 2014); constituyéndose así, en una cadena en la que se integran ambos flujos, es decir, cadenas en donde es posible introducir el producto final nuevamente al flujo tradicional o hacia adelante (Flórez et al., 2012).

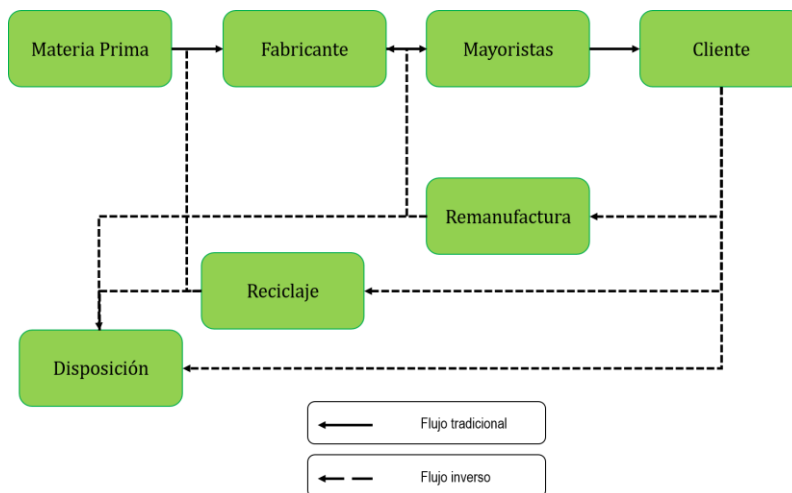


Figura 2. Configuración general de una cadena de suministro de ciclo cerrado.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.1. Actividades propias de las cadenas de suministro de flujo inverso

Una cadena de suministro que integra nociones de logística inversa suele contar con actividades destinadas a la recuperación de valor, tales como: comercialización de productos recuperados a través de nuevos canales de distribución o mercados secundarios; reciclaje de componentes, entendido como la transformación del producto retornado o parte de él mediante procesos fisicoquímicos o mecánicos para la incorporación a otros procesos productivos; o actividades de reutilización, en las que se efectúa el desmontaje de elementos que conforman el producto retornado para su utilización en la misma línea de productos, previo tratamiento físico.

De acuerdo con Jayant (2012) existen cuatro tipos de flujos de retorno que pueden presentarse en una cadena de suministro: Productos al final de su vida útil o EOL (*End-of-life*) products, productos posconsumo, retornos comerciales, y componentes reutilizables.

EOL: El retorno de productos al final de su ciclo de vida obedece a intereses económicos y ambientales. Lo anterior, considerando que los productos cuando alcanzan esta fase final poseen elementos o partes susceptibles de ser recuperadas, que representan una oportunidad desde una perspectiva económica. Además, en esta etapa, los productos pueden generar un impacto ambiental negativo si no son dispuestos adecuadamente (Zarei, Mansour, Husseinzadeh Kashan, & Karimi, 2010).

Productos posconsumo: Este flujo se refiere a productos o componentes retornados después del uso del consumidor. El destino de este tipo de productos suelen ser canales de remanufactura o mercados secundarios.

Retornos comerciales: Los retornos comerciales son originados a partir de problemas en el funcionamiento del producto o por motivos de garantía o servicio técnico.

Componentes reutilizables: El flujo de retorno de este tipo de componentes de productos posee una relación directa con el consumo y utilización del producto principal. Cabe aclarar que esta categoría no se refiere a componentes que son parte del producto, sino aquellos componentes o accesorios complementarios y removibles que el producto requiere para funcionar.

De la anterior clasificación, se concluye que la recuperación de valor no es el único motivo por el que se presenta un flujo de bienes en dirección opuesta al flujo tradicional. A continuación, se indican las alternativas más comunes en cadenas de suministro de flujo inverso dependiendo del tipo de retorno presentado (Figura 3).



Figura 3. Alternativas de tratamiento del flujo inverso.
Fuente: Elaboración Propia.

Reutilización o reventa: Esta estrategia se utiliza si las condiciones de calidad del producto retornado son lo suficientemente buenas, de forma tal que, después de adecuaciones menores de limpieza o mantenimiento, pueda ser vendido nuevamente en el mercado primario.

Reparación: Las redes de reparación involucran los servicios técnicos y de reparación de los productos comercializados. Las actividades de reparación se derivan de defectos en el funcionamiento de productos, debido a una próxima finalización del ciclo de vida del producto

en sí, o alguno de sus componentes. En la medida en que el producto no retorna a la cadena tradicional, se considera una red de ciclo abierto (Agrawal et al., 2015a).

Restauración: En las operaciones de restauración interviene el uso de nuevas tecnologías para prolongar la vida útil de los productos retornados (Cabeza, 2012).

Re-fabricación o remanufactura: Las actividades de remanufactura consisten en volver funcional un producto retornado a partir de operaciones de reproceso. Gracias a las actividades de remanufactura los productos usados son reincorporados al mercado, reduciendo el impacto ambiental y permitiendo recuperar dinero para la cadena (Shi, Zhang, & Sha, 2011).

Reciclaje: El reciclaje consiste en la recuperación de valor a partir del aprovechamiento del flujo de retorno, sin conservar ninguna estructura previa del producto. Los productos reciclados suelen usarse como materia prima para la elaboración de nuevos productos. Por tanto, con esta actividad se logra reducir el impacto ambiental de la generación de residuos, así como disminuir los costos de la red, al sustituir la adquisición de materia prima de otra fuente (Agrawal et al., 2015a; Cabeza, 2012). Para cadenas de suministro cuya actividad principal de logística inversa es el reciclaje, se sugiere la configuración de la red siguiendo una estructura de ciclo abierto.

Vertedero e incineración: Esta alternativa consiste en la disposición final del producto retornado en un vertedero/basurero, o en el envío a un incinerador para su destrucción o eliminación. De acuerdo con Gómez Montoya (2010), se suele considerar como la última opción en el proceso de selección del conjunto de alternativas disponibles, ya que cierra toda posibilidad a la recuperación de valor a partir del producto retornado.

6.2.1.1. Toma de decisiones en redes de logística inversa

Las decisiones relacionadas con las actividades logísticas de una cadena de suministro inversa son diferentes a las que se deben tomar en una cadena tradicional (Arroyo et al., 2014). Lo

anterior, se debe en gran medida a que en una red de logística inversa se pretende recuperar los productos de manos de los consumidores finales.

En el ámbito de la logística inversa se han propuesto diversos modelos determinísticos para servir de apoyo en la toma de decisiones. Sin embargo, de acuerdo con Flapper (1996) citado en Agrawal et al. (2015a), la planeación en la logística inversa debe considerar la incertidumbre asociada a la cantidad y calidad de los productos recolectados, así como el hecho de que éstos pueden ser retornados en cualquier momento.

Lo anterior, puede atribuirse según De la Arada Juárez (2015) a que, en la logística inversa, a diferencia de la logística tradicional, se presenta un sistema “*push*”, en donde la necesidad de recolectar los productos posterior a su consumo, es la que “empuja” el sistema, teniendo por tanto, un mayor grado de incertidumbre asociado a la cantidad y momento de generación del flujo de retorno. Justamente, la disponibilidad de los productos retornados entendida en función de estos dos elementos, es uno de los factores que mayor incertidumbre genera en las redes de logística inversa (Fleischmann et al., 1997).

La consideración de la incertidumbre en la modelación de cadenas de suministro de flujo inverso es una temática de reciente interés para el campo científico. Lo cual, puede comprobarse a través de un análisis de los resultados obtenidos en bases de datos especializadas como *Scopus* y *Web of Science*, a partir de la cadena de búsqueda: (*uncertainty AND (reverse supply chain OR reverse logistics) AND model**), que retorna resultados de la temática estudiada en torno a los modelos asociados a cadenas de suministro de flujo inverso considerando incertidumbre (Figura 4); en donde se observa que la primera aproximación al respecto fue realizada por Pochampally & Gupta (2003).

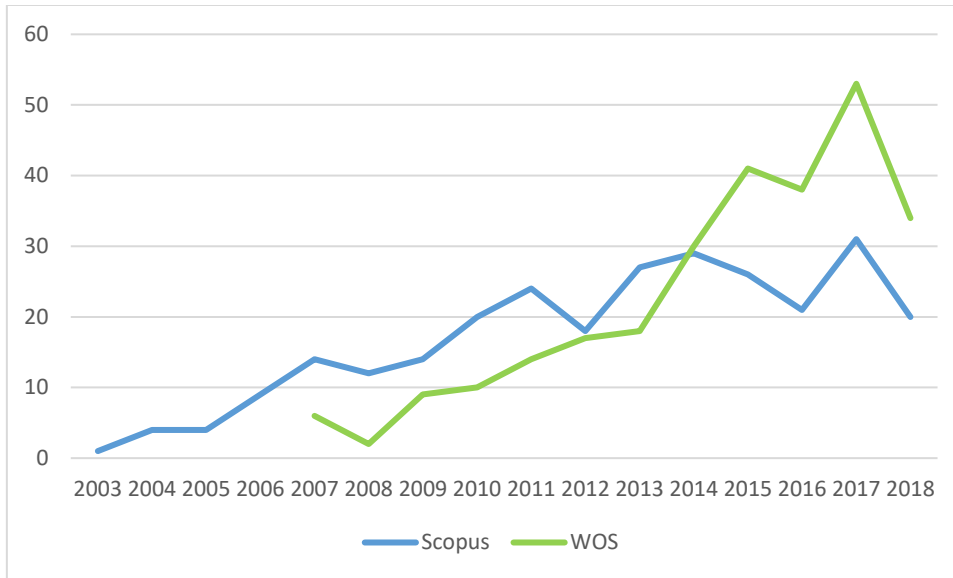


Figura 4. Número de publicaciones relacionadas con el tratamiento de la incertidumbre en logística inversa. Fuente: Elaboración propia a partir de Scopus® y Web of Science® (WOS).

De la revisión de literatura realizada, es posible determinar como principales fuentes de incertidumbre en la modelación de problemas orientados al diseño y planeación de redes de logística inversa: la tasa de retorno, la demanda, la disponibilidad de materias primas, el precio y la proporción de productos no conformes.

Por otro lado, de acuerdo con el horizonte de planeación, los modelos de optimización en logística inversa pueden dividirse en: Estratégicos, tácticos y operativos (Chopra & Meindl, 2010 citado en Govindan et al., 2015). Dentro de los modelos estratégicos, es posible ubicar aquellos cuyo propósito es contribuir a nivel de diseño y planeación de redes de logística inversa, considerando decisiones de cantidad, localización y capacidad de instalaciones; aspectos que deben establecerse en el largo plazo. En la segunda categoría, se encuentran variables de decisión relacionadas con la cantidad de flujo entre los actores de la red, así como decisiones de asignación. Por último, los modelos operativos en logística inversa agrupan modelos de administración de inventario, tamaño de lote y *scheduling*.

Así mismo, es posible encontrar un escenario de integración para la toma de decisiones en una red de logística inversa. Tal integración puede ser vertical, si contempla la combinación de decisiones en diferentes niveles de planeación (estratégico, táctico, y operativo); u horizontal si implica la integración de actividades en el mismo nivel (Ramezani, Bashiri, & Tavakkoli-Moghaddam, 2013).

6.3. Modelos de optimización en logística inversa

En la literatura es posible distinguir dos tipos de problemas predominantes: 1) Asociados a la gestión de inventarios y administración de la producción en cadenas de suministro de flujo inverso, y 2) Relacionados con el diseño y planeación de redes de logística inversa.

A continuación, se describe un conjunto de investigaciones en donde se tratan cada una de estas categorías. Sin embargo, teniendo en cuenta que la presente investigación se enfoca en un problema de configuración limitado al diseño y planeación de una red, se profundizará en el segundo grupo de problemas.

6.3.1. Planeación de la producción y administración de inventarios.

Las decisiones estratégicas asociadas a una red logística influyen directamente en las decisiones tácticas y operativas, lo anterior teniendo en cuenta que estas últimas suelen tomarse después de haber definido la configuración de la red en el largo plazo (Ramezani et al., 2013). Por tanto, la incertidumbre asociada a las fuentes anteriormente mencionadas posee efectos marcados sobre las políticas de producción e inventarios.

Uno de los primeros trabajos en logística inversa que propone un modelo de inventario es el realizado por Schrady (1967). Esta primera aproximación basa la modelación en el enfoque EOQ (*Economic order quantity*) o en español, cantidad económica de pedido; sin embargo, solo contempla factores determinísticos de un sistema de artículos susceptibles de reparación. El

enfoque EOQ básicamente pretende mantener una cantidad en inventario que garantice un nivel óptimo de servicio al cliente y al mismo tiempo minimice los costos totales, a partir de la definición de una política óptima de inventario basada en la cantidad a solicitar y el momento para hacerlo (Salas-Navarro, 2013).

Ahora bien, en lo que concierne a modelos de inventario contemplando incertidumbre, una primera propuesta al respecto es presentada por Teunter (2002), quien en su trabajo formula un modelo basado en EOQ para actividades manufactureras y de remanufactura. No obstante, en la modelación realizada, el tiempo entre la compra y el retorno de un ítem no es contemplado, así como el hecho que todos los artículos retornados pueden ser remanufacturados, situación que en la práctica se encuentra determinada por la calidad del producto que regresa al flujo tradicional.

Recientemente, Liao & Deng (2018) presentan una nueva versión del clásico EOQ, considerando incertidumbre a partir de la cantidad a ordenar y la demanda del mercado. El modelo genera tres estrategias con el propósito de minimizar los costos totales, maximizar el beneficio ambiental y optimizar los flujos tradicionales e inversos en una cadena de remanufactura.

En lo que concierne a la administración de inventarios, la mayoría de modelos planteados en la literatura buscan la minimización de los costos totales garantizando un nivel de servicio adecuado, a través de la optimización de la cantidad de órdenes o el tamaño de lote (Bazan, Jaber, & Zanoni, 2015; Fleischmann et al., 1997; Soysal, 2016). Este tipo de modelos se caracteriza por incluir un conjunto de supuestos que permiten disminuir la complejidad inherente para su modelación y posterior solución.

Sin duda, uno de los retos más representativos que implica el retorno de materiales sobre los niveles de inventario, lo constituye el impacto de la variabilidad debida a la incertidumbre en el

momento de retorno de los productos. Por tal motivo, autores como Lieckens & Vandaele (2010) han incorporado esta situación en sus investigaciones.

Por otro lado, el trabajo de Wei, Li, & Cai (2011) integra los problemas de planeación de la producción y administración de inventarios con tasa de retorno y demanda variables, a través de un modelo de optimización robusta. Así mismo, el trabajo de Shi et al. (2011) plantea un modelo de programación no lineal para la optimización de las ganancias derivadas de la operación de una red de ciclo cerrado multiproducto, considerando la administración de bienes retornados, planeación de la producción y el control de inventarios. Se considera la demanda y la tasa de retorno con incertidumbre, comprobando su impacto sobre la definición de políticas de inventario y producción.

Matar, Jaber & Searcy (2014), por su parte formularon un modelo para la administración de inventario en una cadena de suministro de ciclo cerrado para botellas PET (Tereftalato de polietileno), cuyo objetivo era reducir los costos totales del sistema y la cantidad de botellas plásticas que son dispuestas en los vertederos. La principal contribución de su trabajo recae sobre la consideración de aspectos tales como: la calidad del producto retornado, el costo de rehabilitación de los vertederos y otras variables ambientales. No obstante, para la construcción del modelo, los autores asumieron que las actividades de producción, recolección y disposición eran realizadas por una misma organización, suposición que en la práctica no siempre se cumple.

A pesar de estos esfuerzos, autores como Govindan et al. (2015), afirman que existen vacíos que vislumbran oportunidades para la consideración de la incertidumbre en logística inversa, específicamente en lo concerniente al enfoque no determinístico empleado, la posibilidad de utilizar un enfoque de dos etapas, la estimación de pronósticos y la inclusión de parámetros que

por naturaleza son inciertos, más allá de los tradicionalmente usados como precio, demanda y costos.

6.3.2. Diseño y planeación de redes.

En esta categoría se enmarcan aquellos problemas que involucran la determinación de variables de decisión de tipo estratégico en cadenas de suministro de flujo inverso, como es el caso de problemas de localización y capacidad de instalaciones.

Para la modelación de esta clase de problemas, se han empleado diversos enfoques que van desde la programación lineal y programación entera mixta, modelación conceptual y descriptiva, pasando por modelos de simulación, teoría de juegos, y en una menor proporción, modelos de programación no lineal y otras técnicas (Govindan et al., 2015). De las mencionadas anteriormente, la programación lineal entera mixta se ubica como el enfoque más común para hacer frente a estos problemas, encontrando en la literatura, investigaciones orientadas a la formulación de modelos sin restricciones de capacidad para un solo producto, en contraste con modelos mucho más complejos que incluyen un enfoque multiobjetivo o multiproducto (Agrawal et al., 2015a).

De esta forma, investigadores como Bloemhof-Ruwaard, Van Wassenhove, Gabel, & Weaver (1996), proponen un modelo de programación lineal para encontrar la configuración óptima de la red de logística inversa de la industria de papel y pulpa en Europa. La función objetivo del modelo era minimizar el impacto ambiental de la producción de pulpa virgen, pulpa reciclada, incineración de residuos de papel y transporte. A través del desarrollo de este modelo, los autores lograron analizar cinco escenarios usando diferentes tipos de estrategias de reciclaje. Sin embargo, el modelo despreció factores como la variabilidad en el consumo de papel, la

influencia de las capacidades tecnológicas de los países estudiados en el impacto ambiental, así como la variación en los precios.

Listes (2002), por su parte, desarrolló un modelo genérico estocástico de programación entera mixta para el diseño de una red de suministro-retorno, el cual fue solucionado empleando la heurística de ramificación y acotamiento o *branch-and-bound* y el algoritmo de *L-shaped*. En este modelo, se consideraron escenarios alternativos basados en niveles críticos de ciertos parámetros como la demanda y la tasa de retorno.

Así mismo, Zarei, Mansour, Husseinzadeh Kashan, & Karimi (2010) propusieron un modelo matemático orientado a la optimización de costos, para la configuración de una red que integra la producción de nuevos vehículos y la recuperación de estos después de su vida útil. Dicho modelo fue solucionado empleando algoritmos genéticos. Los autores plantean como oportunidades futuras, la inclusión de variables de decisión relacionadas con la ubicación de las instalaciones, así como el uso de otro tipo de algoritmo de búsqueda de bajo costo para mejorar las potenciales soluciones.

Qi & Hongcheng (2008) plantearon un modelo de programación entera mixta para establecer la configuración óptima de la red de reciclaje de ciclo cerrado para la industria de automóviles incurriendo en mínimos costos. Otra investigación en donde se empleó la programación lineal entera mixta fue la realizada por Hosseinzadeh, Branch, & Roghanian, (2012), quienes centraron su trabajo en el desarrollo de un modelo probabilístico para el diseño de una red de logística inversa, cuya configuración fue determinada posteriormente mediante el uso de algoritmos genéticos. Con este modelo se buscaba establecer el número de centros de procesamiento a abrir, así como la estrategia de transporte que permitiera satisfacer la demanda asociada a los centros

de reciclaje y manufactura, incurriendo en mínimos costos de apertura y envío, considerando una red multiproducto y multinivel.

Kara & Onut (2010) por su parte, propusieron un modelo de programación estocástica de dos etapas para el diseño de una red de suministro inversa bajo incertidumbre. Este problema consideraba la localización óptima de los centros de reciclaje y recolección, y la determinación de un flujo óptimo de cantidades entre los nodos con multi-instalaciones.

De igual manera, Cardoso, Barbosa-Póvoa, & Relvas (2013) desarrollaron otra investigación en donde se formuló un modelo de programación lineal entera mixta para una cadena de suministro de ciclo cerrado de cuatro eslabones, permitiendo la modelación de las actividades principales de: producción, ensamble, almacenamiento, distribución, recolección, clasificación, actividades de remanufactura y disposición.

Ramezani, Bashiri, & Tavakkoli-Moghaddam (2013), formularon un modelo estocástico multiobjetivo, multinivel, multiproducto para el diseño de una red logística hacia adelante e inversa (de ciclo cerrado) bajo incertidumbre. Los objetivos perseguidos por el modelo propuesto fueron: la maximización de utilidades, el nivel de servicio y la calidad del producto. Para el desarrollo del modelo se asumió que la localización de los clientes y proveedores era conocida, así como las ubicaciones potenciales de centros de distribución, recolección y disposición, y algunos costos, como costos fijos y de transporte. Por otro lado, los costos de producción, de operación, recolección y disposición, la demanda y la tasa de retorno fueron definidos como inciertos. Como restricciones del modelo, se consideró el número de instalaciones a abrir y su respectiva capacidad.

Más recientemente, Amin & Baki (2017) también formularon un modelo multiobjetivo, esta vez con el propósito de maximizar el número de productos entregados a tiempo y las utilidades,

en una cadena de ciclo cerrado. El enfoque de modelación usado fue la programación lineal entera mixta considerando como fuente de incertidumbre, la demanda. El mayor aporte de la investigación es la presentación de una propuesta en donde se incluye la incertidumbre, un enfoque bi-objetivo, al mismo tiempo que la incorporación de factores globales, como la tasa de cambio e impuestos aduaneros en la modelación. Lo anterior, en concordancia con las características de la red, en donde se cuenta con proveedores locales e internacionales como actores de la cadena. La solución fue obtenida a partir del uso de lógica difusa y el método de Corley. Los autores proponen como oportunidades futuras la consideración de otros factores en cadenas globales, así como nuevos enfoques de solución utilizando metaheurísticas.

Trochu, Chaabane, & Ouhimmou (2018) plantearon un problema de programación lineal entero mixto para la determinación de la localización y capacidad de las instalaciones de clasificación de una cadena de suministro inversa de Québec (Canadá). La red se ocupa del procesamiento de residuos de la madera derivados del sector de la construcción. Este modelo tenía como propósito la minimización de los costos totales de operación, considerando incertidumbre a partir de un análisis de escenarios. No obstante, en la modelación, la demanda es asumida como un parámetro determinístico, y las posibles configuraciones de la red son presentadas de manera individual sin un procedimiento sistemático para la selección de una única configuración para la red.

Por su parte, J. Kim, Chung, Kang, & Jeong (2018) desarrollaron un modelo de optimización robusta para la definición del plan operativo de una cadena de suministro de ciclo cerrado de tres eslabones en el sector de moda y confecciones, bajo el efecto de la incertidumbre asociada al flujo de retorno y a la demanda. El enfoque utilizado, clasifica las variables de decisión en dos categorías: de diseño y de control, dependiendo del momento en que estas son asignadas, antes o

después de la ocurrencia de la incertidumbre, respectivamente. La solución del modelo permitió evaluar el efecto de la incertidumbre en las utilidades de la red. Sin embargo, por la naturaleza de la cadena, en donde existen tres posibles canales de procesamiento para las prendas recolectadas, se hace necesaria la evaluación de la toma de decisiones en situaciones de conflicto entre los actores involucrados que poseen a su cargo cada una de estas actividades.

En la Tabla 1, se presenta un resumen de los problemas analizados en esta sección, así como las técnicas de modelamiento y solución usadas.

Tabla 1.
Tipos de problemas abordados en logística inversa.

Categoría de Problemas	Tipo de variable	Descripción	Horizonte de Planeación	Técnica de modelamiento utilizada	Técnica de solución
Diseño y Planeación	Estratégicas	Localización	L	Programación lineal, programación entera mixta, modelos de simulación, lógica difusa.	<i>Branch & Bound</i> , <i>L-Shape</i> , soluciones exactas, algoritmos genéticos, recocido simulado, otras heurísticas.
		Capacidad de instalaciones	L		
	Tácticas	Asignación. Ej: El proveedor i atiende CD j	M		
		Planificación	M		
		Tamaño de Lote	C		
Planeación de la producción y admon. de inventarios	Operativas	Política de Inventario	C		
		<i>Scheduling</i>	C		
		Retorno de Productos	C		
		Políticas de control de inventario (Punto de reorden, EOQ, etc)	C		

Nota: Equivalencias (L: largo plazo, M: mediano plazo, C: corto plazo). Elaboración propia a partir de Govindan et al. (2015).

En términos generales, se presenta una tendencia por resolver problemas a nivel estratégico usando métodos analíticos o exactos, lo cual de acuerdo con Govindan & Soleimani (2016), al momento de solucionar problemas de gran tamaño son difícilmente aplicables. En su lugar, para

hacer frente a estos niveles de complejidad, se ha introducido la utilización de heurísticas y metaheurísticas; destacándose por su uso extendido: Algoritmos genéticos, recocido simulado, búsqueda tabú y colonia de hormigas.

No obstante, al momento de seleccionar una técnica de solución, se debe considerar alcanzar un equilibrio entre la calidad de la solución proporcionada por un método exacto y la capacidad de los algoritmos heurísticos y metaheurísticos para solucionar problemas de alta complejidad ofreciendo muy buenas aproximaciones.

6.3.3. Aspectos ambientales en la formulación.

Derivado de las regulaciones gubernamentales y la importancia que las organizaciones asignan a la búsqueda de soluciones tendientes a disminuir los índices de contaminación generados por el tejido empresarial, se observa una marcada tendencia por la inclusión de aspectos ambientales en la modelación de cadenas de suministro que llevan a cabo actividades de logística inversa. Así mismo, predomina el interés por esta temática en países en vías de desarrollo más que en países desarrollados, donde el eje central es el económico (Zarei et al., 2010).

De esta forma, el trabajo de Bazan, Jaber, & Zanoni (2015) presenta una revisión de los modelos de inventario planteados en la literatura que consideran variables ambientales, proporcionando una identificación de los factores ambientales más representativos, dentro de los que se encuentran:

- Emisiones de gases de efecto invernadero.
- Otras emisiones atmosféricas.
- Consumo energético.
- Residuos sólidos.

- Ruido.
- Residuos químicos.
- Uso del agua.
- Residuos tóxicos/peligrosos.
- Consumo de combustible.
- Polución.

Respecto a modelos de inventario, se destacan aportes como el de Bazan et al. (2015) quienes evaluaron el impacto ambiental de implementar una red de logística inversa, considerando para ello, el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero en términos de costos, introduciéndolos en un modelo de inventario. Los resultados obtenidos indican que al incluir estos factores en la función objetivo se reducen los costos totales del sistema. No obstante, los autores señalan que se debe tener especial cuidado en la decisión de optimización, en la que se procure por encontrar un balance entre la mejora colectiva de los factores ambientales y los objetivos individualmente ponderados.

Por otro lado, en lo que respecta al diseño y planeación de redes de logística inversa, Pedram et al. (2017) consideran un único objetivo en la modelación del flujo tradicional y de retorno para la configuración de una red de ciclo cerrado de llantas: la maximización de las utilidades a partir del ahorro energético y una correcta administración de los desechos. El problema considera la incertidumbre generada a partir de tres fuentes: la demanda, la cantidad y calidad de los productos retornados, a través de un enfoque basado en escenarios. Los autores proponen como oportunidades futuras la formulación de un modelo multiobjetivo para la representación de la red.

Por su parte, Yu & Solvang (2016) propusieron un modelo de programación entera mixta multiobjetivo para el diseño de una red de logística inversa de cuatro eslabones que considera no sólo minimizar los costos de operación totales, sino que también la reducción de emisiones de carbono derivadas del transporte y las operaciones de reprocesamiento. Sin embargo, el modelo diseñado considera que todos los productos retornados son vendidos, asumiendo el comportamiento de la demanda del consumidor como un valor conocido, aspecto que en la realidad no se cumple teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a este factor. Así mismo, los autores afirman que la sostenibilidad de un sistema no sólo se evalúa en términos de los factores ambientales seleccionados; planteando así futuras oportunidades para la exploración de otras variables del mismo ámbito en modelos estratégicos.

6.4. Enfoques de modelación

6.4.1. Programación lineal entera mixta

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, uno de los enfoques de modelación más usados en el contexto de problemas en logística inversa es la programación lineal entera mixta o MILP (*Mixed Integer Linear Programming*) por sus siglas en inglés. La frecuente utilización de la programación lineal entera mixta en la modelación de problemas asociados al diseño de redes de logística inversa obedece a que es un enfoque de modelación robusto para hacer frente a este tipo de situaciones.

Un problema de programación lineal entera mixta es un problema de optimización que contempla un conjunto de variables enteras y un conjunto de variables continuas, basadas en valores reales. Los problemas de este tipo son considerados *NP-hard*.

Los problemas de programación lineal entera mixta poseen la siguiente forma (Conforti, Cornuéjols, & Zambelli, 2014):

$$\max \quad cx + hy$$

$$\text{sujeto a: } Ax + Gy \leq b$$

$$x \geq 0 \text{ entero}$$

$$y \geq 0,$$

En donde, se cuenta con los vectores fila:

$$c = (c_1 \quad \dots \quad c_n)$$

$$h = (h_1, \dots, h_p),$$

Una matriz $A = (a_{ij})$, una matriz $G = (g_{ij})$ y un vector columna $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$.

Se asume generalmente que c, h, A, G, b son racionales. Los vectores columna $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix}$, y

$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix}$, contienen las variables a ser optimizadas. El conjunto de variables x_j son enteros no

negativos, mientras que el conjunto de variables y_j pueden tomar cualquier valor real no

negativo. Así, en este tipo de modelos se asume que por lo menos una de las variables es entera.

La solución de modelos de programación entera suele ser difícil. Por tanto, se acude a otras estrategias de solución, como la relajación del modelo, lo cual permite obtener una solución de forma sencilla, y proporciona muy buenas aproximaciones.

6.4.2. Optimización multiobjetivo

Los problemas de optimización multiobjetivo también llamados problemas de programación matemática multiobjetivo, son problemas que requieren la optimización simultánea de múltiples objetivos, usualmente en conflicto (Fonseca & Fleming, 1993).

En el contexto de la logística inversa, el uso del enfoque multiobjetivo tiene como propósito hallar una solución que optimice tanto los costos totales de operación, como las penalidades derivadas del riesgo inducido por acción del flujo inverso en la cadena de suministro (Zarei et al., 2010).

De acuerdo con R. T. Marler & Arora (2004), un problema de optimización multiobjetivo posee la siguiente forma:

$$\text{Min } \mathbf{F}(\mathbf{x}) = [F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots, F_k(\mathbf{x})]^T$$

$$\text{Sujeto a } g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m.$$

$$h_l(\mathbf{x}) = 0, l = 1, 2, \dots, e.$$

Donde k representa el número de funciones objetivo, m el número de restricciones de desigualdad, y e el número de restricciones de igualdad.

En tanto, \mathbf{x} , es un vector que representa el conjunto de variables de decisión y $\mathbf{F}(\mathbf{x})$, un vector de funciones objetivo $F_i(\mathbf{x})$. El espacio factible \mathbf{X} se define como el conjunto $\{\mathbf{x} | g_j(\mathbf{x}) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m; \text{ y } h_i(\mathbf{x}) = 0, i = 1, 2, \dots, e\}$.

6.4.2.1. Optimalidad de Pareto.

En la optimización multiobjetivo, no existe una única solución que satisfaga todos los objetivos. En su lugar, existe un conjunto de soluciones denominadas: soluciones eficientes, no dominadas o soluciones óptimas de Pareto (Branke, Deb, & Miettinen, 2008).

Inicialmente, conviene definir el concepto de dominancia en el contexto de problemas multiobjetivo. Para tal fin, se plantea el siguiente ejemplo: Dado un problema del tipo $\min F(x) = (F_1(x), F_2(x))$, es decir, bi-objetivo, se obtienen las soluciones representadas en la Figura 5. Del análisis gráfico de las soluciones, se puede afirmar que A domina a B, es decir A

representa una mejor solución que B, toda vez que la solución A representa un menor valor tanto para F_1 como para F_2 .

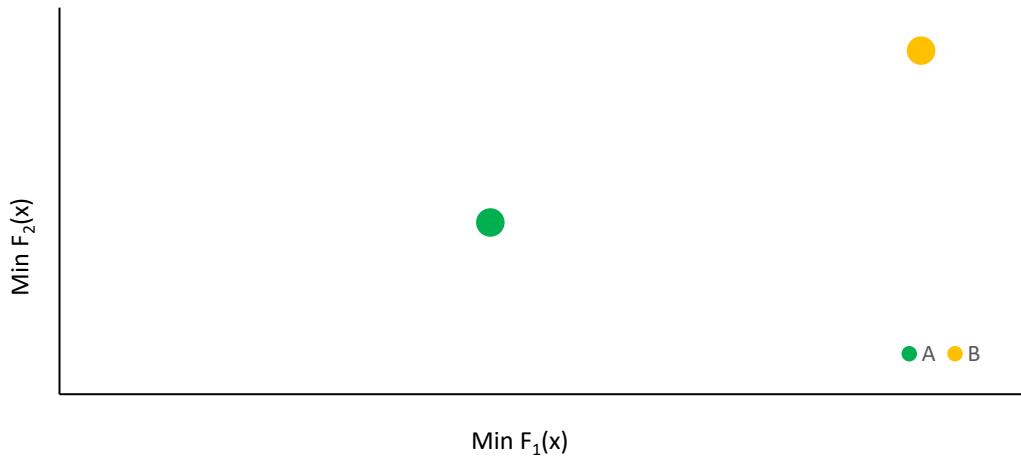


Figura 5. Concepto de dominancia.
Fuente: Elaboración Propia.

Ahora bien, en la Figura 6, A y C, son soluciones no dominadas entre sí, es decir ninguna domina a la otra, y las dos dominan a B. Es decir, A y C, son soluciones óptimas de Pareto.

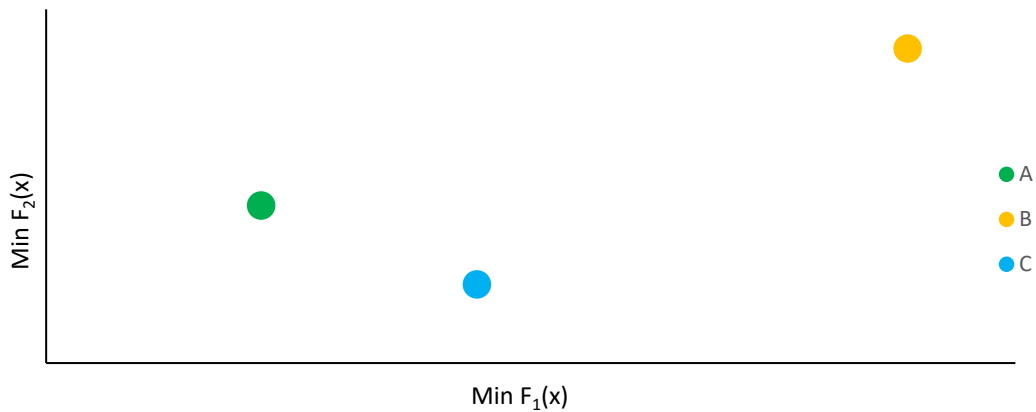


Figura 6. Concepto de no dominancia.
Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con Pareto (1906) citado en Marler & Arora (2004), un punto $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ es un óptimo de Pareto si no existe otro punto, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, tal que $F(\mathbf{x}) \leq F(\mathbf{x}^*)$, y $F_i(x) < F_i(x^*)$, para al menos

una de las funciones. Es decir, para que un punto sea considerado un óptimo de Pareto, este no debe ser dominado por ninguna otra solución del espacio de soluciones.

El conjunto de todas las soluciones de este tipo, es decir, no dominadas, se denomina conjunto óptimo de Pareto y representa la solución del problema multiobjetivo. Además, el conjunto de soluciones no dominadas suele encontrarse sobre una curva de transformación conocida como frontera de Pareto.

Gráficamente la frontera de Pareto puede representarse como se ilustra en el Figura 7. En este caso, la figura representa un problema en donde se desean optimizar dos objetivos $F_1(x)$ y $F_2(x)$. Las soluciones de color amarillo y naranja representan el conjunto de soluciones posibles, y las soluciones no dominadas se encuentran sobre la curva de transformación de color naranja.

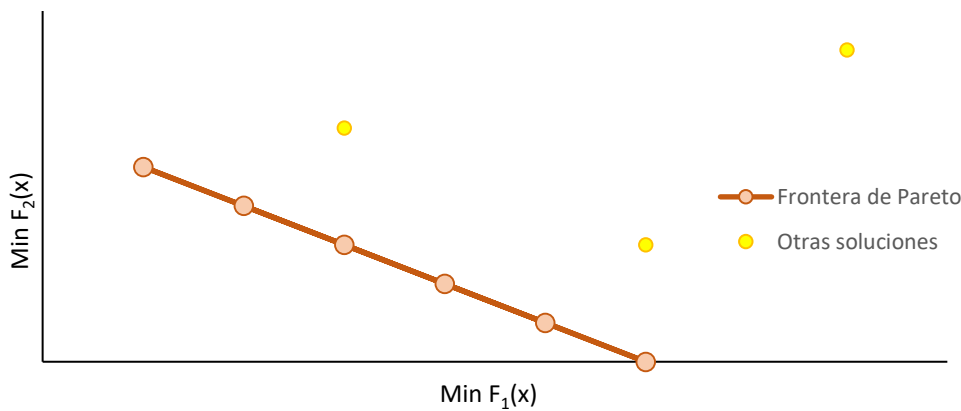


Figura 7. Concepto de frontera de Pareto.
Fuente: Elaboración Propia.

6.4.2.2. Métodos de solución

Por su naturaleza, los modelos de optimización multiobjetivo suelen ser difíciles de resolver. Las técnicas de solución varían desde la agregación o normalización de los objetivos en una única función lineal, hasta técnicas más elaboradas basadas en el concepto de optimalidad de Pareto (Van Veldhuizen & Lamont, 2000).

En la práctica, cuando se está frente a un problema de toma de decisiones, se suele implementar una única solución y no un conjunto de ellas. Por esto, el rol del tomador de decisiones juega un papel muy importante, en la medida que sus preferencias definirán cuál será la solución que se implementará.

La clasificación más aceptada para los métodos de solución de problemas multiobjetivo, agrupa las técnicas en las siguientes categorías: a priori, a posteriori e interactivas (Hwang & Masud, 1979 citado en Mavrotas, 2009). Lo anterior, de acuerdo con la etapa en la que son consideradas las preferencias o criterios del tomador de decisiones.

La Figura 8 ilustra la clasificación de las técnicas de optimización multiobjetivo más usadas, de acuerdo con este aspecto.

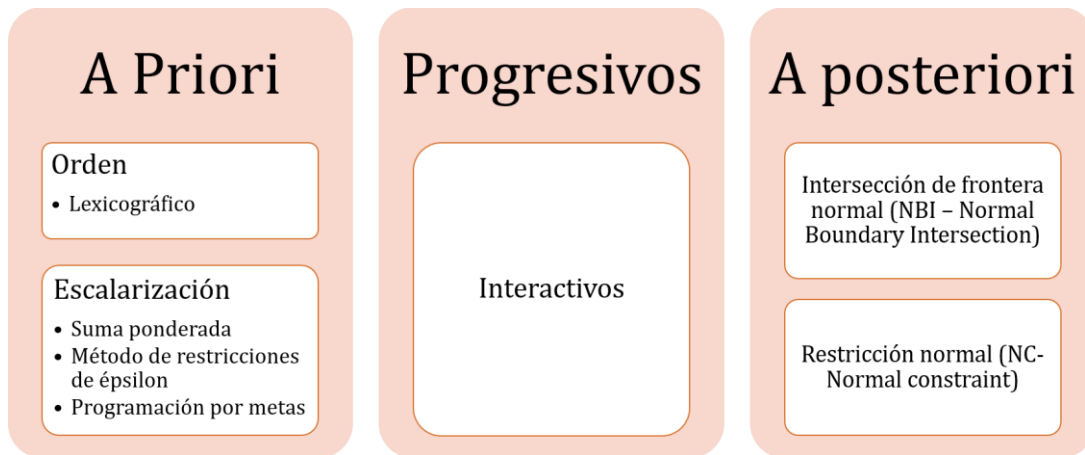


Figura 8. Técnicas de Optimización Multiobjetivo.
Fuente: Elaboración Propia.

En términos generales, en el enfoque a priori, el tomador de decisiones proporciona preferencias frente a la ponderación de los objetivos, previo al proceso de optimización. Caso contrario del enfoque a posteriori, en donde se selecciona un conjunto de soluciones a partir del resultado del proceso de optimización. Una última categoría, la constituyen los métodos de

solución interactivos, en los que en la medida que el proceso de optimización se lleva a cabo, el tomador de decisiones analiza y utiliza la información parcial para retroalimentar el proceso.

A continuación, se describen algunos de los métodos más usados y su aplicación en el contexto de la logística inversa.

- **Método de la suma ponderada**

Una de las técnicas más usadas consiste en transformar el vector de múltiples funciones objetivos en una serie de funciones de tipo escalar con un único objetivo (Il Yong Kim & de Weck, 2005). Es decir,

$$F_{\text{suma ponderada}} = w_1F_1 + w_2F_2 + \dots + w_kF_k$$

Donde $w_i (i = 1, \dots, z)$ es un factor de ponderación para la i ésima función objetivo. La suma ponderada se denomina combinación convexa de objetivos, considerando que los valores de w_i varían en el rango de 0 a 1, y $\sum w_i = 1$.

Esta técnica de solución consiste en buscar un conjunto de soluciones óptimas de Pareto a partir del cambio de las ponderaciones de los objetivos uno por uno.

La selección de las ponderaciones de cada función debe ser un proceso sistemático. Para ello, en la literatura se proponen diversas metodologías, dentro de las que se destacan: métodos de *ranking*, categorización y *rating*.

No obstante, la implementación de esta técnica a priori genera ciertas críticas, debido a que usualmente es difícil conocer previo al proceso de optimización, la función de utilidad que mejor representa el sistema modelado (Fonseca & Fleming, 1993). Así mismo, a pesar de que se seleccionen ponderaciones apropiadas, esto no garantiza la obtención de una solución aceptable que represente el conjunto óptimo de Pareto.

Por lo anterior, es común encontrar investigaciones con variaciones de esta técnica, tales como la de Yu & Solvang (2017), quienes utilizan una versión estandarizada del método para la comparación efectiva de los candidatos a conformar el conjunto solución de un problema de optimización estocástica multicriterio. Por su parte, I. Y. Kim & De Weck (2006) aplican un método desarrollado previamente para la solución de un problema bi-objetivo (Il Yong Kim & de Weck, 2005), esta vez a un problema con más de dos objetivos validado a través de ejemplos numéricos.

- **ϵ constraint o restricción de ϵ .**

Esta técnica de solución consiste en seleccionar uno de los objetivos como objetivo principal del problema, y plantear los demás como restricciones del modelo, convirtiendo el modelo multiobjetivo en uno mono-objetivo. A cada función objetivo -representada como restricción-, se le asigna un parámetro llamado ϵ_i . La formulación del método se ilustra en la Tabla 2.

Tabla 2.
Formulación del método de restricciones de ϵ .

Problema de programación matemática multiobjetivo	Método de ϵ constraint o restricción de ϵ
$\max(f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}))$ <p>s.t. $\mathbf{x} \in S$</p> <p>Donde \mathbf{x} es el vector de variables de decisión, $f_1(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$ son las k funciones objetivo y S la región factible del problema.</p>	$\max f_1(\mathbf{x})$ <p>s.t. $f_2(\mathbf{x}) \geq e_2,$ $f_3(\mathbf{x}) \geq e_3,$... $f_k(\mathbf{x}) \geq e_p$ $\mathbf{x} \in S$</p> <p>A partir de la variación del lado derecho de las restricciones e_i, se obtiene la solución al problema.</p>

Nota: Elaboración propia a partir de Mavrotas (2009).

El método de restricciones de ϵ posee ventajas significativas frente al método de suma ponderada del inciso anterior. En la literatura se encuentran aplicaciones del método para la

solución de problemas bi-objetivo, como en el trabajo de Osorio Muriel, Brailsford, & Smith (2014), quienes aplicaron el algoritmo en su versión aumentada para la minimización de donantes y la minimización de costos, en un problema de selección de tecnologías y asignación para la recolección sanguínea. Otra investigación, en donde se utiliza una versión aumentada del método, es propuesta por Mavrotas (2009). En este caso, el autor desarrolla un algoritmo en GAMS para la solución de problemas de optimización multiobjetivo, validado para varias instancias.

Sin embargo, existen aspectos de especial atención para la implementación de este algoritmo, tales como: el cálculo del rango de funciones objetivo, la eficiencia de la solución obtenida, y el incremento en los tiempos de solución (Reza Norouzi et al., 2014).

- **Método lexicográfico**

En el método lexicográfico, las funciones objetivo son incluidas en orden de importancia. De acuerdo con Mavrotas (2009), el método funciona de la siguiente manera :

- a) Se inicia obteniendo el óptimo para la primera función objetivo (la de mayor importancia), por ejemplo: $f_1 = z_1^*$.
- b) Luego, se soluciona el problema optimizando la segunda función objetivo y añadiendo como nueva restricción la solución hallada previamente, es decir $f_1 = z_1^*$, para mantener la solución óptima de la primera optimización.
- c) Como resultado de la etapa anterior, asumiendo que se obtiene $f_2 = z_2^*$, se resuelve el problema nuevamente incluyendo como función a optimizar la tercera función objetivo y añadiendo como restricciones $f_1 = z_1^*$ y $f_2 = z_2^*$.

- d) Si se han incluido todas las funciones objetivo que conforman el problema, el algoritmo se detiene, de lo contrario se repiten los pasos hasta que la condición de parada se cumpla.

A continuación, se describe la formulación matemática del método lexicográfico.

$$\text{Min } F_i(\mathbf{x})$$

Sujeto a

$$F_j(\mathbf{x}) \leq F_j(\mathbf{x}_j^*), \quad j = 1, 2, \dots, i - 1, i > 1,$$

$$i = 1, 2, \dots, k$$

Donde i , representa la posición de una función en el orden deseado, y $F_j(\mathbf{x}_j^*)$ representa el óptimo de la j -ésima función objetivo, encontrada en la j -ésima iteración.

Respecto a aplicaciones del método en el contexto de cadenas de suministro de flujo inverso, suele usarse en conjunto con otros métodos, como en el trabajo de Reza Norouzi et al. (2014).

- **Método de Programación por metas**

El enfoque de programación por metas fue propuesto por Charnes et al. en el año de 1955. Se considera una extensión del método de programación lineal, en donde se especifican metas asociadas a cada función objetivo del problema. El propósito de esta técnica es la satisfacción simultánea de varias metas definidas para un problema dado.

El primer paso del método corresponde a la definición de las metas, entendidas como valores aceptables a alcanzar para cada objetivo perseguido. Luego, se deben incluir las variables de desviación, que no son más que la cuantificación de la diferencia por exceso o por defecto respecto a la meta propuesta (Romero, 1991).

Los modelos de programación por metas pueden ser clasificados en dos subgrupos:

a. Programación por metas ponderadas.

En este tipo de modelos se asignan pesos a las desviaciones indeseadas, de acuerdo con su importancia relativa para el tomador de decisiones.

La formulación matemática es la siguiente (Tamiz, Jones, & Romero, 1998):

$$\min Z = \sum_{i=1}^k (u_i n_i + v_i p_i)$$

Sujeto a:

$$f_i(\mathbf{x}) + n_i - p_i = b_i, \quad i = 1 \dots Q, \quad \mathbf{x} \in C_s$$

Donde, $f_i(\mathbf{x})$ es una función objetivo lineal y b_i el valor meta de ese objetivo. n_i y p_i son las desviaciones negativas y positivas frente al valor meta, y u_i, v_i las ponderaciones asignadas a estas desviaciones en la función objetivo. Por su parte, C_s es un conjunto opcional de restricciones.

b. Programación por metas lexicográficas.

En esta variación del método, las variables de desviación se asignan dentro de un conjunto de niveles de prioridad y así mismo, son minimizadas siguiendo una lógica lexicográfica.

A continuación, se presenta la representación matemática del método:

$$Lex \min \mathbf{a} = (g_1(n, p), g_2(n, p), \dots, g_L(n, p))$$

Sujeto a:

$$f_i(\mathbf{x}) + n_i - p_i = b_i, \quad i = 1, \dots, Q$$

En donde, L representa los niveles de prioridad y Q el número de objetivos. \mathbf{a} es un vector ordenado de los L niveles, n_i, p_i son las variables de desviación y \mathbf{x} el conjunto de variables de decisión.

7. Modelo para configuración de cadena de suministro inversa

Tomando en consideración la revisión de literatura realizada, y de manera especial las sugerencias propuestas en el estudio de Yu & Solvang (2016), en la presente investigación se pretende formular un modelo que sirva de apoyo a la toma de decisiones para la configuración de una cadena de suministro de flujo inverso. Tal configuración, se refiere a la definición de las variables de decisión a nivel estratégico que la red requiere para funcionar eficientemente desde una perspectiva económica y ambiental.

Por tanto, se procederá a formular un modelo multiobjetivo que considera la incertidumbre característica de la cantidad de productos retornados y establece como objetivos la reducción de costos totales y minimización de las emisiones de CO_2 (dióxido de carbono) derivadas del transporte y la incineración de productos, para una cadena de suministro de tres eslabones.

La selección de los costos totales como uno de los objetivos del problema multiobjetivo, obedece al carácter económico tradicional de la definición de redes de logística inversa. Así mismo, la selección de las emisiones de CO_2 como segundo objetivo a considerar, se debe al impacto de este gas de efecto invernadero en los niveles de contaminación ambiental, toda vez que es considerado el segundo gas más importante en el calentamiento global después del vapor de agua, así como el gas que mayor influencia ha ejercido sobre el forzamiento radiativo positivo, es decir, sobre el incremento en los niveles de temperatura de la troposfera, y el mayor responsable de la acidificación de los océanos como resultado de su concentración atmosférica (Benavides Ballesteros & León Arístizabal, 2007).

7.1. Caso aplicado al programa posconsumo de medicamentos vencidos.

7.1.1. Generalidades

La industria farmacéutica se encarga del desarrollo, fabricación y venta de medicamentos. A nivel global, representa una de las industrias de mayor dinamismo en materia de actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), y uno de los sectores económicos, que mayores ganancias obtiene a partir de la comercialización de grandes volúmenes de fármacos.

Justamente, la creciente circulación de medicamentos en el mercado ha desencadenado la preocupación del sector, respecto a los medicamentos vencidos o que superan su vida útil mientras se conservan en el inventario del minorista, o en manos del consumidor final.

Debido a los daños potenciales a la salud y el medio ambiente, es imperativo que los actores del sector farmacéutico desarrollen estrategias de logística inversa, de forma tal que se garantice la adecuada disposición de medicamentos vencidos y el tratamiento apropiado de cajas, blísteres y otros elementos de almacenamiento, bajo estrictos controles. En efecto, muchos académicos coinciden en que los fármacos son un tipo de producto particular, que debe ser tratado de manera diferente al momento de establecer redes de logística inversa (Sabage et al., 2006 citado en Xie & Breen, 2012).

De acuerdo con Kongar, Haznedaroglu, Abdelghany, & Bahtiyar (2015) las dos causas más comunes de flujos de carácter inverso en el sector farmacéutico son: medicamentos vencidos y retiro de fármacos, esta última actividad, entendida como el conjunto de acciones tomadas por una compañía para remover un producto del mercado, ya sea por decisión autónoma o acatando directrices de organismos sanitarios.

En el contexto social, es común que los medicamentos expiren en manos del consumidor sin haber sido utilizados en su totalidad. De acuerdo con Garzón Ramírez & Hernández Losada

(2014); Seehusen & Edwards (2006), algunas causas asociadas a este fenómeno son: la renovación en la prescripción médica que conduce a un cambio de dosis después de cierto período o la modificación total del tratamiento, y la presencia de efectos secundarios derivados del consumo de fármacos, lo que genera la interrupción de la medicina. Lo anterior, ocasiona que alrededor del 3% de los medicamentos recetados no se consuma. Justamente, esta práctica, suele derivar en que el cliente final almacene fármacos no utilizados o descarte aquellos que han superado su vida útil.

Otra causa de la expiración de fármacos en el mercado, es el sobreabastecimiento de inventario por parte de los minoristas para garantizar la disponibilidad de medicinas, lo que ante una ausencia de la demanda esperada, ocasiona la caducidad del exceso de inventario (Weraikat, Zanjani, & Lehoux, 2016).

Los medicamentos vencidos o almacenados inadecuadamente pueden ocasionar riesgos para la salud, así como daños en el medio ambiente por una disposición inapropiada; no en vano, se encuentran incluidos como residuos peligrosos en la Resolución 1164 de 2002 y en el Decreto 4741 de 2005 en la categoría de residuos químicos (código Y3) (Ministerio de Medio Ambiente & Ministerio de Salud, 2002). Investigaciones recientes demuestran que pueden contaminar el agua potable, perjudicar la vida acuática, ocasionar daños a la salud y, además, al ser descartados en la basura, pueden ser recolectados ilegalmente para su falsificación (Campos et al., 2017).

La falsificación de medicamentos es una de las grandes preocupaciones de las autoridades sanitarias a nivel global. Se estima que uno de cada 10 medicamentos que se consume en países subdesarrollados o en vías de desarrollo, es fraudulento (World Health Organization, 2018). En Colombia, de acuerdo con la Federación Médica Colombiana no existen datos oficiales sobre este flagelo, ya que la mayor parte de la información se maneja a través de la prensa; sin

embargo, el país se encuentra en la mira de organizaciones como la OMS (Organización Mundial de la Salud) al hacer parte del deshonroso Top 10 de naciones en donde se reportan más casos de actividades fraudulentas relacionadas con medicamentos ante el Instituto de Seguridad Farmacéutica (Committee on Understanding the Global Public Health Implications of Substandard, Falsified, Institute of Medicine; & Board on Global Health, 2013).

Un medicamento vencido es por definición, aquel fármaco que presenta vencida su fecha de expiración, es decir, aquel medicamento que ha superado su vida útil (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2009). La fecha de vencimiento se determina a partir de estudios de estabilidad y representa, en términos generales, el momento límite en que el medicamento conservará sus propiedades, siempre y cuando se haya almacenado correctamente (Debesa García, Fernández Argüelles, & Pérez Peña, 2004).

7.1.2. Caracterización del programa posconsumo de medicamentos vencidos

En Colombia, el consumo aparente de fármacos ha presentado un crecimiento sostenido en los últimos años, a tal punto que el país se ubica dentro de las 21 economías emergentes a nivel mundial que representan mayor potencial de crecimiento en torno al sector farmacéutico (FEDESARROLLO & Cámara de la Industria Farmacéutica de la ANDI, 2015).

Por tanto, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible garantiza a través de los programas posconsumo de residuos, la adecuada disposición y manejo de productos priorizados, como es el caso de los medicamentos vencidos. El programa posconsumo de medicamentos vencidos comprende el retorno de envases, cajas, empaques, frascos, blísteres, ampollas, medicamentos cuya fecha de vencimiento expiró, y medicamentos parcialmente consumidos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

Desde el año 2010 y hasta el año 2015, el liderazgo de dicho programa recaía sobre la Cámara Farmacéutica de la Asociación Nacional de Empresarios (ANDI). Posteriormente, se conformó una entidad sin ánimo de lucro por iniciativa de la industria farmacéutica, denominada Corporación Punto Azul, la cual asumió la coordinación de la red de logística inversa de medicamentos vencidos más grande del país, con presencia en 29 departamentos en el territorio nacional a través de la instalación de 1710 contenedores, 295 asociados y con cifras de recolección acumulada alrededor de las 500 toneladas de medicamentos posconsumo desde su creación (Figura 9), de las cuales 140 toneladas fueron recolectadas solo en el 2017 (Corporación Punto Azul, 2017a; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). A través de este programa, más del 97% de los laboratorios nacionales y multinacionales dan cumplimiento a lo dispuesto en la Resolución 371 de 2009 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2009).

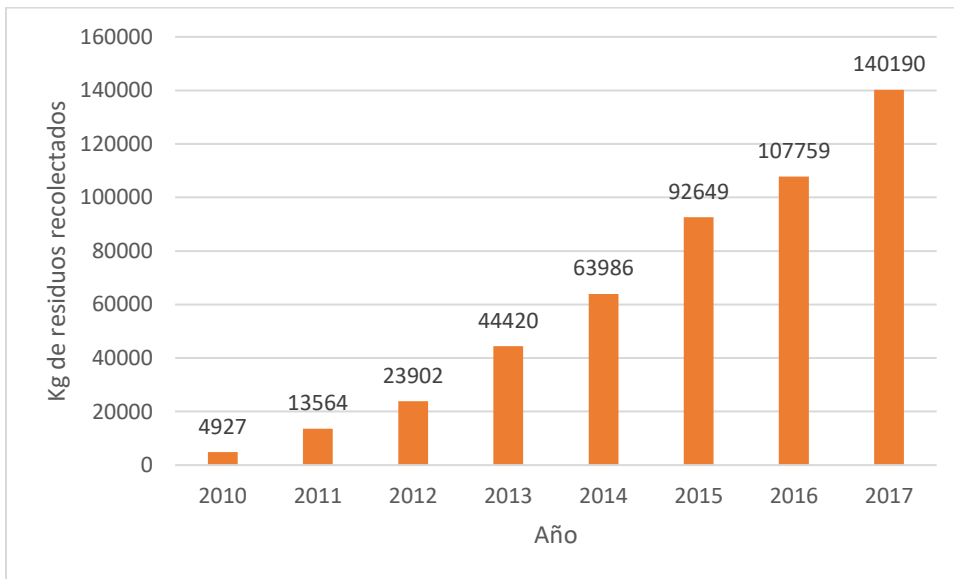


Figura 9. Cantidad de residuos recolectados a través del Programa nacional posconsumo de medicamentos vencidos (kg). Fuente: Corporación Punto Azul (2017).

El Programa Posconsumo Nacional de Medicamentos Vencidos prioriza los flujos de retorno desde el cliente final, es decir la gestión de residuos domésticos (*Household Waste Management*,

por sus siglas en inglés) y no, los flujos derivados de los canales institucionales (hospitales y entidades prestadoras de salud - EPS).

Para efectos de la normativa colombiana, también se considera dentro del Programa Posconsumo de Medicamentos Vencidos, aquellos medicamentos parcialmente consumidos que el cliente deja de utilizar y desea disponer como residuo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2009). En este punto es importante destacar que, en Colombia, a diferencia de otros países como Estados Unidos, los medicamentos parcialmente utilizados cuya fecha de vencimiento no ha expirado, no se destinan a comercialización o a la donación a países subdesarrollados. En su lugar, el Programa comprende la recolección, transporte, clasificación y disposición por parte del operador logístico (en la mayor parte del país) de los residuos depositados en los contenedores.

A continuación, se describen los eslabones que integran la cadena de suministro de carácter inverso en el marco del plan nacional posconsumo de medicamentos vencidos.

- **Puntos Azules:**

Es el nombre dado a los contenedores dispuestos por la Corporación Punto Azul en donde el consumidor final retorna los medicamentos vencidos o en desuso (Figura 10). También es equivalente al rol que desempeñan los laboratorios y farmacias asociadas. La localización de un punto azul en un establecimiento en particular obedece a la afluencia de personas en torno a este. Suelen ubicarse en cercanías o al interior de supermercados, hospitales, farmacias y grandes superficies.

De acuerdo con la Resolución 371 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2009), es deber de los consumidores retornar los fármacos vencidos por medio del mecanismo de devolución diseñado por el fabricante.

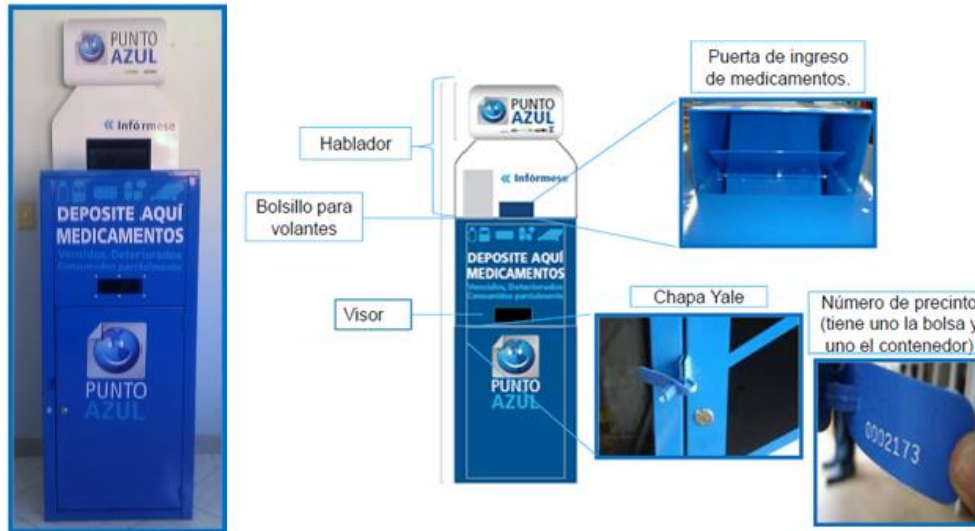


Figura 10. Contenedor punto azul y sus partes. Fuente: Corporación Punto Azul (2014)

En el caso de la red logística estudiada, la recolección de medicamentos vencidos es ejecutada a través de un gestor colectivo. Por tanto, los consumidores finales deben seguir las instrucciones brindadas por la coordinación de la red, a cargo de la Corporación Punto Azul, sobre la forma en la que deben retornarse los medicamentos, y las consideraciones respecto a los artículos excluidos del programa.

De esta forma, no deben retornarse residuos biológicos como jeringas, agujas, gasas, algodones, ni tampoco deben usarse los contenedores para descartar residuos domésticos ordinarios.

Dentro de los residuos que está permitido incluir en la disposición se encuentran:

- ✓ Medicamentos parcialmente consumidos.
- ✓ Residuos como blísteres.
- ✓ Envases plásticos y de vidrio de medicamentos usados.
- ✓ Medicamentos vencidos, deteriorados o expuestos a condiciones inapropiadas de almacenamiento.

✓ Empaques de medicamentos, los cuales por seguridad deben ser destruidos previamente.

La clasificación de los productos no se realiza en la fuente, por tanto, el cliente final no requiere ocuparse de esta labor. En tanto que, la manipulación de los contenedores es efectuada por el operador logístico asignado y, su contenido es transportado hasta centros de acopio.

La recolección de medicamentos se realiza con una periodicidad variable que depende de la capacidad del gestor RESPEL¹ y la cantidad de medicamentos retornados. El gestor abre el contenedor, retira y pesa la bolsa, completa el formulario de registro y ubica una nueva bolsa antes de cerrar el contenedor.

- **Centros de recolección e inspección**

En el centro de recolección e inspección se llevan a cabo una serie de actividades, previo a la disposición adecuada de los residuos. Inicialmente, se realiza la recepción y pesaje de los medicamentos. En el pesaje se compara el peso declarado en el contenedor al momento de realizar la recolección con el realmente recibido, para garantizar la trazabilidad del proceso. Posteriormente, los medicamentos son trasladados en bolsas hasta un área de acopio temporal en donde esperan su clasificación.

En ocasiones, las prácticas de la comunidad ocasionan que en los contenedores se depositen elementos excluidos del programa, como residuos biológicos u ordinarios, por lo que se requiere clasificar los residuos recolectados previo a su disposición final. De esta forma, en la labor de clasificación, los operarios dividen el flujo de retorno en dos: residuos posconsumo de medicamentos y otros residuos o impropios. Ambos flujos deben ser dispuestos de manera apropiada utilizando para ello métodos de incineración o co-procesamiento. Una correcta

¹ Gestor RESPEL: Gestor de residuos peligrosos

clasificación permite establecer las medidas de seguridad y actividades de tratamiento pertinentes para el nivel de riesgo que representa el tipo de residuo identificado.

La Figura 11 ilustra el porcentaje de residuos impropios depositados en los puntos azules durante el período enero/2013-septiembre/2014.

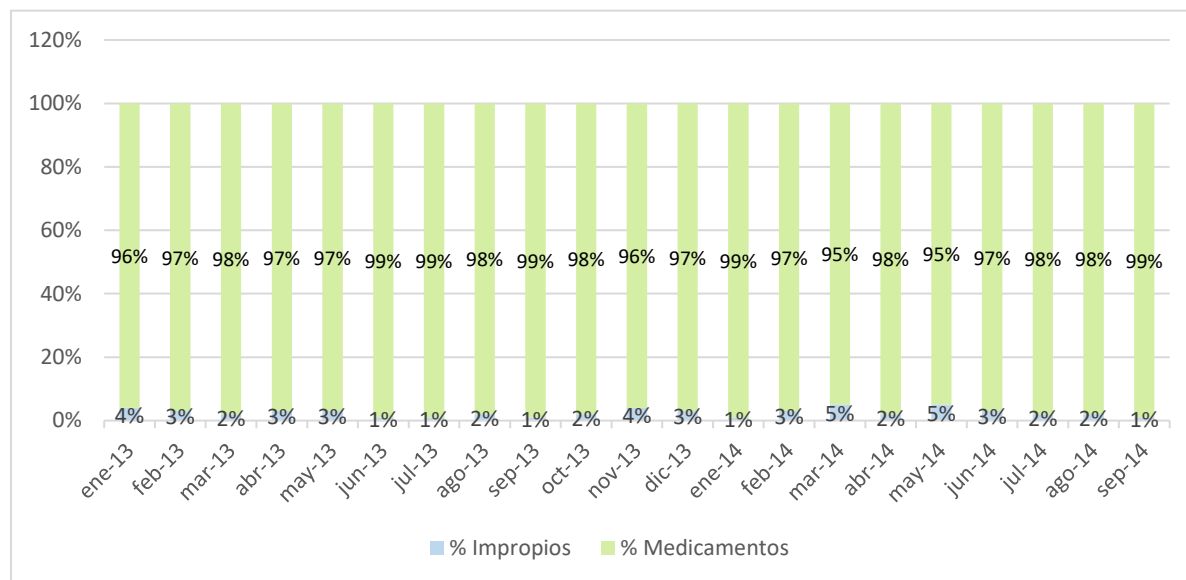


Figura 11. Distribución porcentual de medicamentos recolectados vs. residuos impropios. Fuente: Corporación Punto Azul (2014).

En el caso particular de la Zona Centro del país (Cundinamarca, Boyacá, Meta, Huila y Tolima), estas actividades son asumidas directamente por la organización a través del Centro de Clasificación y Transferencia de Medicamentos Vencidos, el primero en Suramérica exclusivo para medicamentos posconsumo, ubicado en el municipio de Cota, Cundinamarca; en donde se realizan labores de clasificación, trituración y compactación. Una vez clasificados, los residuos son almacenados temporalmente hasta un máximo de 20 toneladas, momento en el que un gestor de residuos peligrosos se encarga de realizar la recolección, transporte y disposición en hornos de incineración.

En el resto del país, la Corporación Punto Azul cuenta con el apoyo de gestores RESPEL a través de procesos de tercerización (Corporación Punto Azul, 2017d), los cuales se hacen cargo de las actividades descritas anteriormente.

- **Centros de disposición**

La última etapa en el proceso de logística inversa comprende la disposición final. En lo que concierne a esta fase, la Corporación Punto Azul inició esfuerzos desde el año 2015 para reducir el porcentaje de residuos destinados a la incineración, a través de alternativas de aprovechamiento energético, enfocando así las actividades de tratamiento en: incineración y co-procesamiento, esta última consiste en el uso de materiales de desecho para la recuperación de energía y, por tanto, la reducción del consumo de combustibles y recursos (Corporación Punto Azul, 2017d).

La tasa de reciclaje de residuos posconsumo de medicamentos es muy baja. De acuerdo con el último Informe de Sostenibilidad (Corporación Punto Azul, 2017c) apenas el 12% de los residuos fueron aprovechados a través de actividades de co-procesamiento. Lo que representa un crecimiento del 10% respecto al año anterior, en donde la tasa de aprovechamiento fue del 2%.

La Corporación manifiesta en sus informes de sostenibilidad que se encuentra trabajando arduamente para implementar otro tipo de actividad distinta al co-procesamiento para el uso de los residuos. Lo anterior, considerando que la totalidad de lo aprovechado en el 2017 se hizo bajo esta alternativa.

Los resultados de los esfuerzos realizados por la Corporación se ilustran en la Figura 12. En tanto que la Figura 13 muestra el flujo completo de la cadena de valor de la Corporación Punto Azul.

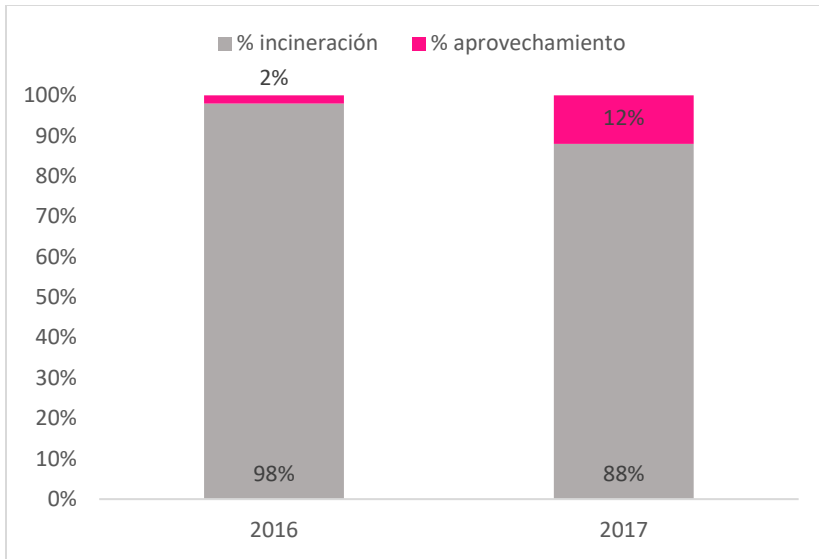


Figura 12. Tipo de tratamiento al que fueron sometidos los residuos posconsumo de medicamentos. Fuente: Elaboración propia a partir de Corporación Punto Azul (2017).



Figura 13. Cadena de Valor del Programa Posconsumo Nacional de Medicamentos Vencidos. Fuente: Corporación Punto Azul (n.d.).

Dentro del portafolio de servicios ofertados por la Corporación Punto Azul se encuentra además, la gestión de devoluciones de medicamentos para destrucción y la gestión de medicamentos de control especial, en la que, de acuerdo con el Informe de sostenibilidad 2017 (Corporación Punto Azul, 2017c), se han recolectado alrededor de 54 toneladas de medicamentos de control especial, de los cuales el 68% terminaron siendo incinerados, en tanto el 32% restante

se destinó al reciclaje bajo autorización de la resolución N° 728 del Fondo Nacional de Estupefacientes (República de Colombia, 2016).

7.1.3. Programa nacional posconsumo de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla.

La dinámica de la industria farmacéutica en la ciudad ha presentado un crecimiento constante en los últimos años, lo que se refleja en la consolidación de Barranquilla como un distrito industrial, donde el comercio al por mayor de productos farmacéuticos se destaca por encima de otros productos. De hecho, datos de Bancoldex, reflejan que los medicamentos ocupan el segundo lugar entre los principales productos de exportación, con cifras que superan los 80 millones de dólares (Alcaldía de Barranquilla, 2018).

Según datos de la Cámara de Comercio de Barranquilla y Probarranquilla, la presencia de empresas en el sector ha aumentado en un 13%. Lo anterior, posee un impacto en las ventas del sector, que ascendieron en un 20% en el año 2010, respecto al 2006, representando alrededor de 1725 millones de pesos (Probarranquilla, 2013).

A este incremento en la venta de productos farmacéuticos, corresponde un incremento en la generación de residuos derivados de la compra, como es el caso de los medicamentos vencidos o parcialmente consumidos. Así lo demuestra un estudio de generación de residuos peligrosos realizado por Castillo Ramírez, Martínez Burgos, & Parody Muñoz (2018), cuya ventana de observación comprendió el período 2009-2014. Los resultados de este trabajo evidencian que la corriente de residuos Y3, que corresponde a medicamentos vencidos, presenta un comportamiento variable en el horizonte de tiempo estudiado, siendo el 2010 el año de mayor generación de este tipo de residuos, presentando además incrementos paulatinos durante los dos últimos períodos de observación.

La Figura 14 representa el comportamiento de la generación de residuos, en el caso particular de medicamentos vencidos (categoría Y3) en estado sólido y semisólido en la ciudad de Barranquilla.

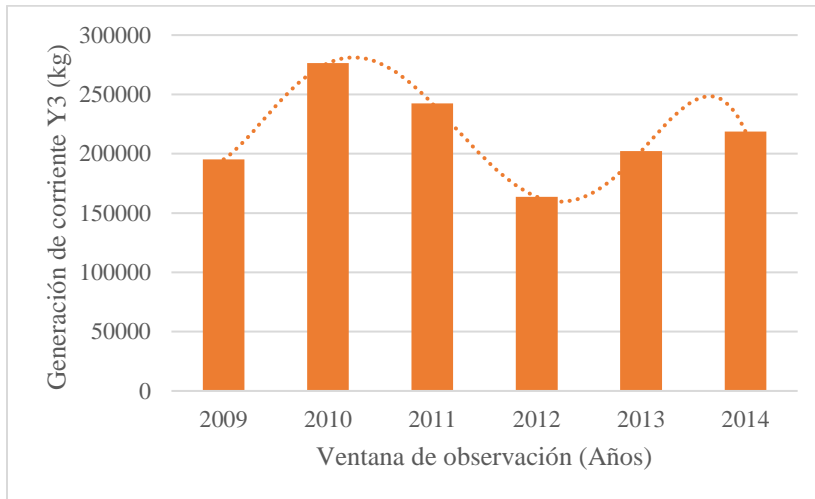


Figura 14. Generación de residuos Y3 (Medicamentos vencidos) en el período 2009-2014. Fuente: Elaboración Propia a partir de Castillo Ramírez, Martínez Burgos, & Parody Muñoz (2018).

La presencia del Programa Posconsumo de Medicamentos Vencidos en la ciudad inició en el año 2012, con la instalación de 15 contenedores en la primera fase del proyecto, bajo la coordinación de la Secretaría Distrital de Salud y la operación logística de la empresa TECNIAMSA, bajo la supervisión del DAMAB (Departamento Administrativo de Medio Ambiente de Barranquilla) y la CRA (Corporación Regional Autónoma) (Secretaría Distrital de Salud, 2012).

Actualmente, Barranquilla cuenta con 35 contenedores distribuidos en 31 ubicaciones para la operacionalización del programa posconsumo de medicamentos vencidos, llamados comúnmente como “puntos azules”, los cuales pueden ser utilizados por 1.206.946 habitantes, representando así el 66% de los contenedores ubicados en el departamento del Atlántico (Corporación Punto Azul, 2017b). La operación logística del sistema recae hoy en día sobre la empresa de Servicios

Ambientales Especiales (SAE). En la Tabla 3, se muestra la localización de dichos puntos en la ciudad de Barranquilla.

Tabla 3.

Ubicación de los contenedores para disposición de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla.

N°	ESTABLECIMIENTO	DIRECCIÓN
1	DROGUERÍA ÉXITO MURILLO	Calle 45 No. 26 – 129
2	AUDIFARMA PLAZA SEVILLA	Carrera 43 No. 69 F - 57 Centro Comercial Plaza Sevilla
3	FARMACIA DROGUILANDIA	Carrera 26 B No. 74 C – 172
4	ÉXITO BUENAVISTA BARRANQUILLA	Carrera 52 Calle 98 Esquina, Centro Comercial Buenavista I
5	AUDIFARMA PRADO	Carrera 53 No. 75 – 108. Local 5 Centro Comercial Laureles
6	AUDIFARMA ALTOS DEL PRADO	Carrera 49 C No. 80 – 209
7	FARMACIA TORRES LTDA	Carrera 43 Calle 61 Esquina P 1 Y 2
8	LA REBAJA NO. 3	Calle 84 No. 51 B – 54
9	ÉXITO 51B BARRANQUILLA	Carrera 51 B No. 87 – 50
10	HELPHARMA ALTOS DE PRADO	Calle 84 No. 53 – 46. Altos Del Prado 2, Piso 1
11	DEMPOS BOSTON	Carrera 45 No. 53 - 47 Local 2
12	DROGUERÍA PORTO AZUL COLSUBSIDIO	Carrera 28 Corredor Universitario No. 1 B - 31 - 5 Local 201
13	DROGUERÍA PALERMO	Carrera 21 No. 86 – 144
14	COLSUBSIDIO PRADO NORTE	Calle 76 No. 52 - 65 Local 2
15	DEMPOS MURILLO	Calle 44 B No. 10 C – 07
16	PALERMO SOCIEDAD PORTUARIA S.A.	Kilómetro 3 Vía Barranquilla Ciénaga
17	DROGUERÍA Y MISCELANEA 7 DE ABRIL	Calle 48 No. 3 Sur – 04
18	DROGUERÍA LA MANO DE DIOS	Calle 41 No. 7 C – 07
19	DROGUERÍA COUNTRY SUR	Calle 91 No. 2 B – 05
20	COLSUBSIDIO CC BAHÍA	Carrera 51 B No. 82 - 254 C.C. Bahía
21	LABORATORIO SKYPHARMA	Carrera 47 No 81-47
22	LABORATORIOS INCOBRA	Calle 46 No 46-157
23	DOGRERIA COLSUBSIDIO ALTO PRADO	Calle 72 No 50-28
24	MEDICARTE BARRANQUILLA	Calle 74 No 56-36 Oficina 303 Centro Empresarial Inverfin
25	CLINICA GENERAL DEL NORTE (4 CONT)	Carrera 48 No 70-38
26	MAKRO BARRANQUILLA	Carrera 51b Avenida Circunvalar
27	I.P.S ESPECIALIZADA AUDIFARMA	Carrera 50 No. 80 -81
28	LABORATORIOS PROCAPS (2 CONT)	Calle 80 No. 78b – 201
29	CLINICA LA ASUNCIÓN	Calle 70 B No 41 – 93
30	DROGUERIA HEEL	Carrera 49 C No 76 – 116
31	ÉXITO SAN BLAS	Carrera 41 No 36 - 81 Esquina

Nota: En las ubicaciones 25 y 28, correspondientes a la Clínica General del Norte y Laboratorios Procaps, se encuentran instalados 4 y 2 contenedores, respectivamente, para un total de 35 contenedores en la ciudad. Fuente: Corporación Punto Azul (2017).

En el departamento del Atlántico se han recolectado 1344 kg de residuos posconsumo sólo en el año 2017. La Figura 15 ilustra la contribución porcentual de los departamentos que integran la Zona Norte al cumplimiento de las metas de recolección, que en el año 2017 logró una suma de 7332 kg de residuos.

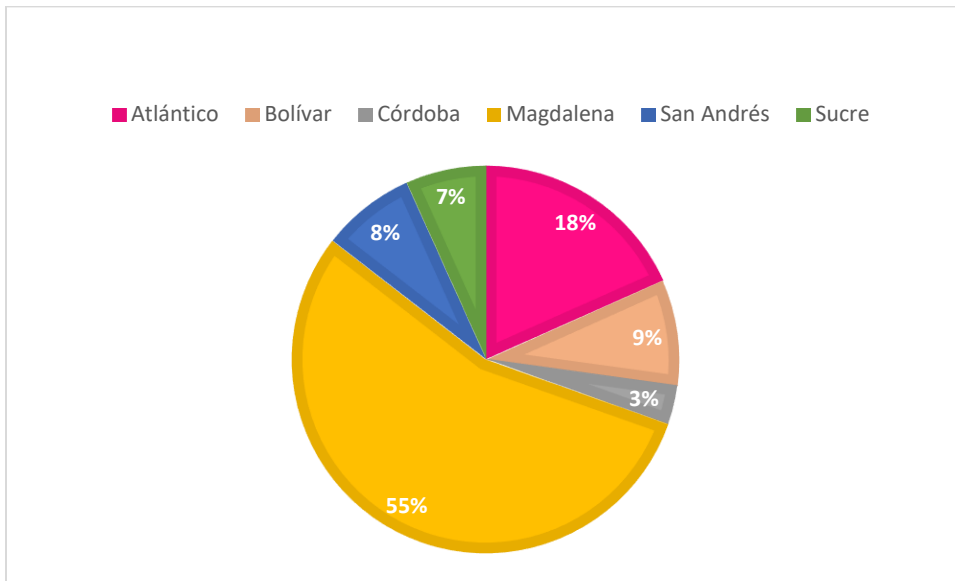


Figura 15. Porcentaje de contribución por departamento al total de recolección agregada en la Zona Norte durante el año 2017. Fuente: Elaboración propia a partir de Corporación Punto Azul (2017b)

En la Figura 16 se ilustra el funcionamiento de la cadena de suministro. Como puede observarse no se admiten flujos de mercancía entre instalaciones del mismo eslabón. Así mismo, todos los flujos representados son de tipo inverso por las consideraciones expuestas previamente.

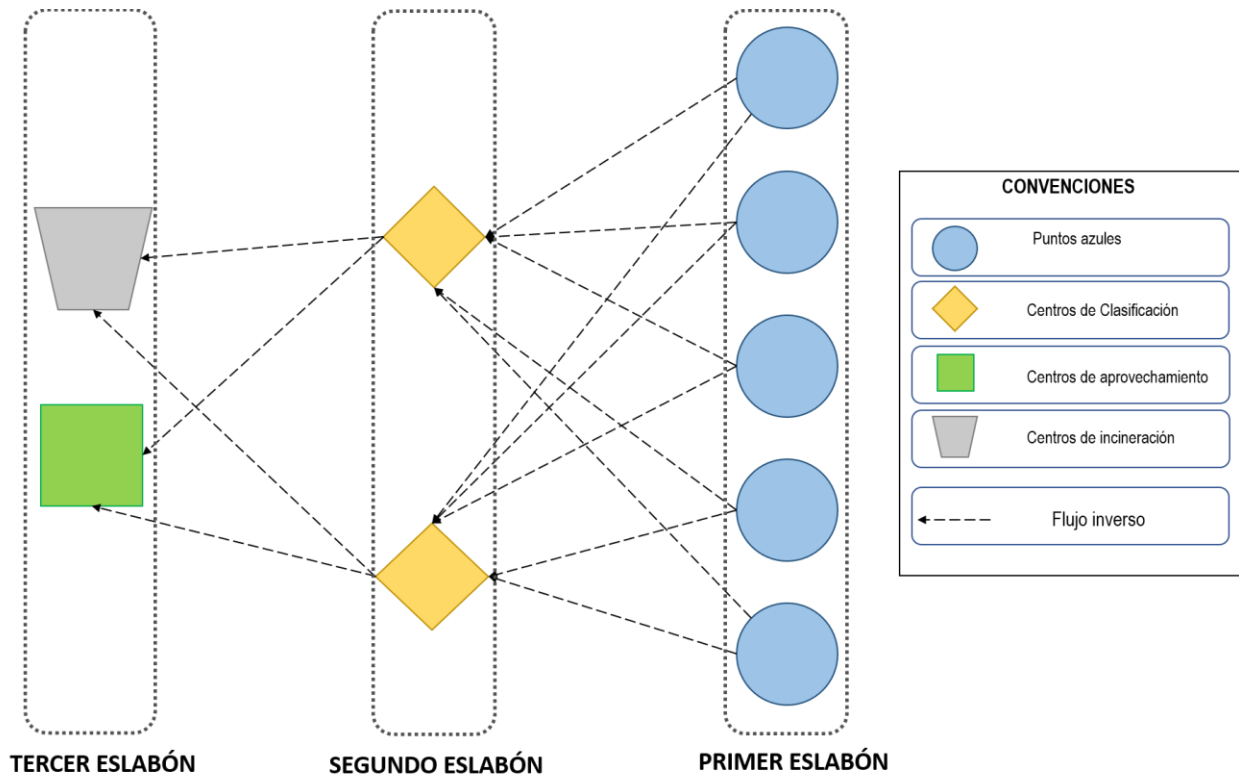


Figura 16. Configuración de la cadena de suministro inversa seleccionada.
Fuente: Elaboración Propia.

7.2. Modelo matemático para configuración de cadena de suministro inversa

En la literatura, se han propuesto una serie de modelos matemáticos como soporte a la toma de decisiones a nivel estratégico para la configuración de cadenas de suministro de flujo inverso. La configuración de estas redes consiste en la ubicación, y la definición del flujo entre las instalaciones que la conforman.

El modelo presentado a continuación es un modelo de programación lineal entera mixta que toma como base el modelo de Yu & Solvang (2016), y establece como objetivos: (1) la reducción de costos en función de: costos de apertura de instalaciones, costos de procesamiento y transporte, así como la minimización de emisiones de dióxido de carbono (2), derivadas de las actividades de transporte e incineración para una cadena de suministro de tres eslabones (puntos de recolección, inspección, aprovechamiento energético y disposición).

En la red propuesta, cada cliente retorna a un punto azul uno o varios medicamentos vencidos o parcialmente consumidos en desuso. Luego, estos son enviados a un centro de recolección e inspección, en donde se evalúan sus características, y se decide si ser transportados a un centro de aprovechamiento o a un centro de disposición.

Las decisiones asociadas a la modelación comprenden la apertura y ubicación de los centros de inspección, así como la selección del gestor RESPEL que se hará cargo de la incineración de residuos, y el flujo de materiales entre los nodos del sistema. Las variables de decisión enteras del problema corresponden a las decisiones de apertura de instalaciones. En tanto que, se consideran como continuas las variables asociadas al flujo de productos en la red.

Por otro lado, existe una relación de conflicto entre la eficiencia económica y la sostenibilidad ambiental, en la medida que, al tratar de reducir el impacto ambiental derivado de los flujos de mercancía, se suele afectar el funcionamiento económico de la red. Por lo anterior, se selecciona la modelación multiobjetivo como el enfoque de modelación idóneo para hacer frente a los objetivos de reducir el impacto ambiental de la operación de una red de logística inversa -medido en función de las emisiones de CO_2 - y minimizar los costos incurridos.

7.2.1. Modelo matemático multiobjetivo para la configuración de una cadena de suministro de flujo inverso.

Supuestos del problema:

- No está permitido el flujo entre instalaciones de un mismo eslabón.
- En la modelación se considera un único costo fijo asociado a la apertura de instalaciones de inspección y clasificación.

- Las ubicaciones potenciales para los centros de inspección y clasificación fueron seleccionadas de manera aleatoria del conjunto de inmuebles en venta en los dos corredores industriales más importantes de la ciudad: Vía 40 y Avenida Circunvalar.
- Las ubicaciones potenciales de centros de incineración corresponden a la ubicación de los tres gestores de residuos peligrosos autorizados por la CRA para el tratamiento de residuos posconsumo de medicamentos. Es decir, que con la solución del modelo se pretende seleccionar uno de los gestores RESPEL para la operación de la red.
- No se consideran costos fijos asociados a la apertura (o en este caso, selección) de instalaciones de incineración. Lo anterior, teniendo en cuenta que estos centros se encuentran en operación (no se requiere abrir un centro nuevo). Sin embargo, se considera un costo fijo de procesamiento que es igual para todos los candidatos. Lo anterior se debe a que las tarifas manejadas suelen ser similares entre los gestores RESPEL.
- La ubicación de la planta de aprovechamiento energético es conocida, y se asume como la localización de una de las empresas cementeras que lidera las actividades de co-procesamiento en la ciudad.
- Los costos de transporte entre ubicaciones son conocidos.
- La capacidad del centro de incineración se asume ilimitada, lo anterior considerando que los hornos de incineración usados cuentan con capacidad de procesamiento aproximada de 1000 kg/h. Valor que en comparación con el comportamiento histórico de residuos depositados en puntos azules en la ciudad es considerablemente superior. Por tal razón, la capacidad de recepción de los centros de incineración no será incluida como restricción.
- El número máximo de centros de inspección y clasificación a abrir, así como el número máximo de centros de incineración a utilizar, se definió como un parámetro de entrada del

modelo que corresponde a dos ubicaciones de inspección y clasificación, y a un único centro de incineración.

- El porcentaje de residuos impropios depositados en los puntos azules de la red es asumido como determinístico y corresponde al promedio de los datos históricos disponibles.
- La fracción mínima y máxima de productos a aprovechar a través de co-procesamiento se define a partir de los niveles actuales de aprovechamiento (límite inferior) y la proyección del comportamiento histórico (límite superior). Ambos porcentajes se asumen como determinísticos, pero el modelo decide la cantidad de productos a enviar considerando la optimización de los costos asociados.

Para la formulación del modelo matemático, se describe a continuación la notación utilizada.

Conjuntos:

Notación	Descripción
c	Puntos azules $c \in C$
i	Centros de inspección y clasificación, $i \in I$
r	Centros de aprovechamiento energético, $r \in R$
d	Centro de disposición/incineración, $d \in D$

Parámetros:

Notación	Descripción
P_c	Cantidad de productos retornados por los clientes en el punto azul c (kg).
F_i	Costo fijo de apertura de centro de inspección y clasificación i (\$).
F_d	Costo fijo de emplear una instalación de incineración d (\$).
V_i	Costo variable de procesar un kg en centros de inspección y clasificación i (\$/kg).
D_{ci}	Distancia del punto azul c al centro de inspección y clasificación i (km).
D_{ir}	Distancia del centro de inspección y clasificación i al centro de aprovechamiento energético r (km).
D_{id}	Distancia del centro de inspección y clasificación i a centros de disposición/incineración d (km).
CT	Costo de transporte por kg y km recorrido (\$/kg-km).
f_{pi}	Fracción de residuos impropios depositados en el punto azul c .
f_{pr}	Fracción máxima de productos con potencial de aprovechamiento.

Notación	Descripción
fmr	Fracción mínima de productos con potencial de aprovechamiento.
<i>Consumo</i>	Consumo promedio de combustible derivado del transporte en la red (gal/km).
FE	Factor de emisión de dióxido de carbono del diésel (kg CO ₂ /gal).
CCR	Fracción de contenido de carbono en los residuos incinerados.
FCF	Fracción de carbono fósil en los residuos.
EF	Eficiencia de la combustión en incineradores.
<i>Factor</i>	Factor de conversión de C en CO ₂ .
M	Capacidad de la ruta entre nodos de la red (kg).

Variables:

Notación	Descripción
W_i	Variable binaria para determinar si se abre o no un centro de inspección y clasificación i
W_d	Variable binaria para determinar si se utiliza o no un centro de incineración d
X_{ci}	Cantidad de productos transferidos del punto azul c al centro de inspección y clasificación i
Y_{ir}	Cantidad de productos con potencial de recuperación a transportar del centro de inspección y clasificación i al centro de aprovechamiento energético r .
Z_{id}	Cantidad de productos transportados del centro de inspección y clasificación i a los centros de disposición d .

Funciones objetivo:

El conjunto de funciones objetivo está dado por la ecuación 1.

$$Z_{min} (F_1, F_2) \quad (1)$$

La primera función objetivo (ecuación 2) corresponde a la minimización del costo de operación de la cadena (F_1), el cual incluye los costos fijos (F_{1a}), los costos variables de procesamiento (F_{1b}) y los costos de transporte (F_{1c}).

$$\min F_1 = F_{1a} + F_{1b} + F_{1c} \quad (2)$$

En donde,

F_{1a} : Costo fijo de apertura y uso de instalaciones.

Esta primera parte de la función de costos (ecuación 3) se encuentra determinada por la suma producto de los costos fijos de apertura del centro de inspección i y el costo fijo de utilizar el gestor RESPEL d , multiplicados por las variables de decisión que definen la selección de cada una de estas instalaciones.

$$F_{1a} = \sum_{i=1}^n F_i W_i + \sum_{d=1}^n F_d W_d \quad (3)$$

F_{1b} : Costos variables de procesamiento.

Los costos variables están dados por la suma producto del costo unitario de procesamiento y el número de unidades manejadas en la red (ecuación 4). La explicación en detalle del cálculo de los costos variables a partir del componente asignado a los centros de inspección es indicada en la sección 7.3.

$$F_{1b} = \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^n V_i X_{ci} \quad (4)$$

F_{1c} : Costos de transporte.

Los costos de transporte incurridos en la operación de la red son el resultado de la suma producto del costo de transporte por kg y km recorrido (CT), la cantidad a transportar (en kg) y la distancia recorrida en km entre los nodos de la cadena (ecuación 5).

$$F_{1c} = \sum_{c=1}^n \sum_{i=1}^n X_{ci} * Distancia_{ci} * CT + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n Y_{ir} * Distancia_{ir} * CT + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Z_{id} * Distancia_{id} * CT \quad (5)$$

Así, la primera función objetivo está dada por la ecuación (6).

$$\begin{aligned} \min F_1 = & \sum_{i=1}^n F_i W_i + \sum_{d=1}^n F_d W_d + \sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^n V_i X_{ci} + \sum_{c=1}^n \sum_{i=1}^n X_{ci} * Distancia_{ci} * CT \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n Y_{ir} * Distancia_{ir} * CT + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Z_{id} * Distancia_{id} * CT \quad (6) \end{aligned}$$

La segunda función objetivo (ecuación 7) se refiere a la minimización de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) derivadas de las operaciones de transporte (F_{2a}) y disposición final a través de incineración (F_{2b}). En la sección 7.3. se presenta una descripción detallada del sustento de estas ecuaciones para describir las emisiones totales de dióxido de carbono.

$$\min F_2 = F_{2a} + F_{2b} \quad (7)$$

F_{2a} : Emisiones de CO₂ derivadas de las operaciones de transporte.

Este componente se encuentra determinado por la ecuación (8), en donde la cantidad de emisiones generadas depende de la distancia recorrida entre los nodos, el consumo de combustible y un factor de emisión para el combustible utilizado.

$$\begin{aligned} F_{2a} = & \sum_{c=1}^n \sum_{i=1}^n Distancia_{ci} * Consumo * FE + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n Distancia_{ir} * Consumo * FE \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Distancia_{id} * Consumo * FE \quad (8) \end{aligned}$$

F_{2b} : Emisiones de CO₂ derivadas de la incineración de residuos.

Este componente de la función objetivo F_2 , depende de la cantidad de productos enviados a incineración (Z_{id}), y parámetros asociados al contenido de carbono (CCR), la fracción de

carbóno fósil (FCF), eficiencia de combustión (EF) y el factor de emisión según el tipo de residuo incinerado (Factor). La ecuación (9) describe las emisiones generadas a partir de la incineración.

$$F_{2b} = \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Z_{id} * CCR * FCF * EF * Factor \quad (9)$$

Finalmente, la función objetivo F_2 , puede expresarse como sigue (ecuación 10).

$$\begin{aligned} \min F_2 = & \sum_{c=1}^n \sum_{i=1}^n Distancia_{ci} * Consumo * FE + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n Distancia_{ir} * Consumo * FE \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Distancia_{id} * Consumo * FE + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Z_{id} * CCR * FCF * EF \\ & * Factor \quad (10) \end{aligned}$$

Restricciones:

- **Balance de flujo**

La primera restricción de este conjunto de restricciones (ecuación 11) corresponde al balance de flujo en los puntos azules, indicando que la cantidad total de productos enviados desde el punto azul c a los centros de inspección y clasificación i , debe corresponder a la cantidad retornada por los clientes en dicho punto azul, garantizando así que todos los productos retornados sean enviados a los centros de inspección.

$$\sum_{i=1}^n X_{ci} = P_c; \quad \forall c \in C \quad (11)$$

La ecuación (12), garantiza el balance de flujo en el segundo eslabón: centros de inspección, en donde el flujo de salida de estas instalaciones independientemente del tratamiento (co-procesamiento / incineración) debe ser igual al flujo de entrada.

$$\sum_{c=1}^n X_{ci} = \sum_{r=1}^n Y_{ir} + \sum_{d=1}^n Z_{id}; \forall i \in I \quad (12)$$

Ahora bien, el flujo de salida de un centro de inspección i con dirección a un centro de aprovechamiento r , está determinado por la cota inferior y superior de la meta de aprovechamiento definida por la red. Para ilustrar lo anterior, se proponen las restricciones (13) y (14), en donde se define el mínimo y máximo nivel que puede tomar la variable que representa las cantidades a enviar a un centro de aprovechamiento energético desde un centro de inspección (Y_{ir}), utilizando para ello la fracción mínima y máxima de aprovechamiento deseada (fmr, fpr) multiplicada por la cantidad recibida en dicho centro de inspección.

Además, toda vez que en el flujo de entrada de un centro de inspección se procesan residuos posconsumo de medicamentos, así como residuos impropios, las cantidades a enviar al centro de aprovechamiento energético deben considerar esta proporción (fpi). De esta forma, las restricciones consideran los residuos posconsumo de medicamentos, despreciando la fracción impropia, y garantizan el cumplimiento de la meta de reciclaje.

$$\sum_{r=1}^n Y_{ir} \geq fmr \left(\sum_{c=1}^n X_{ci} * (1 - fpi) \right); \forall i \in I \quad (13)$$

$$\sum_{r=1}^n Y_{ir} \leq fpr \left(\sum_{c=1}^n X_{ci} * (1 - fpi) \right); \forall i \in I \quad (14)$$

Tal como se indicó en la sección anterior, todos los residuos sean impropios o no, deben ser dispuestos apropiadamente. Para efectos de la modelación se asume que todos los residuos impropios serán incinerados, lo anterior a partir de investigaciones en el área, en donde se evidencia que la mayor parte de los residuos impropios en redes de logística inversa de medicamentos corresponden a residuos biológicos (Cobos & Cisneros, 2017). Por tanto, en las

ecuaciones (13) y (14), que determinan las cantidades a enviar con fines de aprovechamiento, se desprecian los residuos impropios.

Por otro lado, en el caso de la cantidad a enviar a los centros de incineración, la ecuación (12) garantiza el balance entre el flujo de entrada a estas instalaciones y los residuos pendientes de incineración. Por consiguiente, una nueva restricción que describa esta situación solo sería redundante y añadiría complejidad innecesaria a la modelación.

- **Restricciones de capacidad**

Se formulan las siguientes restricciones para forzar a las variables de decisión que determinan el flujo entre nodos de la red a no exceder la capacidad del vehículo empleado en el transporte. Las ecuaciones (15), (16) y (17) restringen las cantidades a enviar de los puntos azules a centros de inspección, y de los centros de inspección al centro de aprovechamiento energético y centro de incineración, respectivamente. También, garantizan que el transporte de residuos entre nodos de la red no se efectúe si el centro de inspección potencial no es seleccionado.

$$X_{ci} \leq M * W_i; \forall c \in C, i \in I \quad (15)$$

$$Y_{ir} \leq M * W_i; \forall i \in I, r \in R \quad (16)$$

$$Z_{id} \leq M * W_i; \forall i \in I, d \in D \quad (17)$$

Además de la restricción de capacidad de la flota utilizada, no se incluyen restricciones de capacidad en los centros de inspección o incineración, debido a que la capacidad de estas instalaciones es muy superior en comparación con los niveles de retorno encontrados. Por tanto, estas restricciones solo generarían redundancia y ruido en la formulación.

- **Restricciones de apertura y utilización de instalaciones**

El siguiente conjunto de restricciones busca restringir el número de instalaciones de inspección (ecuación 18) e incineración (ecuación 19) que conformará la red.

$$\sum_{i=1}^n W_i \leq N_{\max} \quad (18)$$

$$\sum_{d=1}^n W_d \leq NM_d \quad (19)$$

El número máximo de instalaciones a abrir o seleccionar fue determinado a partir del histórico de recolección de residuos posconsumo de medicamentos, el cual amerita un máximo de dos instalaciones de clasificación y una de aprovechamiento energético. En la sección 7.3, se proporcionan más detalles de esta selección.

7.3. Consideraciones y parámetros

La red de logística inversa está conformada por 31 puntos azules, 10 ubicaciones potenciales para centros de inspección y clasificación, 3 ubicaciones potenciales para el funcionamiento de centros de incineración y 1 centro de aprovechamiento energético.

A continuación, se describe el procedimiento seguido para la estimación de los parámetros del modelo, en donde se consideraron varios supuestos con el propósito que los valores guardaran racionalidad frente al caso de aplicación real en el sector posconsumo de medicamentos.

- **Cantidad de productos retornados (P_c).**

En general, en los modelos de logística inversa es necesario realizar supuestos frente al comportamiento de la demanda, flujos de retorno y recuperación; principalmente por la incertidumbre característica que rige estos factores. La estimación de la tasa de retorno (o su equivalente, cantidad retornada), en particular, se considera como un aspecto fundamental para la modelación de cadenas de suministro de flujo inverso. Lo anterior, debido a la complejidad de estimarla a partir de datos históricos, y al considerar que su valor depende del contexto de aplicación.

El proceso de recolección de medicamentos, no es ajeno a esta problemática, en la medida que, factores como la escasa colaboración y la ausencia de sincronización de información entre actores de la cadena, incide en la disponibilidad de datos para generar aproximaciones que se ajusten a la realidad (Weraikat et al., 2016). Lo anterior posee implicaciones no solo en la estimación de parámetros como este, sino que también ocasiona que los miembros de la cadena dejen de percibir ventajas en términos de costos, flexibilidad, compromiso, entre otros (Salas Navarro, Aceverdo-Chedid, Mercado-Caruso, & Sana, 2018).

La tasa de retorno se define como un porcentaje de los productos vendidos con potencial de recuperación posterior a su consumo o utilización. En la literatura son pocas las aplicaciones en donde se realiza una estimación de la tasa de retorno de medicamentos considerando incertidumbre. En su lugar, existe un número considerable de investigaciones que adoptan valores determinísticos para este factor, los cuales varían dependiendo del contexto social y geográfico que se estudie. Incluso países ubicados en el mismo continente o con indicadores macroeconómicos muy similares, poseen grandes fluctuaciones en sus tasas de retorno de medicamentos.

Lo anterior, se refleja en estudios como el de Vollmer (2010), donde se documentan tasas de retorno que oscilan entre el 1% y el 80% en el territorio europeo. En Estados Unidos, la tasa de retorno se ha trabajado alrededor del 3 - 4% (Kongar et al., 2015); en tanto en países como India, la tasa agregada de retorno varía entre 1,5 y el 15% de las ventas totales (A. Narayana, A. Elias, & K. Pati, 2014). En términos generales, es posible afirmar que los patrones de comportamiento de la tasa de retorno de medicamentos son influenciados por diferentes factores como: normas, incentivos y cultura.

En Colombia, no existen cifras oficiales que estimen la tasa de retorno de medicamentos. Aún si se contara con ellas, la diversidad cultural entre regiones influiría en la estimación de la tasa de retorno para el caso seleccionado. Ante la ausencia de información y la complejidad de estimar una tasa de retorno para la red, se decide establecer como parámetro en su lugar, las cantidades de productos retornados.

En este orden de ideas, la relación que se presenta entre la generación de residuos de fármacos es directamente proporcional a la venta de medicamentos. Sin embargo, la cantidad retornada de medicamentos vencidos suele ser muy baja en comparación con el promedio de compra de fármacos (Abbas & Farooque, 2013). Lo que se debe a varias causas como, falta de información, ausencia de incentivos que motiven al consumidor a hacer uso de los puntos de recolección, escasa conciencia de la comunidad frente a la promoción de buenas prácticas de disposición, entre otros.

Investigadores como Mollaei & Makui (2013) y Ashfari, Sharifi, ElMekkawy, & Peng (2016), han definido en sus estudios que las cantidades retornadas siguen una distribución normal y uniforme, respectivamente. Sin embargo, en muchas ocasiones no existe información suficiente para ajustar el comportamiento de los productos retornados a una distribución de probabilidad, y se debe conformar con estimar una media y definir un intervalo en el que oscilan estos valores (Wei et al., 2011). Tal es el caso de Lieckens & Vandaele (2010), quienes establecieron en su investigación un límite superior e inferior para las cantidades retornadas en un horizonte de tiempo.

Por otro lado, autores como Cannella, Bruccoleri, & Framinan (2016); Listes (2002); Ramezani et al. (2013) modelan la tasa de retorno o las cantidades de productos retornados usando escenarios o niveles con probabilidades asociadas a cada nivel basados en la experiencia.

Ahora bien, de acuerdo con Kaut & Wallace (2007) al momento de formular modelos matemáticos que consideren incertidumbre, se tienen dos alternativas: 1) emplear distribuciones de probabilidad para describir los parámetros inciertos, lo que usualmente ocurre cuando se estudia un único periodo, o 2) a través de procesos estocásticos en problemas con múltiples periodos.

Para efectos del modelo propuesto, se consideró la incertidumbre asociada a la cantidad de productos retornados a través de la estimación de la distribución de probabilidad que sigue este parámetro. A partir del análisis estadístico de las cifras de recolección promedio anual por contenedor reportadas por parte de la Corporación Punto Azul para los últimos 4 años, se concluye que el comportamiento de esta variable se ajusta a una distribución normal con $\mu = 92,6$ y $\sigma = 2,25$ (Ver Anexo 1).

De esta forma, en la solución del modelo con cantidades retornadas determinísticas se seleccionará aleatoriamente un valor para las cantidades retornadas en cada una de las ubicaciones consideradas en la red. En tanto que, en la solución del modelo con datos estocásticos, se contemplará la discretización de la distribución. El detalle de dicha discretización se presenta en la sección 7.4.

- **Ubicación de instalaciones**

- a. Puntos Azules**

En la ciudad de Barranquilla existen 35 contenedores dispuestos a lo largo del distrito; sin embargo, en la modelación únicamente son consideradas 31 ubicaciones. La diferencia radica en que existen dos lugares en donde se cuenta con más de un contenedor, como es el caso de la Clínica General del Norte (cuatro contenedores) y Laboratorios Procaps (dos contenedores) (Corporación Punto Azul, 2018b). Esta situación es considerada en la estimación de las

cantidades retornadas, en donde en estas dos ubicaciones se asume un mayor número de medicamentos posconsumo proporcional al número de contenedores disponibles.

Las ubicaciones de los puntos azules considerados como primer eslabón de la cadena se encuentran representadas gráficamente en la Figura 17.

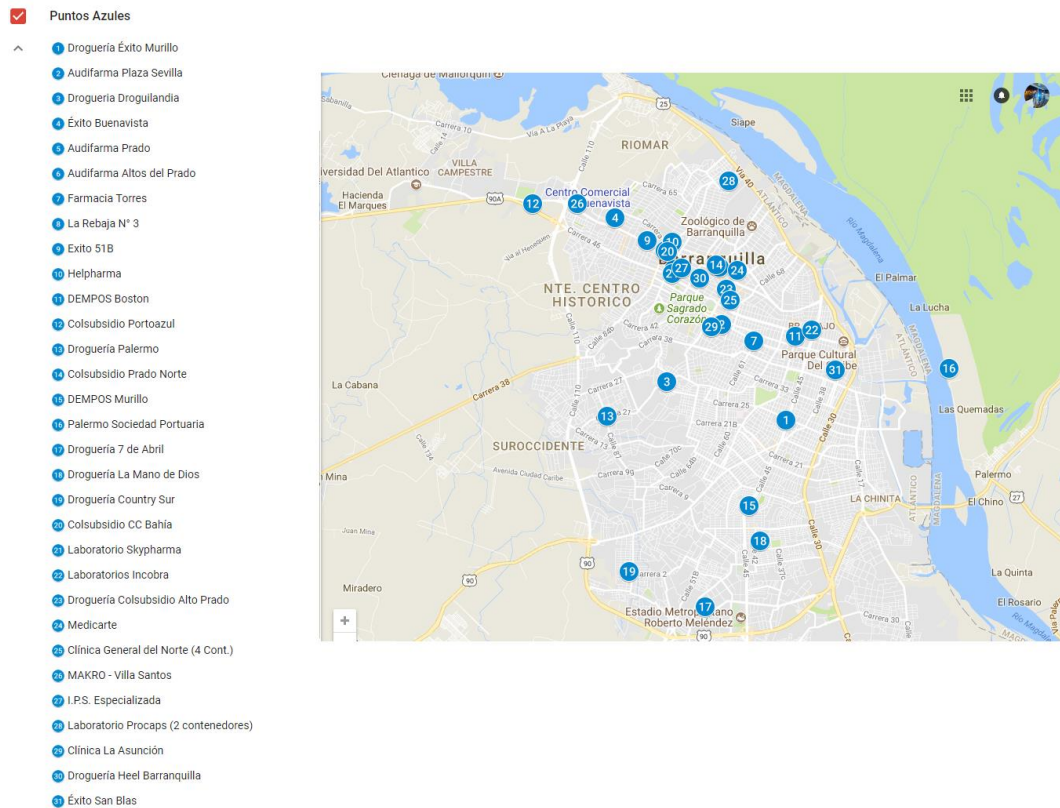


Figura 17. Puntos de recolección de medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla. Fuente: Elaboración propia a partir de Corporación Punto Azul (2018b).

b. Instalaciones para inspección y clasificación

Se consideraron dos situaciones para la determinación de las ubicaciones potenciales de las instalaciones. El primer conjunto de candidatos (9 ubicaciones) se estableció a partir de la oferta de bodegas y depósitos en venta en las dos zonas industriales más importantes de la ciudad (Vía 40 y Avenida Circunvalar). La selección de estas zonas obedece a las restricciones determinadas por la Resolución 371 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2009) que prohíbe la ubicación de centros de acopio en zonas residenciales. Así como también, a partir de las

condiciones planteadas por Obredor-Baldovino, Barcasnegras-Moreno, Mercado-Caruso, Salas-Navarro, & Sana (2018), específicamente en lo concerniente al espacio disponible, costos asociados y disponibilidad de instalaciones, en este caso, en función de la oferta de depósitos en venta en la ciudad.

Así mismo, se consideró una ubicación potencial adicional, determinada a partir del método del centroide (Robusté Antón, 2005). La ubicación obtenida con la implementación del método fue la Calle 71 con Cra. 41B, sin embargo, al ser una zona residencial, se trasladó el punto hallado hacia la zona industrial más cercana que corresponde a la Vía 40. La nueva ubicación corresponde a las siguientes coordenadas: 10.99041, -74.77929 (Por aproximación, Vía 40 con Cra. 50C). Las 10 instalaciones potenciales son ilustradas en la Figura 18.

c. Instalación destinada al aprovechamiento energético.

La ubicación seleccionada como planta de aprovechamiento energético corresponde a la localización de una de las empresas cementeras más grandes de la ciudad. La selección se realizó teniendo en cuenta que en Colombia la mayor parte de las actividades de co-procesamiento se realiza en la industria del cemento.

Se eligió un único punto, considerando la estadística de recolección manejada por la red, que en comparación con la capacidad de procesamiento de este tipo de instalaciones es significativamente menor.

Las ubicaciones del conjunto de nodos descritos anteriormente se ilustran en la Figura 18.

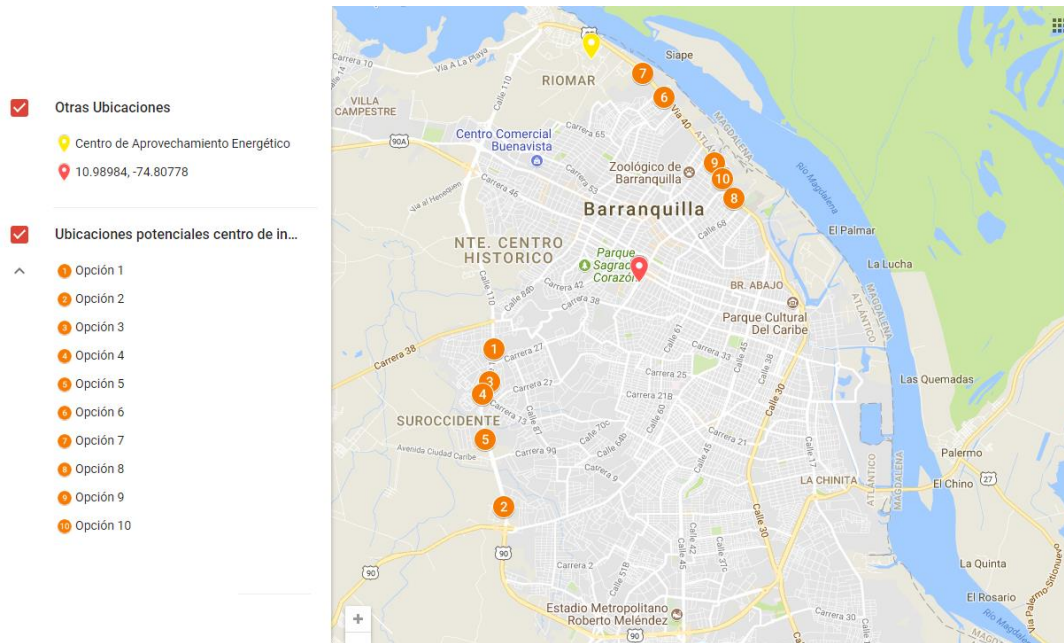


Figura 18. Ubicaciones potenciales de centros de inspección y clasificación i (naranja) y ubicación de centro de aprovechamiento energético (amarillo).

d. Instalaciones destinadas a la incineración de residuos.

Se consideraron tres ubicaciones potenciales, a partir del número de gestores de residuos peligrosos existentes en el departamento del Atlántico habilitados para prestar el servicio de incineración de medicamentos vencidos y residuos farmacéuticos por la CRA (Corporación Regional Autónoma del Atlántico), que en adelante serán llamados G1, G2 y G3 (Figura 19).



Figura 19. Ubicación de centros potenciales de incineración (gestores RESPEL autorizados para el tratamiento de medicamentos vencidos por la CRA).

- **Distancias**

Las matrices de distancia entre los nodos de la red fueron construidas utilizando el método de distancia euclidiana, el cual ha demostrado ser ágil y confiable para la estimación de la distancia entre dos puntos (Cruz-Rivera & Ertel, 2009; Listes, 2002; Yu & Solvang, 2017b; Zarandi, Sisakht, & Davari, 2011).

Antes de emplear la formulación correspondiente a este método, se utilizó la herramienta Google Maps® para establecer la ubicación de las instalaciones que integran la red. Luego, dado que las coordenadas obtenidas son expresadas en grados decimales, se procedió a realizar una conversión de unidades teniendo en cuenta los factores de conversión para la longitud y latitud de la ciudad.

En el caso de la latitud, la variación es despreciable respecto al Ecuador, por tanto, el factor de conversión universal es 111,325 km/1° de latitud. En tanto, la longitud del paralelo que pasa por la ubicación 10° 57' 50" N (latitud de Barranquilla) está dada por:

$$\text{Cos}(\text{latitud}) * 111,325 \text{ km}$$

Al realizar las conversiones respectivas es equivalente a:

$$\text{Cos} (10,964) * 111,325 \text{ km} = 109,293 \text{ km}$$

Por lo que para el caso corresponde a 109,29 km/ 1° de longitud.

Una vez expresados los datos en km, se calculó la distancia euclidiana entre los puntos de la red. La ecuación utilizada para estimar la distancia más corta entre los puntos azules (c) y las ubicaciones potenciales para instalaciones de inspección y clasificación (i) es:

$$d_{ci} = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$$

En donde, x_i y y_i representan la coordenada en el eje x y y de las instalaciones de clasificación y x_c y y_c , las coordenadas de los puntos azules de la red.

Se procede de igual manera con los demás pares de coordenadas que representan la ubicación de los nodos de la red entre los que existe una potencial comunicación.

- **Costos**

Dentro de los costos contemplados en el modelo, se deben determinar dos costos asociados a la operación de las instalaciones de inspección y clasificación: costo fijo de apertura de instalaciones y costo variable de procesamiento; y un único costo asignado a los centros de incineración.

- a. Costo fijo de apertura de instalaciones potenciales de inspección y clasificación i**

(F_i) .

El costo fijo es un elemento representativo para la estimación del número de centros a abrir, así como para la selección entre las ubicaciones candidatas. No obstante, la información de apertura de este tipo de instalaciones es limitada, y varía dependiendo de las dimensiones, tecnología empleada y otros factores.

Para el caso de los centros de inspección y clasificación se considera como costo fijo de apertura de instalaciones el precio de adquisición de un inmueble de 300 m², el cual varía dependiendo de la zona industrial en donde se localiza el conjunto de ubicaciones candidatas (Tabla 4). El precio por m² en las ubicaciones seleccionadas fue determinado a partir del valor comercial de bodegas ubicadas en la vía 40 y la avenida Circunvalar, los dos corredores industriales más importantes de la ciudad. Por otro lado, los costos asociados a la tecnología empleada no fueron considerados.

Tabla 4.

Costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación de residuos posconsumo

i	Ubicación	Precio/m2	Requerimiento	Localidad	Valor
1	Circunvalar	\$ 2.204.724	300	Suroriente	\$ 661.417.323
2	Circunvalar	\$ 1.300.000	300	Suroccidente	\$ 390.000.000
3	Circunvalar	\$ 2.295.082	300	Suroccidente	\$ 688.524.590
4	Circunvalar	\$ 2.188.976	300	Suroccidente	\$ 656.692.913
5	Circunvalar	\$ 2.100.000	300	Suroccidente	\$ 630.000.000
6	Vía 40	\$ 3.611.111	300	NCH	\$ 1.083.333.333
7	Vía 40	\$ 2.250.000	300	NCH	\$ 675.000.000
8	Vía 40	\$ 2.750.000	300	NCH	\$ 825.000.000
9	Vía 40	\$ 3.064.516	300	NCH	\$ 919.354.839
10	Vía 40	\$ 3.055.556	300	NCH	\$ 916.666.667

Nota: Fuente: Elaboración propia a partir de Finca Raiz (2018). Equivalencias: NCH, Norte Centro Histórico. Barranquilla cuenta con 5 localidades: Riomar, Norte Centro Histórico, Suroriente, Suroccidente y Metropolitana. En las localidades NCH y Suroccidente existe mayor presencia de puntos azules (71%).

b. Costo de procesamiento por kg

A partir del informe de sostenibilidad emitido para el 2017 por la Corporación Punto Azul (2018), se obtuvo que en promedio, el costo de procesamiento de 1 kg de medicamentos es de \$2152. Sin embargo, solo el 77% de este valor corresponde a costos directos del programa posconsumo; lo que significa que el costo real de procesamiento es de \$1657/kg.

Este costo incluye el costo de manipulación, así como el de disposición por cualquier vía. Por tanto, los costos variables de procesamiento a lo largo de la cadena son computados por única vez, y asignados como costos de procesamiento en el centro de inspección (V_i). Se selecciona este conjunto ($i \in I$) para garantizar la asignación del costo variable a los residuos recolectados, considerando que todos los medicamentos posconsumo deben pasar por esta instalación.

c. Costo fijo de emplear una instalación de incineración

A diferencia de las instalaciones de inspección y clasificación, las instalaciones de incineración se encuentran en funcionamiento, y tal como se indicó previamente, corresponden a la ubicación de los gestores RESPEL autorizados para el tratamiento de medicamentos vencidos.

Considerando que la oferta económica es muy similar entre los gestores RESPEL, se estima el costo fijo por el uso de una instalación de incineración en \$65.000 a partir de lo reportado por la Corporación Punto Azul (2015). De esta manera, la selección de un centro de incineración se basa exclusivamente en los costos de transporte, y las emisiones atmosféricas correspondientes.

- **Transporte**

Ante la ausencia de información sobre las características de la flota de vehículos usados en el marco de la red de logística inversa estudiada, se procedió a seleccionar un tipo de vehículo acorde a los requerimientos de la operación y la normatividad vigente (Ministerio de Transporte, 2002), con el propósito de estimar los costos y emisiones derivadas del transporte.

Para tal efecto, se tomó como referencia un camión sencillo (rígido de dos ejes, C2) con capacidad neta de cuatro toneladas y las siguientes especificaciones técnicas:

- ✓ Motor Diesel de 109 HP -2771 c.c Turbo cargado e *intercooler*.
- ✓ Sistema de frenos ABS, Sistema de frenos hidráulico y freno de parqueo centralizado.
- ✓ Largo Carrozable: 3,5 m.

- a. Costos de transporte**

El cálculo de los costos de transporte se realizó utilizando el Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga (SICE-TAC) del Ministerio de Transporte. Inicialmente se estableció el costo por tonelada entre dos ciudades del país, se procedió a restar los costos incurridos en peajes (toda vez que se constata que entre los nodos de la red no se incurre en estos costos), y finalmente se halló el costo promedio por kg y km recorrido.

Así, se tomó como costo de referencia por tonelada, el costo de traslado de Barranquilla a Cartagena para un camión sencillo (2 ejes), el cual corresponde a \$83618,55/Ton, después de

deducir el costo por concepto de peaje. Ahora bien, considerando la distancia entre las dos ciudades (112 km), se obtiene un costo de \$746,59/ton-km o \$0,75/kg-km. Este costo varía dependiendo de la distancia recorrida y la carga a trasladar, y excluye el costo de horas de espera, carga y descarga. En la Tabla 5 se detallan los rubros considerados en el cálculo del costo de referencia.

Tabla 5.

Elementos del costo considerados en la estimación del costo de transporte de referencia.

Tipo de Costo	Concepto	Valor por tonelada
FIJO	Capital	\$20.838,40
FIJO	Comunicaciones	\$1.605,08
FIJO	Impuestos	\$711,32
FIJO	Parqueaderos	\$1.337,65
FIJO	Revisión Técnico-Mecánica	\$148,84
FIJO	Salarios y Prestaciones	\$15.789,83
FIJO	Tripulación (Básico)	\$2.853,38
FIJO	Seguros	\$17.287,76
OTRO	Comisiones y Factor Prestacional	\$6.314,04
OTRO	Gastos de Administración	\$947,14
OTRO	Imprevistos	\$1.641,67
OTRO	RetelCA	\$8.183,94
VARIABLE	Combustible	\$227,73
VARIABLE	Filtros	\$497,78
VARIABLE	Lavado y engrase	\$1.397,13
VARIABLE	Llantas	\$666,77
VARIABLE	Lubricantes	\$3.170,09
VARIABLE	Mantenimiento y Reparaciones	\$83.618,55
	Total	

Fuente: Ministerio de Transporte (2018)

- **Emisiones atmosféricas**

Para la estimación de las emisiones atmosféricas derivadas de la operación de la red, se consideraron dos fuentes de generación: transporte y procesamiento.

a. Fuente 1. Transporte de mercancías peligrosas.

El transporte por carretera es fuente de emisión de varios gases de efecto invernadero. De acuerdo con el IPCC² (2006) las emisiones pueden ser calculadas o bien a partir de la cantidad de combustible consumido o considerando la distancia recorrida. Sin embargo, el primer método es apropiado para el cálculo del CO_2 generado, en tanto que el segundo se prefiere para CH_4 y N_2O .

Tal como se indicó anteriormente, para efectos de la modelación únicamente se consideraron las emisiones de CO_2 .

De acuerdo con las sugerencias del IPCC las emisiones de CO_2 se calcularon a partir de la cantidad y tipo de combustible consumido, a través de la siguiente ecuación:

$$Emisiones = \sum_j [Combustible_j * FE_j]$$

En donde:

Emisiones: Emisiones de CO_2 en kg

j: Tipo de combustible

Combustible_j: Consumo de combustible tipo *j* (gal)

FE_j: Factor de emisión del combustible tipo *j* ($\frac{kg}{gal}$)

Al desear estimar las emisiones derivadas de un solo tipo de combustible (diésel), la ecuación se simplifica reduciéndose a la multiplicación del factor de emisión por el consumo.

$$Emisiones = Combustible_j * FE_j$$

A su vez, el consumo de combustible fue estimado a partir de la ecuación:

$$Combustible_j = Distancia_{ij} * Consumo_{ij}$$

² Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático

En donde,

$Distancia_{ij}$: km recorridos por el vehículo tipo i usando el combustible j

$Consumo_{ij}$: Consumo promedio de combustible (gal/km) del vehículo tipo i usando el combustible j

Los datos de entrada para el cálculo del consumo fueron asumidos teniendo en cuenta el rendimiento de camiones de dos ejes (C2) (Tabla 6). De esta manera el consumo de combustible del camión para el caso de la ciudad de Barranquilla corresponde a 9,5 km/gal o su equivalente 0,11 gal/km.

Tabla 6.
Rendimiento de camiones C2.

PAVIMENTADO	Km/galón
Plano	9,5
Ondulado	6,7
Montañoso	4,6

Fuente: Ministerio de Transporte (n.d.).

Las emisiones de CO_2 producto del transporte de residuos posconsumo de medicamentos vencidos se calcularon utilizando el factor de emisión del diesel genérico (10,149 kg e / gal) (Unidad de Planeación Minero Energética, 2016).

b. Fuente 2: Emisiones derivadas del tratamiento de residuos posconsumo

La otra fuente de emisión de CO_2 en la red estudiada corresponde al tratamiento de los residuos, sea por la vía tradicional de incineración o por el camino del co-procesamiento. Sin embargo, el co-procesamiento constituye una alternativa de mitigación para el control de emisiones, en la medida que permite disminuir la huella de carbono a partir del uso de residuos para la generación de combustibles alternativos que presentan factores de emisión de CO_2 menores. Las emisiones derivadas del co-procesamiento no son consideradas en la modelación

por su impacto significativamente menor, en comparación con las actividades de incineración (Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, 2015) .

La incineración genera emisiones de CO₂, CH₄ y NO₂. No obstante, las emisiones de CO₂ son mayores que las de los otros contaminantes (IPCC, 2001) .

Para el cálculo de las emisiones de CO₂ derivadas de la incineración de medicamentos vencidos, se seleccionó la metodología sugerida por la IPCC (2001) ante la ausencia de datos específicos del país sobre el contenido de carbono en los residuos de fármacos, lo que conduce a estimar las emisiones a partir de los datos por defecto sobre el contenido de carbono y la fracción de carbono fósil de la categoría residuos peligrosos (Tabla 11).

En este punto es importante aclarar que en la corriente de residuos de la variable Z_{id} también se consideran los residuos impropios, los cuales a partir de la evidencia reportada por Cobos & Cisneros (2017); Corporación Punto Azul (2017a) suelen corresponder a jeringas y material biológico, elementos que de acuerdo con el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2005) también son considerados como residuos peligrosos. Por tanto, no se hace una distinción frente a las emisiones de los residuos enviados a incineración.

La cuantificación de las emisiones se realizó utilizando la siguiente ecuación que considera el tipo de residuo incinerado y el contenido de carbono presente en dichos residuos:

$$Emisiones\ de\ CO_2 = \sum_i (R_i * CCR_i * FCF_i * EF_i * 44/12)$$

Siendo i , tipo de residuo, que para el caso corresponde a la categoría de peligroso, entonces:

$$Emisiones\ de\ CO_2 = R * CCR * FCF * EF * 44/12$$

Donde,

R : Cantidad de residuos incinerados (kg/año), que para efectos de la modelación corresponde a Z_{id} .

CCR : Fracción de contenido de carbono en los residuos incinerados

FCF : Fracción de carbono fósil en los residuos

EF : Eficiencia de la combustión en incineradores para los residuos (fracción)

$\frac{44}{12}$: Conversión de C en CO_2

- **Fracción de productos destinado al co-procesamiento**

En el modelo se considera la tasa de aprovechamiento actual como la fracción mínima esperada de productos a aprovechar (fmr) la cual corresponde al 12%.

En tanto que como valor máximo en un escenario optimista es que se mantenga la tendencia de las labores de co-procesamiento, lo que implica un aumento anual del 10%. De esta forma, la fracción máxima de productos (fpr) a aprovechar es de 22%.

- **Fracción de residuos impropios**

Este parámetro asume un valor en la modelación del 3% a partir del promedio de los datos históricos de residuos recolectados a nivel nacional. El término residuos impropios hace referencia a aquellos residuos que no debieron ser depositados en los contenedores.

7.3.1. Datos de entrada

A partir de las consideraciones expuestas en la sección anterior, en las tablas 7-15, se presentan los datos de entrada del modelo.

Conjuntos:

Tabla 7.

Declaración de conjuntos.

Notación	Descripción	Valor
c	Puntos azules $c \in C$	$\{1, \dots, 31\}$
i	Ubicaciones potenciales para centros de inspección y clasificación, $i \in I$	$\{1, \dots, 10\}$
r	Centros de aprovechamiento energético, $r \in R$	$\{1\}$
d	Ubicaciones potenciales de centro de disposición/incineración, $d \in D$	$\{1, \dots, 3\}$

Parámetros:

Tabla 8.

Cantidad de productos retornados en el punto azul c , P_c (kg/año).

Contenedor	kg/año
1	88,70
2	94,79
3	95,54
4	93,15
5	91,99
6	90,56
7	91,11
8	90,26
9	92,78
10	91,46
11	93,28
12	93,56
13	92,51
14	96,73
15	97,15
16	88,34
17	93,53
18	93,46
19	92,00
20	95,71
21	92,02
22	91,72
23	91,64
24	91,13
25	368,61
26	95,47
27	94,25
28	187,47
29	92,70
30	87,89
31	93,99

Nota: Caso determinístico.

Tabla 9.

Costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación.

i	F_i
1	\$661.417.323
2	\$390.000.000
3	\$688.524.590
4	\$656.692.913
5	\$630.000.000
6	\$1.083.333.333
7	\$675.000.000
8	\$825.000.000
9	\$919.354.839
10	\$916.666.667

Tabla 10.

Parámetros para la estimación de emisiones de dióxido de carbono derivadas del transporte de medicamentos posconsumo entre los nodos de la red.

Notación	Descripción	Valor
Consumo	Consumo promedio de combustible derivado del transporte (gal/km)	0,11
FE	Factor de emisión del diésel genérico ($kg CO_2/gal$)	10,39

Fuente: Ministerio de Transporte (n.d.); Unidad de Planeación Minero Energética (2016)

Tabla 11.

Datos por defecto para la estimación de emisiones de CO_2 procedentes de la incineración de residuos peligrosos.

Notación	Descripción	Valor
CCR	Fracción de contenido de carbono en los residuos incinerados	0,5
FCF	Fracción de carbono fósil en los residuos	0,9
EF	Eficiencia de la combustión en incineradores	0,995
Factor	Factor de conversión de Carbono en Dióxido de Carbono	3,667

Fuente: IPCC (2001).

Tabla 12.

Otros parámetros del modelo

Notación	Descripción	Valor
f_{pi}	Fracción de residuos impropios	0,03
f_{mr}	Fracción mínima de residuos aprovechables	0,12
f_{pr}	Fracción máxima de residuos aprovechables	0,22
F_d	Costo fijo de emplear una instalación de incineración (\$)	65000
V_i (\$/kg)	Costo variable de procesar una unidad en centros de inspección y clasificación i (\$/kg).	1657
CT	Costo de transporte por km recorrido (\$/kg-km)	0,75
N_{max}	Número máximo de centros de inspección a abrir	2
NM_d	Número máximo de centros de incineración a seleccionar	1

Tabla 13.

Distancia entre punto azul c y centro de inspección y clasificación i (km).

c/i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,03	5,33	5,04	5,20	5,22	6,38	6,97	4,09	4,85	4,52
2	3,69	5,71	4,08	4,36	4,88	3,94	4,44	2,45	2,84	2,63
3	2,11	3,86	2,31	2,56	2,99	5,50	5,89	4,34	4,68	4,50
4	4,03	7,30	4,74	5,03	5,94	3,06	2,97	4,29	3,81	3,98
5	4,35	6,86	4,88	5,18	5,85	2,58	3,08	1,78	1,77	1,71
6	3,52	6,37	4,13	4,44	5,21	2,95	3,25	2,86	2,71	2,73
7	4,30	5,88	4,59	4,84	5,24	4,37	4,94	2,37	2,98	2,70
8	3,78	6,76	4,42	4,73	5,54	2,65	2,88	3,01	2,72	2,80
9	3,77	6,88	4,44	4,75	5,60	2,76	2,87	3,46	3,09	3,21
10	4,03	7,00	4,68	4,98	5,79	2,40	2,63	2,86	2,52	2,62
11	5,30	6,67	5,57	5,81	6,15	4,50	5,13	2,07	2,87	2,52
12	4,43	7,74	5,09	5,32	6,26	4,82	4,53	6,29	5,80	5,98
13	1,06	2,57	0,78	0,95	1,40	6,79	7,08	5,94	6,20	6,06
14	4,33	6,88	4,88	5,18	5,86	2,53	3,01	1,83	1,78	1,74
15	5,02	3,88	4,72	4,75	4,37	8,29	8,82	6,21	6,91	6,60
16	8,87	9,40	9,00	9,20	9,31	7,24	7,91	4,72	5,51	5,18
17	6,15	3,46	5,60	5,48	4,70	10,70	11,19	8,79	9,44	9,15
18	5,76	4,15	5,39	5,39	4,89	9,15	9,69	7,02	7,74	7,42
19	4,67	1,54	4,02	3,84	2,95	10,12	10,52	8,62	9,13	8,90
20	3,78	6,74	4,42	4,73	5,53	2,65	2,89	2,97	2,69	2,76
21	3,44	6,28	4,04	4,35	5,12	3,04	3,35	2,90	2,78	2,78
22	5,71	7,06	5,99	6,23	6,56	4,52	5,17	1,99	2,83	2,47
23	4,18	6,49	4,66	4,95	5,56	3,10	3,61	1,82	2,05	1,90
24	4,65	7,02	5,16	5,45	6,08	2,64	3,20	1,38	1,53	1,39
25	4,13	6,31	4,57	4,86	5,43	3,36	3,89	1,90	2,23	2,04
26	4,28	7,62	4,98	5,24	6,18	3,78	3,55	5,23	4,72	4,91
27	3,68	6,47	4,28	4,58	5,34	2,83	3,17	2,66	2,52	2,53
28	6,01	8,82	6,63	6,94	7,70	0,51	1,10	2,22	1,40	1,73
29	3,45	5,53	3,85	4,13	4,66	4,02	4,49	2,65	3,00	2,82
30	3,82	6,42	4,37	4,67	5,37	2,92	3,34	2,29	2,29	2,24
31	6,15	6,96	6,30	6,51	6,69	5,64	6,28	3,07	3,92	3,56

Tabla 14.

Distancia entre centro de inspección i y centro de incineración d (km)

i/d	1	2	3
1	5,90	5,34	13,53
2	5,33	5,58	12,45
3	5,74	5,09	13,12
4	5,84	4,88	12,86
5	5,62	4,93	12,54
6	7,84	11,11	19,49
7	8,43	11,09	19,45
8	5,48	11,24	19,52
9	6,27	11,23	19,57
10	5,93	11,21	19,53

Tabla 15.

Distancia entre centros de inspección i y centro de aprovechamiento energético r (km)

i/r	1
1	6,465
2	9,642
3	7,157
4	7,455
5	8,339
6	1,730
7	1,132
8	4,217
9	3,410
10	3,742

7.4. Resultados

7.4.1. Solución del modelo matemático considerando cantidad de productos retornados como parámetro determinístico

Inicialmente, se considera una cantidad determinística de productos retornados para cada uno de los puntos azules. El método de optimización multiobjetivo seleccionado para la solución del caso consiste en un híbrido denominado método de restricciones de épsilon aumentado, que utiliza el método lexicográfico y el método de restricciones de épsilon para obtener el conjunto

de soluciones eficientes de Pareto. Esta técnica de solución no considera la importancia asignada a cada función objetivo a priori, sino que considera la importancia relativa de las funciones objetivo en la generación de soluciones de Pareto.

Una vez generado el conjunto de soluciones eficientes, se debe seleccionar una única solución para la configuración de la red de logística inversa, para tal fin se emplea una técnica basada en lógica difusa propuesta por Reza Norouzi et al. (2014) que permite la calificación de las soluciones de forma sistemática.

La selección del método de restricciones de ϵ para la solución del modelo multiobjetivo obedece a una serie de ventajas frente al uso de otras técnicas como el método de suma ponderada. De acuerdo con Mavrotas (2009), en el método de suma ponderada la solución se obtiene a partir de un valor extremo, en tanto que el método de restricciones de ϵ es capaz de encontrar soluciones eficientes en lugares diferentes (no solo extremos) de la región factible. En este sentido, con el método de suma ponderada es posible encontrar una gran cantidad de soluciones iguales como resultado de varias combinaciones de las ponderaciones usadas, caso contrario del método de restricciones de ϵ que permite explorar la totalidad de la región factible obteniendo soluciones diferentes en cada iteración, lo que genera una mejor representación de la frontera de Pareto.

Así mismo, en el método de suma ponderada las funciones objetivo deben computarse utilizando para ello un método de escalarización, el cual posee una gran influencia en la generación de la solución. Efecto que en el método de restricciones de ϵ no existe. De igual manera, al utilizar en la primera fase la optimización lexicográfica de objetivos se logra obtener un conjunto de soluciones Pareto óptimas, y visualizar el comportamiento de los

objetivos en conflicto antes de seleccionar una única solución. En la Figura 20, se describe la metodología de solución del modelo matemático.

Se emplea el software GAMS (*General Algebraic Modeling System*) versión 25.0.3 y el solver CPLEX 12.8 para la solución del problema, en un computador personal Intel® Core™ i5-5200U con 2.2 Ghz de procesador, 4 GB de RAM y sistema operativo Windows 10. La codificación en GAMS provee un lenguaje de alto nivel para la representación del problema, al tiempo que permite cambiar las dimensiones del modelo de una forma simple y eficiente. Además, este programa computacional ha demostrado ser útil para la modelación y solución de diversos problemas de optimización combinatoria (Cardoso et al., 2013; Flórez et al., 2012; Kara & Onut, 2010; Ospina-Mateus, Aceverdo-Chedid, Salas-Navarro, Morales-Londoño, & Montero-Perez, 2017).

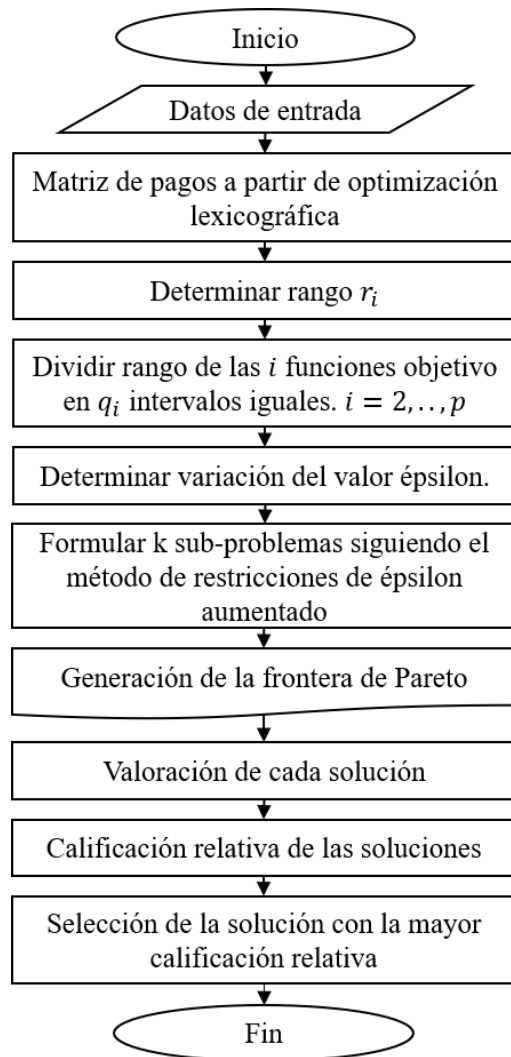


Figura 20. Metodología de solución del modelo multiobjetivo

En la primera fase, se utiliza el método lexicográfico con el propósito de determinar la matriz de pagos o payoff table (Tabla 16). El uso de este método en la fase inicial garantiza que las soluciones obtenidas a partir de la optimización individual de objetivos sean Pareto-óptimas. Para la implementación del método, inicialmente se resolvió el problema, considerando como objetivo la minimización de costos totales (F1). Luego, se solucionó el problema considerando la minimización del segundo objetivo (F2, emisiones de dióxido de carbono), incluyendo como restricción la solución obtenida previamente $F_1 = z_1^*$. Este procedimiento se repite, esta vez modificando el orden de las funciones consideradas como lo muestra la Tabla 16.

Tabla 16.

Planteamiento del método lexicográfico

	F_1	F_2
Min F_1	$\min F_1$ s.t. (11) - (19)	$\min F_2$ s.t. $F_1 = z_1^*$ (11) - (19)
Min F_2	$\min F_1$ s.t. $F_2 = z_2^*$ (11) - (19)	$\min F_2$ s.t. (11) - (19)

Los resultados de la aplicación del método se presentan en la Tabla 17. En la primera fila, se consignan los resultados del primer ejercicio de optimización. En la celda en negrita, se incluye el resultado de la optimización del problema considerando únicamente el objetivo F_1 (Minimización de costos). La siguiente celda a la derecha, es el resultado de la optimización de F_2 (Minimización de emisiones), considerando la solución óptima anterior $z_1^* = 395468784,8$ como restricción.

En la segunda fila, se procede de manera similar, pero invirtiendo el orden de los objetivos considerados, es decir, la segunda celda, contiene el resultado de la optimización individual de F_2 y la primera, la optimización de F_1 , considerando z_2^* , como restricción.

Tabla 17.

Matriz de pagos del problema estudiado

	F_1	F_2
Min F_1	395468784,8	6713,5
Min F_2	395469802,3	6196,9

A partir de los resultados obtenidos, se observa que, al considerar la optimización individual de cada objetivo, se obtienen los mejores resultados. Es decir, las celdas en negrita representan los menores valores para los objetivos considerados. Sin embargo, en el primer ejercicio de optimización (primera fila), un menor costo de operación de la red deriva en una mayor cantidad

de emisiones de CO_2 . Comportamiento que se repite en el segundo ejercicio de optimización (segunda fila), en donde una menor tasa de emisiones incurre en mayores costos de operación de la red. Lo anterior, corrobora el carácter de conflicto de los objetivos considerados en el problema multiobjetivo.

Luego, se procede a determinar el rango de las funciones objetivo consideradas, es decir, la diferencia entre el valor máximo obtenido (que, en este caso, por tratarse de un problema de minimización para ambos objetivos, coincide con la peor solución, también llamada punto Pseudo Nadir) y el punto de utopía o mejor solución (Tabla 18).

$$Rango = (F_i^{Max} - F_i^{Min}) \forall i = 1,2$$

Tabla 18.

Rango de las funciones objetivo en la matriz de pagos.

	F_1	F_2
Min F_1	395468784,8	6713,5
Min F_2	395469802,3	6196,9
Rango (r_i)	1017,5	516,6

Previo a la aplicación del método de restricciones de épsilon aumentado, debe seleccionarse la función principal. Por tanto, se selecciona la función F_1 como la función objetivo principal en el problema, para así, variar paramétricamente durante la ejecución del modelo, la función F_2 . La selección de esta última función como función que será expresada como restricción, se realiza a partir del rango observado, el cual proporciona una cantidad considerable de emisiones a optimizar, aproximadamente de media tonelada. En tanto que, el rango de la función F_1 es despreciable en comparación con los costos totales, cifra del orden de varios millones de pesos.

El siguiente paso, consiste en dividir el rango obtenido para la función sobrante (F_2) en q_2 intervalos iguales:

$$\frac{(F_2^{Max} - F_2^{Min})}{q_2} = \frac{r_2}{q_2}$$

En donde q_2 , corresponde a un número arbitrario seleccionado teniendo en cuenta la densidad deseada del conjunto solución a representar gráficamente. Un número q_2 elevado, deriva en una mayor densidad para la frontera de Pareto, pero implica mayor tiempo computacional para resolver el problema.

Se selecciona $q_2 = 49$, lo que significa que el conjunto de soluciones de Pareto se obtendrá a partir de la solución de $q_2 + 1$ sub-problemas. La aplicación de la formulación deriva entonces en 50 sub-problemas. Para la solución de estos en una sola corrida computacional en GAMS se empleó el código ilustrado en el Anexo 2, similar al utilizado por Mavrotas (2009). El tiempo de procesamiento total fue de 15,961 segundos. Los datos completos de ejecución se presentan en la sección 7.4.3.

A partir de la solución de cada sub-problema, se obtiene el conjunto de soluciones de Pareto, el cual es presentado en las Tablas 19 y 20.

Tabla 19.
Puntos no dominados a partir del método de restricciones de epsilon

Sub-problema	F_1	F_2
1	395468784,8	6713,5
2	395468805,6	6702,9
3	395468826,4	6692,4
4	395468847,1	6681,8
5	395468867,9	6671,3
6	395468888,7	6660,8
7	395468909,4	6650,2
8	395468930,2	6639,7
9	395468951,0	6629,1
10	395468971,7	6618,6
11	395468992,5	6608,0
12	395469013,3	6597,5
13	395469034,0	6587,0
14	395469054,8	6576,4

Tabla 20.

Puntos no dominados a partir del método de restricciones de ϵ (continuación)

Sub-problema	F_1	F_2
15	395469075,5	6565,9
16	395469096,3	6555,3
17	395469117,1	6544,8
18	395469137,8	6534,3
19	395469158,6	6523,7
20	395469179,4	6513,2
21	395469200,1	6502,6
22	395469220,9	6492,1
23	395469241,7	6481,5
24	395469262,4	6471,0
25	395469283,2	6460,5
26	395469304,0	6449,9
27	395469324,7	6439,4
28	395469345,5	6428,8
29	395469366,3	6418,3
30	395469387,0	6407,7
31	395469407,8	6397,2
32	395469428,6	6386,7
33	395469449,3	6376,1
34	395469470,1	6365,6
35	395469490,8	6355,0
36	395469511,6	6344,5
37	395469532,4	6333,9
38	395469553,1	6323,4
39	395469573,9	6312,9
40	395469594,7	6302,3
41	395469615,4	6291,8
42	395469636,2	6281,2
43	395469657,0	6270,7
44	395469677,7	6260,2
45	395469698,5	6249,6
46	395469719,3	6239,1
47	395469740,0	6228,5
48	395469760,8	6218,0
49	395469781,6	6207,4
50	395469802,3	6196,9

La Figura 21 muestra la representación gráfica del conjunto de soluciones eficientes que conforman la Frontera de Pareto. Tal como se observa, existe una relación de conflicto entre los objetivos, en donde menores costos representan un mayor nivel de emisiones de CO₂, y viceversa.

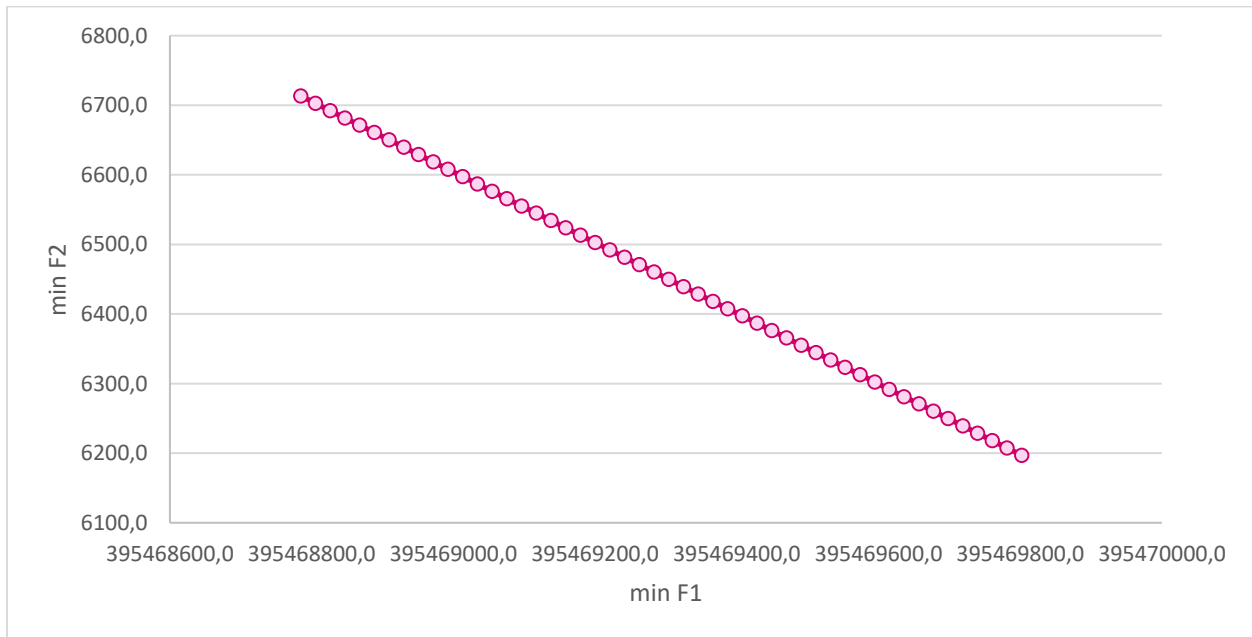


Figura 21. Frontera de Pareto para el problema multiobjetivo

Para la selección de una única solución, se procede a otorgar una calificación a cada solución del conjunto de soluciones no dominadas mediante el uso de las siguientes reglas propuestas por Reza Norouzi et al. (2014), basadas en las nociones de lógica difusa.

$$\mu_i^r = \begin{cases} 1 & f_i^r \leq f_i^{Min} \\ \frac{f_i^{Max} - f_i^r}{f_i^{Max} - f_i^{Min}} & f_i^{Min} \leq f_i^r \leq f_i^{Max} \\ 0 & f_i^r \geq f_i^{Max} \end{cases}$$

Donde los valores f_i^{Max} y f_i^{Min} , son obtenidos de la matriz de pagos (Tabla 17), como el máximo y mínimo valor de la función objetivo i , respectivamente; f_i^r corresponde al valor de la

i -ésima función objetivo en la r -ésima solución óptima de Pareto, y μ_i^r , la calificación de la i -ésima función en la r -ésima solución de Pareto.

Una vez se determina la calificación para las dos funciones objetivo en las 50 soluciones de Pareto, se procede a emplear la siguiente ecuación.

$$\mu^r = \frac{\sum_{i=1}^p w_i \mu_i^r}{\sum_{i=1}^p w_i}$$

Siendo p , el número de funciones objetivo consideradas, y w_i la ponderación para cada función objetivo, que para el caso estudiado corresponde a 0,4 y 0,6 respectivamente. Una mayor ponderación del segundo objetivo (emisiones de dióxido de carbono) permite obtener una solución con menores niveles de emisiones, sin afectar sustantivamente los costos incurridos en la operación de la red, lo que se deriva del rango observado entre la mejor y la peor solución para cada objetivo, en donde la diferencia en costos es despreciable, en tanto que la variación en emisiones es significativa. En este punto es importante resaltar que, de haber usado otro método de solución, estas variaciones en los rangos no hubieran podido ser observadas y podría haberse continuado con la idea de otorgar mayor importancia a la función F_1 (costos totales).

A partir de la aplicación de las reglas de lógica difusa se obtienen las calificaciones presentadas en las Tablas 21 y 22.

Tabla 21.
Aplicación de lógica difusa para la calificación de las soluciones

Sub-problema r	μ_1^r	μ_2^r	μ^r
1	1,0000	0,0000	0,4000
2	0,9796	0,0205	0,4041
3	0,9591	0,0408	0,4082
4	0,9388	0,0614	0,4123
5	0,9183	0,0817	0,4163
6	0,8979	0,1020	0,4204
7	0,8775	0,1225	0,4245
8	0,8571	0,1429	0,4286
9	0,8367	0,1634	0,4327

Tabla 22.

Aplicación de lógica difusa para la calificación de las soluciones (continuación)

Sub-problema r	μ_1^r	μ_2^r	μ^r
10	0,8163	0,1837	0,4367
11	0,7959	0,2042	0,4409
12	0,7754	0,2245	0,4449
13	0,7551	0,2449	0,4490
14	0,7346	0,2654	0,4531
15	0,7143	0,2857	0,4571
16	0,6939	0,3062	0,4613
17	0,6734	0,3266	0,4653
18	0,6531	0,3469	0,4694
19	0,6326	0,3674	0,4735
20	0,6122	0,3877	0,4775
21	0,5918	0,4082	0,4817
22	0,5714	0,4286	0,4857
23	0,5510	0,4491	0,4898
24	0,5306	0,4694	0,4939
25	0,5102	0,4897	0,4979
26	0,4897	0,5103	0,5020
27	0,4694	0,5306	0,5061
28	0,4489	0,5511	0,5102
29	0,4285	0,5714	0,5143
30	0,4082	0,5919	0,5184
31	0,3877	0,6123	0,5224
32	0,3673	0,6326	0,5265
33	0,3469	0,6531	0,5306
34	0,3265	0,6734	0,5347
35	0,3061	0,6940	0,5388
36	0,2857	0,7143	0,5429
37	0,2653	0,7348	0,5470
38	0,2449	0,7551	0,5510
39	0,2245	0,7755	0,5551
40	0,2040	0,7960	0,5592
41	0,1837	0,8163	0,5633
42	0,1632	0,8368	0,5674
43	0,1428	0,8571	0,5714
44	0,1225	0,8775	0,5755
45	0,1020	0,8980	0,5796
46	0,0816	0,9183	0,5836
47	0,0612	0,9388	0,5878
48	0,0408	0,9592	0,5918
49	0,0203	0,9797	0,5959
50	0,0000	1,0000	0,6000

La mejor solución que permite encontrar un equilibrio entre los dos objetivos en conflicto, y considera la importancia relativa de la solución para la generación de soluciones óptimas de Pareto, es aquella con mayor calificación μ^r . En este caso, la calificación más alta $\mu^r = 0,60$, corresponde al sub-problema 50.

En la Figura 22 se ilustra el conjunto de soluciones y la mejor solución.

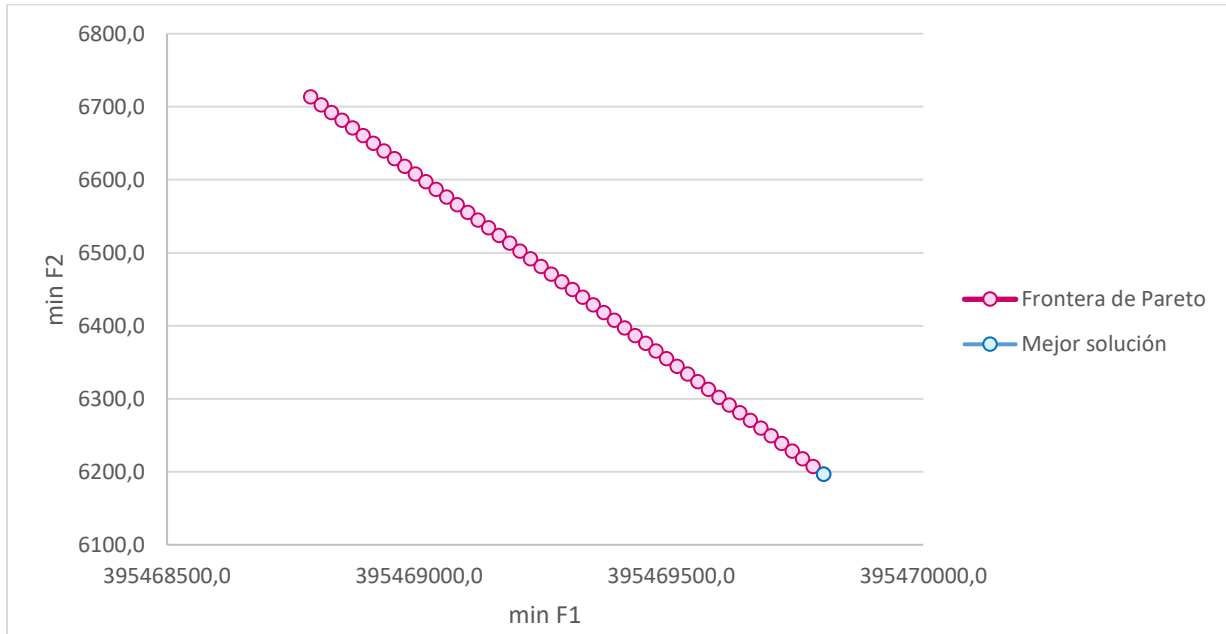


Figura 22. Frontera de Pareto y solución con la calificación más alta.

De esta forma, se obtiene como resultado un valor de \$395.469.802,3 para los costos fijos de apertura, operación y transporte de la red, y 6196,9 kg de emisiones de dióxido de carbono derivadas de las actividades de transporte e incineración de la red de logística inversa propuesta.

Esta solución, proporciona la siguiente configuración: Se debe abrir un único centro de inspección, el cual corresponde a la ubicación 2. Además, debe seleccionarse como gestor RESPAL para la incineración de residuos la alternativa 1. El flujo de productos a través de la red se ilustra en las Tablas 23-25.

Tabla 23.

Cantidad de productos a enviar del punto de consumo c al centro de inspección i

<i>c/i</i>	<i>2</i>
1	88,70
2	94,79
3	95,54
4	93,15
5	91,99
6	90,56
7	91,11
8	90,26
9	92,78
10	91,46
11	93,28
12	93,56
13	92,51
14	96,73
15	97,15
16	88,34
17	93,53
18	93,46
19	92,00
20	95,71
21	92,02
22	91,72
23	91,64
24	91,13
25	368,61
26	95,47
27	94,25
28	187,47
29	92,70
30	87,89
31	93,99

Tabla 24.

Cantidad de residuos posconsumo a enviar del punto de inspección i al centro de aprovechamiento energético r.

<i>i/r</i>	<i>1</i>
2	692,163

Tabla 25.

Cantidad de residuos posconsumo a enviar del punto de inspección i al centro de incineración d.

i/d	1
2	2551,337

Se generaron 365 variables, de las cuales 13 son binarias, 352 variables continuas (350 relacionadas con el flujo en la red y 2 asociadas a la variable de holgura/exceso).

7.4.2. Solución del modelo matemático considerando cantidad de productos retornados como parámetro incierto.

De acuerdo con Yu & Solvang (2017) la incertidumbre en la optimización estocástica puede ser considerada a través de dos enfoques. El primero de ellos consiste en describir los parámetros inciertos a través de eventos uniformemente distribuidos, en tanto que el segundo, busca hacerlo empleando escenarios discretos.

Justamente, este último enfoque ha sido usado ampliamente en la literatura para la formulación de problemas de optimización estocástica debido a su simplicidad y efectividad (Soleimani et al., 2016, Chen et al., 2002, Papavasiliou et al., 2011 citados en Yu & Solvang, 2017). Así lo demuestran autores como Cannella, Bruccoleri, & Framinan (2016); Listes (2002); Ramezani et al. (2013) quienes modelan en sus investigaciones la tasa de retorno o las cantidades de productos retornados usando escenarios o niveles con probabilidades asociadas basadas en la experiencia.

Por tanto, para efectos del modelo propuesto, se considera la incertidumbre asociada a la cantidad de productos retornados a través de la formulación de un conjunto de escenarios discretos equiprobables. Al asumir que los escenarios poseen la misma probabilidad de ocurrencia, se garantiza que la configuración obtenida sea lo más balanceada posible entre las situaciones contempladas (Listes & Dekker, 2005).

Para la modelación considerando incertidumbre, se empleó la programación estocástica de dos etapas. Esta técnica consiste en la división del conjunto de decisiones en dos grupos: El primer grupo corresponde a las decisiones que deben ser tomadas previo a la ocurrencia del evento aleatorio, denominadas decisiones de primera etapa. En tanto que, el grupo de decisiones que se toman posterior a este suceso, se agrupan en una nueva etapa, conformando así las decisiones de segunda etapa.

Modelos de este tipo, han sido desarrollados anteriormente en el ámbito de la logística inversa, obteniendo muy buenos resultados en la labor de incluir la incertidumbre en la modelación. Tal es el caso de investigaciones como las de Kara & Onut (2010); Listes (2002); Listes & Dekker (2005); Ramezani et al. (2013); Yu & Solvang (2017).

La formulación del modelo de programación estocástica en su forma extensiva es presentada a continuación:

Conjuntos:

Notación	Descripción
c	Puntos azules $c \in C$
i	Centros de inspección y clasificación, $i \in I$
r	Centros de aprovechamiento energético, $r \in R$
d	Centro de disposición/incineración, $d \in D$
e	Escenarios posibles, $e \in E$

Parámetros:

Notación	Descripción
P_{ce}	Cantidad de productos retornados por los clientes en el punto azul c en el escenario e (kg).
Pbs_e	Probabilidad de ocurrencia del escenario e , $\sum_e Pbs_e = 1$.
F_d	Costo fijo de emplear una instalación de incineración d (\$).
F_i	Costo fijo de apertura de centro de inspección y clasificación i (\$).
V_i	Costo variable de procesar una unidad en centros de inspección y clasificación i (\$/kg).
D_{ci}	Distancia del punto azul c al centro de inspección y clasificación i (km).

Notación	Descripción
D_{ir}	Distancia del centro de inspección y clasificación i al centro de aprovechamiento energético r (km).
D_{id}	Distancia del centro de inspección y clasificación i a centros de disposición/incineración d (km).
CT	Costo de transporte por kg y km recorrido (\$/kg-km).
f_{pi}	Fracción de residuos impropios depositados en el punto azul c .
f_{pr}	Fracción máxima de productos con potencial de aprovechamiento.
f_{mr}	Fracción mínima de productos con potencial de aprovechamiento.
$Consumo$	Consumo promedio de combustible derivado del transporte en la red (gal/km)
FE	Factor de emisión de dióxido de carbono del diésel (kg CO ₂ /gal)
CCR	Fracción de contenido de carbono en los residuos incinerados
FCF	Fracción de carbono fósil en los residuos
EF	Eficiencia de la combustión en incineradores
$Factor$	Factor de conversión de C en CO ₂
M	Capacidad de la ruta entre nodos de la red (kg)

Variables de decisión de primera etapa:

Notación	Descripción
W_i	Variable binaria para determinar si se abre o no un centro de inspección y clasificación i , 1 si se abre y 0 en caso contrario.
W_d	Variable binaria para determinar si se utiliza o no un centro de incineración d , 1 si se abre y 0 en caso contrario.

Variables de decisión de segunda etapa:

Notación	Descripción
X_{cie}	Cantidad de productos transferidos del punto azul c al centro de inspección y clasificación i en el escenario e .
Y_{ire}	Cantidad de productos con potencial de recuperación transportados del centro de inspección y clasificación i al centro de aprovechamiento energético r en el escenario e .
Z_{ide}	Cantidad de productos transportados del centro de inspección y clasificación i al centro de incineración d en el escenario e .

$$Z_{min} (F_1, F_2)$$

$$\begin{aligned} \min F_1 = & \sum_{i=1}^n F_i W_i + \sum_{d=1}^n F_d W_d \\ & + \sum_{e=1}^n Pbs(e) \left(\sum_{i=1}^n \sum_{c=1}^n V_i X_{cie} + \sum_{c=1}^n \sum_{i=1}^n X_{cie} * Distancia_{ci} * CT \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n Y_{ire} * Distancia_{ir} * CT + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Z_{ide} * Distancia_{id} * CT \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min F_2 = & \sum_{c=1}^n \sum_{i=1}^n Distancia_{ci} * Consumo * FE + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n Distancia_{ir} * Consumo * FE \\ & + \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Distancia_{id} * Consumo * FE + \sum_{e=1}^n Pbs(e) \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^n Z_{ide} * CCR * FCF \\ & * EF * Factor \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{cie} = P_{ce}; \quad \forall c \in C, e \in E$$

$$\sum_{c=1}^n X_{cie} = \sum_{r=1}^n Y_{ire} + \sum_{d=1}^n Z_{ide}; \quad \forall i \in I, e \in E$$

$$\sum_{r=1}^n Y_{ire} \geq fmr \left(\sum_{c=1}^n X_{cie} * (1 - fpi) \right); \quad \forall i \in I, e \in E$$

$$\sum_{r=1}^n Y_{ire} \leq fpr \left(\sum_{c=1}^n X_{cie} * (1 - fpi) \right); \quad \forall i \in I, e \in E$$

$$X_{cie} \leq M * W_i; \quad \forall c \in C, i \in I, e \in E$$

$$Y_{ire} \leq M * W_i; \quad \forall i \in I, r \in R, e \in E$$

$$Z_{ide} \leq M * W_i; \forall i \in I, d \in D, e \in E$$

$$\sum_{i=1}^n W_i \leq N_{\max}$$

$$\sum_{d=1}^n W_d \leq NM_d$$

$$W_i, W_d \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall d \in D$$

$$X_{cie}, Y_{ire}, Z_{ide} \geq 0 \forall c \in C, \forall i \in I, \forall r \in R, \forall d \in D, e \in E$$

La formulación anterior, describe explícitamente las variables de decisión de segunda etapa para todos los escenarios considerados, por tanto, se encuentra expresada en su forma extensiva (Birge & Louveaux, 2011).

Para la modelación estocástica se introduce en la declaración del parámetro en estudio, un generador de números aleatorios a partir de los valores de la media y la desviación que describen el comportamiento de la cantidad de productos retornados anualmente en los puntos azules (Kara & Onut, 2010). Los demás datos de entrada del modelo se mantuvieron sin modificaciones. La programación del modelo estocástico se realizó también en GAMS Versión 25.0.3 con la misma configuración computacional de la solución determinística obtenida. El código empleado se presenta en el Anexo 3.

En los experimentos preliminares se consideró un número de escenarios distinto para la discretización de la función de probabilidad normal obteniendo un incremento en el tiempo computacional ante un incremento en el número de escenarios sin mejoras sustantivas en la matriz de pagos. Las diferencias obtenidas en los objetivos contemplados ante el cambio en el número de escenarios considerados: 5, 10, 20, 30, 40, 50, y 100 son inferiores a $\pm 0,01\%$. Por lo anterior, para efectos de presentar los resultados de la experimentación se consideró un conjunto

de 30 escenarios discretos para el parámetro P_c , cantidad de productos retornados en los puntos azules con igual probabilidad de ocurrencia (0,033).

De esta forma, se procede a aplicar el método de restricciones de épsilon aumentado para el nuevo problema, obteniendo la matriz de pagos que se presenta en la Tabla 26, y el conjunto de soluciones no dominadas con su respectiva calificación siguiendo las reglas de lógica difusa definidas previamente (Tablas 27 y 28).

Tabla 26.

Matriz de pagos del problema considerando incertidumbre

	F_1	F_2
Min F_1	395465226,8	6710,4
Min F_2	395466243,6	6194,1
Rango	1016,8	516,3

Tabla 27.

Conjunto de soluciones de Pareto y calificación de la solución aplicando lógica difusa.

Sub-problema	F_1	F_2	μ_1^r	μ_2^r	μ^r
1	395465226,8	6710,4	1	0	0,4000
2	395465247,5	6699,8	0,9796	0,0205	0,4042
3	395465268,3	6689,3	0,9592	0,0409	0,4082
4	395465289,0	6678,8	0,9388	0,0612	0,4123
5	395465309,8	6668,2	0,9184	0,0817	0,4164
6	395465330,5	6657,7	0,8980	0,1021	0,4205
7	395465351,3	6647,1	0,8776	0,1226	0,4246
8	395465372,0	6636,6	0,8572	0,1429	0,4286
9	395465392,8	6626,1	0,8367	0,1633	0,4327
10	395465413,5	6615,5	0,8164	0,1838	0,4368
11	395465434,3	6605,0	0,7959	0,2041	0,4409
12	395465455,0	6594,5	0,7756	0,2245	0,4449
13	395465475,8	6583,9	0,7551	0,2450	0,4491
14	395465496,5	6573,4	0,7348	0,2653	0,4531
15	395465517,3	6562,9	0,7143	0,2857	0,4571
16	395465538,0	6552,3	0,6939	0,3062	0,4613
17	395465558,8	6541,8	0,6735	0,3266	0,4653
18	395465579,5	6531,3	0,6531	0,3469	0,4694
19	395465600,3	6520,7	0,6327	0,3674	0,4735
20	395465621,1	6510,2	0,6122	0,3878	0,4775

Tabla 28.

Conjunto de soluciones de Pareto y calificación de la solución aplicando lógica difusa (continuación).

Sub-problema	F_1	F_2	μ_1^r	μ_2^r	μ^r
21	395465641,8	6499,7	0,5919	0,4081	0,4816
22	395465662,6	6489,1	0,5714	0,4286	0,4857
23	395465683,3	6478,6	0,5510	0,4490	0,4898
24	395465704,1	6468,0	0,5306	0,4695	0,4939
25	395465724,8	6457,5	0,5102	0,4898	0,4980
26	395465745,6	6447,0	0,4898	0,5102	0,5020
27	395465766,3	6436,4	0,4694	0,5307	0,5062
28	395465787,1	6425,9	0,4490	0,5510	0,5102
29	395465807,8	6415,4	0,4286	0,5714	0,5143
30	395465828,6	6404,8	0,4081	0,5919	0,5184
31	395465849,3	6394,3	0,3878	0,6122	0,5225
32	395465870,1	6383,8	0,3673	0,6326	0,5265
33	395465890,8	6373,2	0,3470	0,6531	0,5307
34	395465911,6	6362,7	0,3265	0,6734	0,5347
35	395465932,3	6352,2	0,3062	0,6938	0,5387
36	395465953,1	6341,6	0,2857	0,7143	0,5429
37	395465973,8	6331,1	0,2653	0,7347	0,5469
38	395465994,6	6320,6	0,2449	0,7550	0,5510
39	395466015,3	6310,0	0,2245	0,7755	0,5551
40	395466036,1	6299,5	0,2041	0,7959	0,5591
41	395466056,8	6288,9	0,1837	0,8164	0,5633
42	395466077,6	6278,4	0,1633	0,8367	0,5673
43	395466098,3	6267,9	0,1429	0,8571	0,5714
44	395466119,1	6257,3	0,1224	0,8776	0,5755
45	395466139,8	6246,8	0,1021	0,8979	0,5796
46	395466160,6	6236,3	0,0816	0,9183	0,5836
47	395466181,3	6225,7	0,0613	0,9388	0,5878
48	395466202,1	6215,2	0,0408	0,9591	0,5918
49	395466222,8	6204,7	0,0205	0,9795	0,5959
50	395466243,6	6194,1	0	1	0,6000

La Figura 23 muestra la representación del conjunto de soluciones eficientes que conforman la Frontera de Pareto, así como la solución con el valor máximo de $\mu^r = 0,6$, después de comparar las calificaciones μ^r .

La solución para el problema se obtiene a partir de la configuración asociada a la mayor calificación μ^r . De esta forma, la solución del sub-problema 50 indica que la red debe operar con un único centro de inspección y clasificación que corresponde a la ubicación potencial 2. Así mismo, el centro de incineración que debe usarse es el gestor RESPEL 1, obteniendo un costo de operación de \$ 395.466.243,6 para los costos fijos de apertura, operación y transporte de la red, y 6194,1 kg de emisiones de dióxido de carbono derivadas de las actividades de transporte e incineración de la red de logística inversa propuesta.

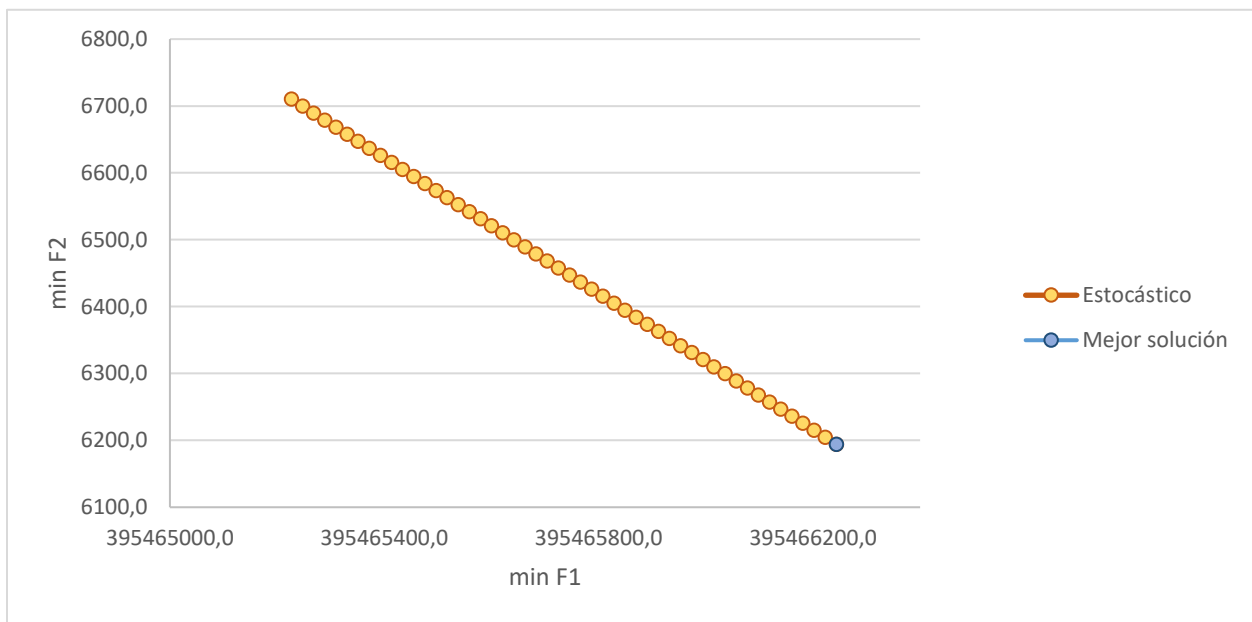


Figura 23. Frontera de Pareto y mejor solución para el problema multiobjetivo considerando incertidumbre.

7.4.3. Análisis comparativo entre la solución determinística y estocástica

La Figura 24 muestra que la mayor diferencia entre la solución estocástica y la determinística es en función de los costos de operación de la red, en tanto la diferencia en emisiones de CO₂ es despreciable.

El desempeño computacional del algoritmo estocástico y determinístico se ilustra en la Tabla 29, ante la discretización del parámetro: cantidad de productos retornados, empleando 30

escenarios para ello, se observa un incremento en el tiempo computacional atribuido al aumento en el número de iteraciones, variables y restricciones.

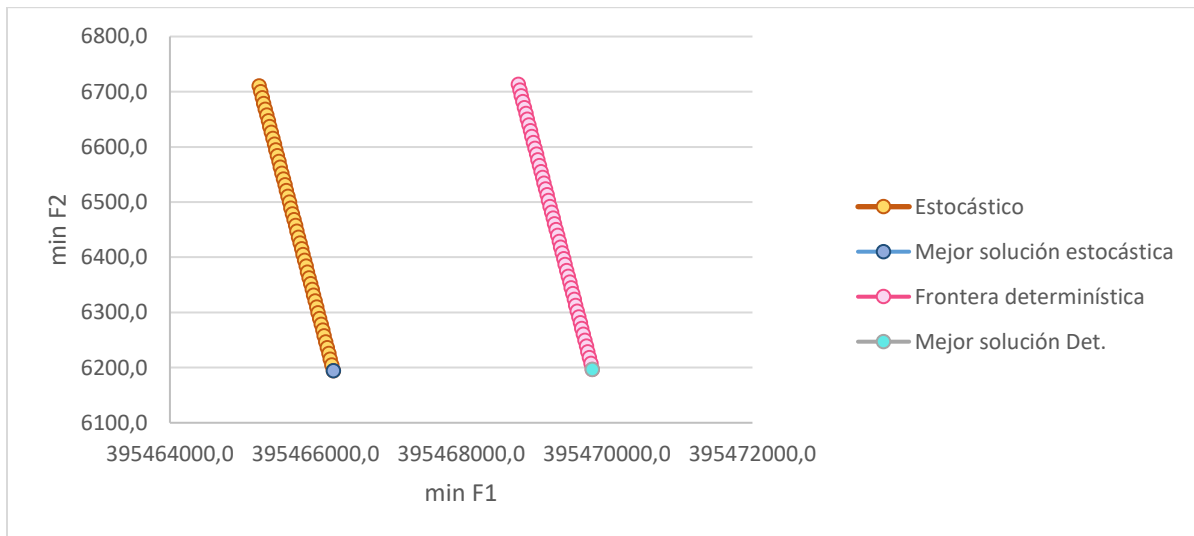


Figura 24. Comparación entre la frontera de Pareto determinística y estocástica para el problema multiobjetivo estudiado.

La configuración propuesta por el modelo estocástico coincide con la solución determinística. Toda vez que las variables de decisión binarias consideradas, asumen los mismos valores en ambas versiones. La diferencia fundamental se encuentra en el flujo entre instalaciones, lo que obedece a la aleatoriedad introducida en la experimentación respecto a la cantidad de productos retornados. La configuración de la red se ilustra en la Figura 25.

Tabla 29.

Cuadro comparativo del modelo determinístico y estocástico.

	Determinístico		Estocástico	
	Min F_1	Min F_2	Min F_1	Min F_2
Min F_1	395468784,8	6713,5	395465226,8	6710,4
Min F_2	395469802,3	6196,9	395466243,6	6194,1
Rango	1017,5	516,6	1016,8	516,3
Tiempo computacional	15,961 segundos		40,482 segundos	
Número de variables continuas	350		10500	
Número de variables enteras	13		13	
Número de restricciones	413		12332	

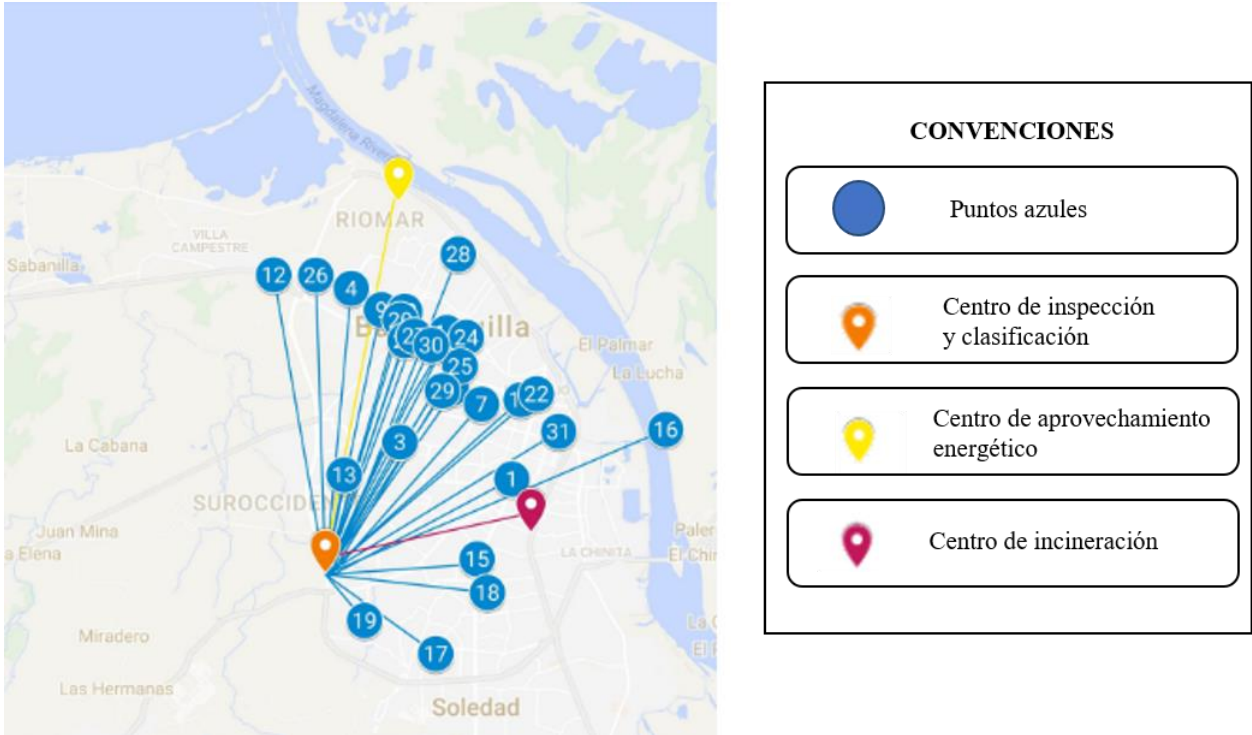


Figura 25. Configuración de la red de logística inversa de medicamentos posconsumo en la ciudad de Barranquilla

La exactitud de la aplicación del modelo estocástico utilizando escenarios discretos equiprobables se determinó a partir de dos métricas fundamentales: el valor de la información perfecta (EVPI) y el valor de la solución estocástica (VSS). A continuación, se presenta una descripción del procedimiento para su estimación. Tal metodología se encuentra definida para modelos que consideran un solo objetivo. Sin embargo, toda vez que, en la aplicación del método de restricciones de ϵ aumentado, el modelo se expresa en función de un solo objetivo principal, las consideraciones mencionadas a continuación siguen siendo válidas.

- **Valor de la información perfecta**

Para problemas de minimización³, el EVPI es la diferencia entre la programación estocástica (SP) y la solución WS (*wait-and-see*, o “espera y observa”): $EVPI = SP - WS$ (Birge &

³ Si el problema estudiado es de maximización, se invierten los términos en la ecuación.

Louveaux, 2011). En el enfoque WS cada escenario es resuelto por separado y la media de las funciones objetivo se considera como la solución WS (*wait-and-see solution*). Los resultados de este procedimiento iterativo son presentados en el Anexo 4, y el promedio de dichas funciones objetivo se consigna en la Tabla 30. El valor de la solución WS siempre será menor o igual a la solución estocástica si se está minimizando, lo que se cumple en el caso estudiado.

Tabla 30.

Matriz de pagos del problema WS

	F_1	F_2
Min F_1	395465226,7	6710,4
Min F_2	395466243,5	6194,1
Rango	1016,8	516,23

Nota: WS (*Wait-and-see*), se presenta la media de los valores obtenidos en cada escenario para la matriz de pagos.

Luego, al restar los valores de la solución estocástica y la solución WS, se obtienen los valores EVPI listados en la Tabla 31. El valor de la información perfecta representa el máximo valor que se estaría dispuesto a pagar para tener una información completa y exacta sobre el futuro (Birge & Louveaux, 2011).

Tabla 31.

EVPI del problema estudiado.

	F_1	F_2
Min F_1	0,1	0,0
Min F_2	0,1	0,0

No obstante, la solución iterativa de escenarios representa un gran trabajo que añade complejidad a la modelación dependiendo del número de escenarios considerados. Además, el enfoque WS implica la obtención de diferentes soluciones para el problema en estudio. Por tanto, se suele optar por reemplazar los parámetros aleatorios por sus valores esperados equivalentes. De esta forma, surge la necesidad de determinar el valor de la solución estocástica, cuyo procedimiento se describe a continuación.

- **Valor de la solución estocástica (VSS)**

Para calcular el VSS, primero se determina el valor promedio de cada parámetro estocástico considerado, en este caso, un único parámetro que corresponde al promedio de la cantidad de productos retornados en cada punto azul. Luego, se procede a resolver el modelo determinístico equivalente considerando este valor. Este enfoque en la literatura se conoce como enfoque del valor esperado (EV). Los resultados se presentan en la Tabla 32.

Posteriormente las variables de decisión de primera etapa determinadas a partir de la solución EV, se consideran como parámetros en el modelo determinístico equivalente para cada escenario (WS). Luego, se resuelve el problema de manera individual (30 problemas, uno por escenario), y se calcula el valor esperado del conjunto de problemas, que en este caso corresponde a la media de las matrices de pago obtenidas con la solución individual de cada escenario con los parámetros de primera etapa fijos.

Tabla 32.

Matriz de pagos del problema usando el enfoque del valor esperado (EV)

	F_1	F_2
Min F_1	395465226,3	6710,4
Min F_2	395466243,1	6194,1
Rango	1016,8	516,3

Así, las variables de segunda etapa son elegidas en función de la solución del enfoque de valor esperado (EV), empleando de esta forma, un método del tipo EEV (Valor esperado de utilizar la solución del modelo determinístico EV). Luego, la diferencia entre las funciones objetivo del programa estocástico y el enfoque EEV, será el valor de la solución estocástica (VSS): $VSS = SP - EEV$.

La solución obtenida al aplicar el procedimiento mencionado es presentada en la Tabla 33. En este caso la solución del problema EEV coincide con la solución del problema WS. Lo

anterior, se debe a que las variables de primera etapa que se fijan en los problemas WS, que representan la decisión de apertura del centro de inspección en la ubicación potencial #2 y la selección del centro de incineración #1, coinciden con la solución que los problemas WS iniciales suministran. De esta forma, la solución individual WS y la solución individual EV, son exactamente iguales para cada escenario analizado. Por tanto, el valor de la solución estocástica (VSS) es igual al valor de la información perfecta (EVPI).

Tabla 33.

Matriz de pagos del problema EEV

	F_1	F_2
Min F_1	395465226,7	6710,4
Min F_2	395466243,5	6194,1
Rango	1016,8	516,3

Analizando los resultados obtenidos se tiene que, la media de los objetivos de los 30 escenarios resueltos por separado es ligeramente mejor que la solución estocástica. Sin embargo, la solución estocástica proporciona un menor valor para las funciones objetivo que el obtenido a partir de la solución individual de cada escenario para la mayoría de estos (53,3%). Lo anterior, muy a pesar de proponer la misma configuración (Apertura de la instalación #2 como centro de inspección y clasificación, y selección de la alternativa #1 para la operación del centro de incineración). Por tanto, se infiere que las diferencias son atribuibles a las cantidades de productos retornados consideradas en los escenarios individuales, resultado de la incertidumbre.

Los indicadores usados: EVPI y VSS, permiten determinar si la forma en que el modelo estocástico incorpora la incertidumbre posee un impacto en las soluciones obtenidas (Noyan, 2012). De esta manera, un valor pequeño de la solución estocástica (VSS), como el obtenido, indica que la aproximación del modelo estocástico realizada a partir de la solución del modelo

bajo un enfoque de valor esperado, en lugar del uso de variables aleatorias, es buena (Escudero, Garín, Merino, & Pérez, 2007).

Además, la obtención de valores muy pequeños para los parámetros EVPI (valor de la información perfecta) y VSS (valor de la solución estocástica), puede atribuirse al uso de los mismos valores de μ y σ , en los parámetros de la distribución que siguen los datos para el caso determinístico y estocástico. Por tanto, para validar el efecto de la variabilidad, se procede a realizar un análisis de sensibilidad del modelo.

7.4.4. Análisis de Sensibilidad

A continuación, se estudiará la sensibilidad del modelo ante fluctuaciones en las cantidades retornadas en la red posconsumo. Para tal fin, se proponen dos niveles a analizar: incrementos del 20% (nivel pesimista) y 40% (nivel optimista), que coinciden con los niveles sugeridos por Pedram et al. (2017), los cuales serán resueltos utilizando el modelo determinístico equivalente para la media de los escenarios generados (enfoque EV). Lo anterior, considerando que, en el apartado anterior este enfoque demostró una gran aptitud en cuanto a su aproximación al modelo estocástico.

Un incremento en las cantidades recolectadas genera un incremento en los objetivos considerados, como puede observarse en las Figuras 26 y 27. Sin embargo, el impacto ejercido es mayor sobre las emisiones de CO₂, con incrementos del orden de 13,52% por cada 20% de aumento en las cantidades retornadas (Tabla 34).

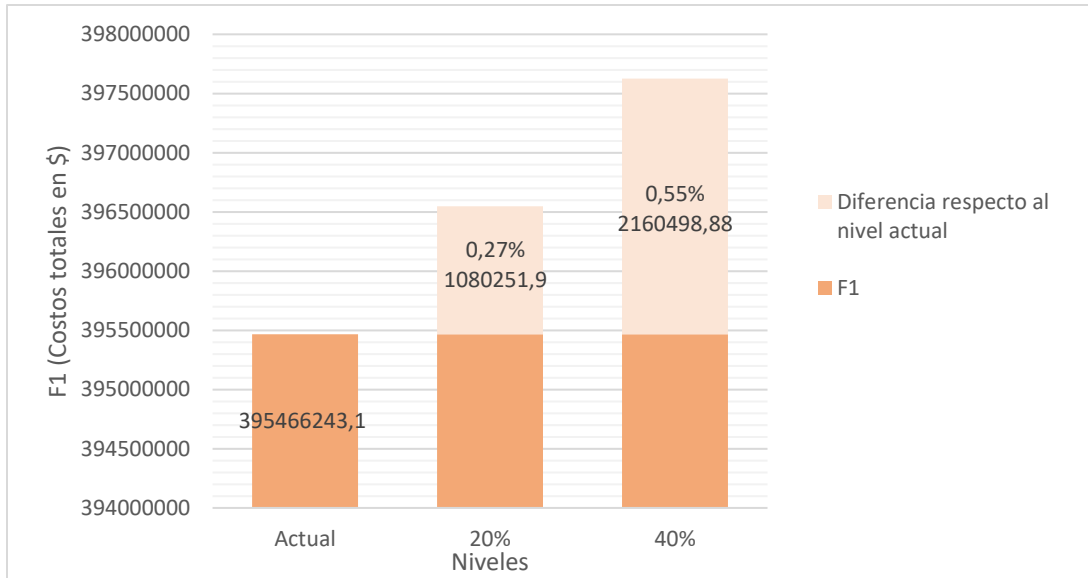


Figura 26. Variación de los costos totales (F₁) ante fluctuaciones de las cantidades retornadas

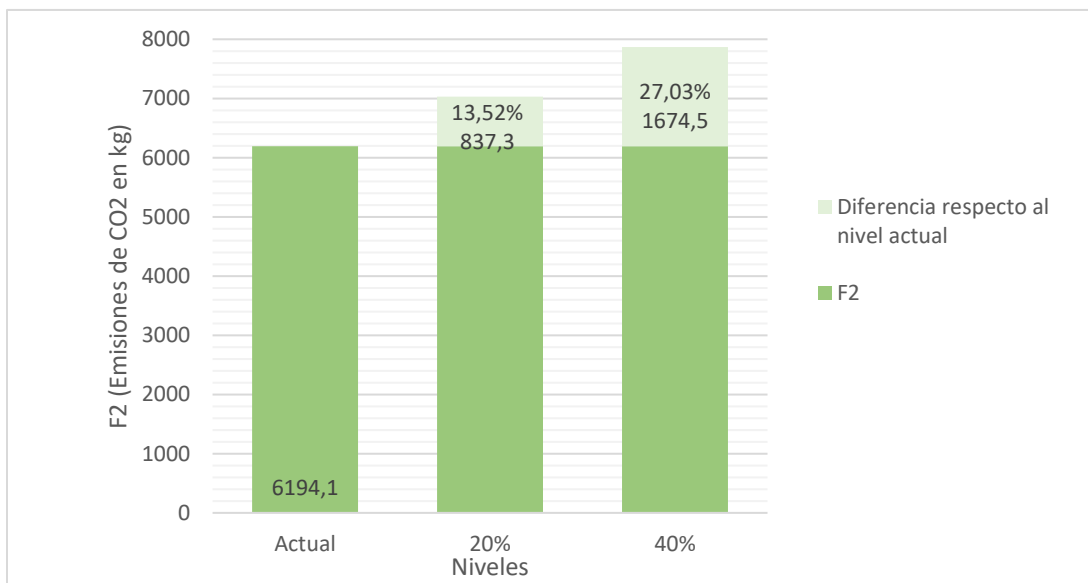


Figura 27. Variación de las emisiones de CO₂ (F₂) ante fluctuaciones en las cantidades retornadas.

La diferencia en el efecto del parámetro estudiado sobre las dos funciones objetivo consideradas, se debe a que en el caso de la función de costos (F_1), la configuración de la red sigue siendo la misma para los dos niveles, lo que genera que los elementos fijos del costo (costo de apertura y selección de instalaciones de inspección e incineración) no se vean afectados por la variabilidad en la cantidad retornada, así como el elemento dependiente de la distancia en los

costos de transporte. De esta forma, las fluctuaciones son atribuibles a los costos variables de procesamiento y al elemento variable del costo de transporte que se encuentra involucrado en el cálculo.

Tabla 34.
Cuadro comparativo de la variación de las funciones objetivo respecto a las cantidades retornadas.

Nivel	F ₁ (Costos totales)		F ₂ (Emisiones de CO ₂)	
	(\$)	Diferencia respecto al nivel actual	Emisiones (kg)	Diferencia respecto al nivel actual
Actual	395466243		6194,10	
+20%	396546495	0,27%	7031,40	13,52%
+40%	397626742	0,55%	7868,64	27,03%

Por tanto, la presencia de elementos fijos en la primera función objetivo (F_1), ocasiona que el efecto de las cantidades recolectadas no sea significativo (del orden de 0,27% por cada 20% de incremento en las cantidades retornadas).

Profundizando un poco más en este punto, se contempló un tercer nivel con un incremento del parámetro medio del 60%. Como resultado, el modelo deja de ser factible, ya que se viola la restricción que hace referencia a la capacidad del vehículo empleado para el transporte. Sin embargo, con una variación de 1000 kg en la capacidad de este (pasando de 4000 kg a 5000 kg), el modelo genera el conjunto de soluciones de Pareto, proponiendo la misma configuración de la red. Para eliminar este incumplimiento de la restricción de capacidad de transporte, también podría aumentarse el número de vehículos disponibles.

La ausencia de un cambio en la configuración se debe a que la alternativa 2, representa el menor costo fijo entre el conjunto de instalaciones consideradas en la formulación. Lo que conduce a que resulte interesante la evaluación de la influencia de dicho parámetro en la solución propuesta.

Para tal fin, se proceden a generar nuevos valores por m² para las ubicaciones potenciales, a partir de números pseudoaleatorios derivados de un intervalo. El límite inferior del intervalo se encuentra definido por el mínimo valor por m² observado en el parámetro costo fijo de apertura de instalaciones (\$1.300.000) y el límite superior corresponde al mayor valor (\$3.611.111), costos contemplados en la Tabla 9. Se definieron dos réplicas (precio 1 y precio 2) utilizando para ello una hoja de cálculo de Microsoft Excel® y el comando *ALEATORIO.ENTRE*.

Los nuevos costos fijos y los valores actuales considerados se encuentran en la Tabla 35. En negrita se identifican los menores costos de apertura de instalaciones para cada caso.

Tabla 35.
Variación del parámetro costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación.

i	Precio actual	Precio 1	Precio 2
1	\$ 661.417.323	\$415.335.600	\$498.291.600
2	\$ 390.000.000	\$522.620.700	\$769.133.700
3	\$ 688.524.590	\$655.492.200	\$1.082.891.400
4	\$ 656.692.913	\$941.466.600	\$411.386.700
5	\$ 630.000.000	\$1.006.738.800	\$1.063.977.300
6	\$ 1.083.333.333	\$494.326.500	\$1.023.749.700
7	\$ 675.000.000	\$574.845.000	\$652.732.800
8	\$ 825.000.000	\$697.250.700	\$757.056.900
9	\$ 919.354.839	\$425.626.500	\$642.203.100
10	\$ 916.666.667	\$983.204.100	\$1.075.294.800

Luego de la solución del modelo determinístico EV, considerando ambos escenarios (precio 1 y precio 2), la configuración de la red cambia. En el primer caso, el modelo selecciona la ubicación #1, como la idónea para el funcionamiento del centro de inspección y clasificación, y la alternativa correspondiente al gestor RESPEL #2. El costo de la red para esta nueva configuración es de \$420.795.919,1; lo que significa una diferencia porcentual de +6,4% respecto a la configuración actual. Para el segundo caso considerado, el modelo selecciona la ubicación #4, para el funcionamiento del centro de inspección, y la alternativa correspondiente al

gestor RESPEL #2, incurriendo en unos costos de operación de \$416.848.061,2; lo que implica una diferencia de +5,4% sobre el costo de la configuración actual.

La evidencia apunta a que el costo fijo de apertura de instalaciones de una red influye significativamente sobre su potencial configuración. Sin embargo, el análisis presentado anteriormente estudia de manera independiente los dos factores contemplados, y no proporciona una confiabilidad estadística para hacer inferencias sobre su comportamiento. Además, en la práctica puede existir algún tipo de interacción en los parámetros considerados, que generen un efecto mayor o menor en conjunto sobre las funciones objetivo consideradas.

Por tanto, se formula un diseño factorial 3x2 (dos factores, con tres niveles el primero y 2 niveles el segundo) con una sola réplica para la evaluación del efecto de las cantidades retornadas y los costos fijos de apertura de instalaciones en la optimización de los dos objetivos de la modelación, utilizando el software Statgraphics® Centurion versión 17.2.00 (Romero-Conrado, Suárez-Agudelo, Macías-Jiménez, Gómez-Charris, & Lozano-Ayarza, 2017).

En la Tabla 36 se indican los factores en estudio con sus respectivos niveles de experimentación; en tanto que en la Tabla 37 se ilustran los resultados después de correr el modelo siguiendo la configuración descrita en cada tratamiento. Los valores de las funciones objetivo F_1 y F_2 consignados, corresponden a la mejor solución después de la evaluación del conjunto de soluciones eficientes de Pareto.

Tabla 36.
Factores y niveles por analizar a través del diseño factorial

Factor	Niveles	Equivalencias en el software
Cantidades retornadas	Valor actual	-1
	Pesimista (+20%)	0
	Optimista (+40%)	1
Precio	Valor actual	-1
	Precio pseudoaleatorio	1

Tabla 37.

Resultados del diseño experimental

P(c)	Costo fijo	F1	F2
Pesimista (+20%)	Pseudoaleatorio	\$421.874.986,2	7031,38
Optimista (+40%)	Pseudoaleatorio	\$422.954.048,4	7868,64
Optimista (+40%)	Valor actual	\$397.626.742,0	7868,64
Valor actual	Valor actual	\$395.466.243,1	6194,10
Valor actual	Pseudoaleatorio	\$420.795.919,1	6194,13
Pesimista (+20%)	Valor actual	\$396.546.495,0	7031,38
Optimista (+40%)	Pseudoaleatorio*	\$419.006.607,4	7868,64
Optimista (+40%)*	Valor actual*	\$399.144.934,6	9045,34
Valor actual	Pseudoaleatorio*	\$416.848.061,2	6194,13
Pesimista (+20%)	Pseudoaleatorio*	\$417.927.336,8	7031,38
Valor actual*	Valor actual*	\$395.469.802,3	6196,90
Pesimista (+20%)*	Valor actual*	\$396.550.929,8	7034,84

Nota: Valores con asterisco (*) en la columna P(c), corresponden a la réplica. El Valor actual* utilizado fue el mismo del caso determinístico, y sus incrementos porcentuales: Pesimista (+20%)* y Optimista (+40%)*. En la columna costo fijo, el nivel Pseudoaleatorio*, corresponde a la réplica generada utilizando la misma metodología de generación indicada previamente (correspondiente al precio 2), y el Valor actual* corresponde al costo fijo de apertura de instalaciones de inspección del modelo determinístico, que coincide con los costos fijos del modelo basado en enfoque EV.

- **Efecto de los factores sobre F_1**

Para validar el efecto de los factores estudiados en la función objetivo F_1 , se procedió a ejecutar un análisis de varianza, cuyos resultados pueden ser consultados en detalle en la Tabla 38. De acuerdo con este análisis, se confirmó que el factor: costo fijo de apertura de instalaciones de inspección y clasificación, presenta un efecto significativo sobre los costos totales con un nivel de confianza del 95%, al obtener un valor-p menor que 0,05. En tanto que, la cantidad de productos retornados posee un efecto despreciable sobre la primera función objetivo considerada (F_1). Lo anterior, puede ser constatado gráficamente en la Figura 28.

Por otro lado, al analizar los factores simultáneamente (AB), se observa que no poseen un efecto significativo sobre la variable de respuesta (F_1). Los estadísticos R-cuadrado (99,0387%) y R cuadrado ajustado (98,2375%) obtenidos indican que el modelo explica de manera adecuada la variabilidad de F_1 .

Tabla 38.

Análisis de varianza del efecto de los factores sobre F_1

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Cantidad retornada	1,28837E13	1	1,28837E13	4,91	0,0687
B: Costo fijo	1,60087E15	1	1,60087E15	609,70	0,0000
AA	9,53647E10	1	9,53647E10	0,04	0,8551
AB	2,88403E11	1	2,88403E11	0,11	0,7516
Bloques	8,86963E12	1	8,86963E12	3,38	0,1157
Error total	1,57541E13	6	2,62569E12		
Total (corr.)	1,63876E15	11			

Nota: R-cuadrada = 99,0387 por ciento. R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 98,2375 por ciento. Error estándar del est. = 1,6204E6. Error absoluto medio = 1,11409E6. Estadístico Durbin-Watson = 2,1591 (P=0,5268). Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,14555.

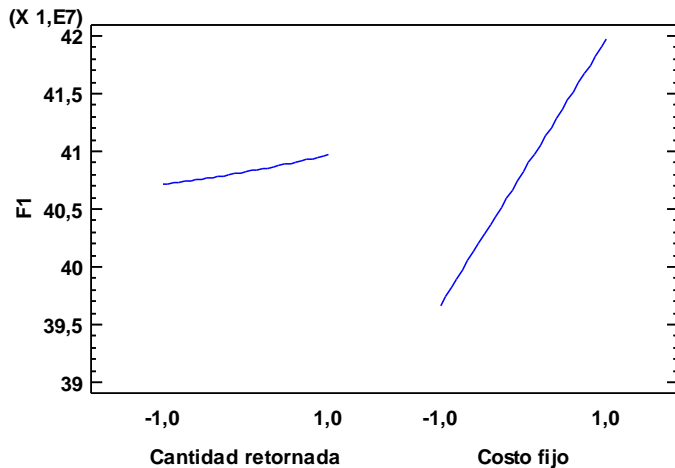


Figura 28. Gráfico de efectos principales para F_1

- **Efecto de los factores sobre F_2**

Los resultados del análisis de varianza para F_2 , son presentados en la Tabla 39. De acuerdo con el análisis ejecutado, se confirmó que el factor: cantidad de productos retornados, presenta un efecto significativo sobre las emisiones de CO_2 de la red, con un nivel de confianza del 95%, al obtener un valor-p menor que 0,05.

Lo anterior, puede ser constatado gráficamente en la Figura 29, en donde además se evidencia que, a mayor número de cantidades retornadas, mayor serán las emisiones de CO_2 . No obstante,

esta misma conclusión no puede realizarse para los costos fijos, toda vez que los niveles definidos se encuentran en el mismo intervalo de precios.

Tabla 39.
Análisis de varianza del efecto de los factores sobre F_2

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Cantidad retornada	7,74605E6	1	7,74605E6	73,42	0,0001
B: Costo fijo	116604,	1	116604,	1,11	0,3336
AA	57287,4	1	57287,4	0,54	0,4890
AB	172273,	1	172273,	1,63	0,2485
Bloques	116616,	1	116616,	1,11	0,3336
Error total	632989,	6	105498,		
Total (corr.)	8,84182E6	11			

Nota: R-cuadrada = 92,841 por ciento. R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 86,8751 por ciento. Error estándar del est. = 324,805. Error absoluto medio = 163,4. Estadístico Durbin-Watson = 2,25185 (P=0,6088) Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,186259

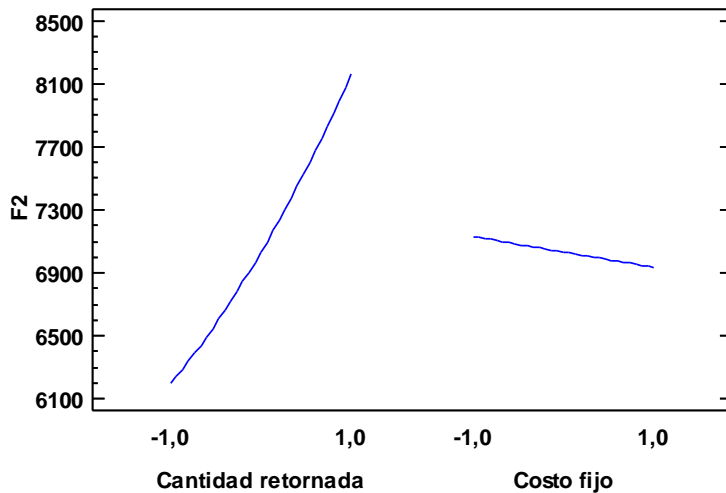


Figura 29. Gráfico de efectos principales para F_2

Por otro lado, al analizar los factores simultáneamente (AB), se observa que no poseen un efecto significativo sobre la variable de respuesta (F_2). Los estadísticos R-cuadrado (92,841%) y R cuadrado ajustado (86,8751%) obtenidos, indican que el modelo explica de manera adecuada la variabilidad de F_2 .

Para garantizar un análisis confiable de los resultados, se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, a través de pruebas gráficas de residuos vs. predichos y probabilidad normal para los residuos, las cuales pueden ser consultadas en detalle en el Anexo 5.

8. Conclusiones

El diseño de redes de logística inversa es una actividad esencial para contribuir a la recuperación de valor y a la mitigación del impacto ambiental generado por los residuos derivados de la operación de cadenas de suministro. A partir de la revisión del estado del arte realizada, fue posible identificar la importancia de los problemas relacionados con el diseño y planeación de redes de logística inversa, y las técnicas de modelamiento y solución más utilizadas. Así mismo, se logró determinar que las tendencias para abordar estos problemas sugieren la incorporación de consideraciones de tipo económico y ambiental, así como la incertidumbre asociada a los flujos de retorno de productos.

Lo anterior, permitió establecer la ruta de acción para la modelación de un problema que involucra una cadena de suministro de flujo inverso. De esta manera, se formuló un modelo de programación lineal entero mixto para definir la configuración de una cadena de suministro inversa considerando dos objetivos: la minimización de los costos totales, que incluyen costos fijos de apertura y selección de instalaciones, costos variables de procesamiento y costos de transporte en la red; del mismo modo que la minimización de las emisiones de dióxido de carbono asociadas a las actividades de incineración y transporte.

La validación del modelo matemático a partir de la aplicación al programa posconsumo de medicamentos vencidos, permitió definir la configuración de la red para su funcionamiento de manera independiente en la ciudad de Barranquilla. El sector farmacéutico es uno de los más importantes a nivel global y local, por tanto, tales decisiones contribuirán a mejorar los índices de rendimiento de la red, y las labores de disposición de estos residuos, considerados por la normatividad colombiana como peligrosos.

La mayor contribución del trabajo se fundamenta en el enfoque de solución utilizado, el cual integra dos métodos de solución multiobjetivo, como son el método lexicográfico y el método de restricciones de ϵ aumentado, así como, la consideración de la incertidumbre asociada a la cantidad de productos retornados, a través de diferentes enfoques: estocástico (SP), valor esperado de utilizar la solución del modelo determinístico medio (EEV) y *wait-and-see* (WS).

El enfoque multiobjetivo utilizado para la formulación y solución del modelo permitió integrar aspectos ambientales y económicos para la obtención del conjunto de soluciones no dominadas que integran la frontera de Pareto, y la búsqueda de la mejor solución a partir de la calificación sistemática del conjunto de soluciones candidatas, utilizando una serie de reglas basadas en lógica difusa. En tanto que, el modelo estocástico propuesto demostró ligeras mejoras respecto a los valores de las funciones objetivo, obtenidas en la solución individual de los escenarios considerados.

No obstante, a partir de los resultados del valor de la información perfecta y el valor de la solución estocástica, se puede concluir que el enfoque de valor esperado (EV) cuando se considera incertidumbre en la cantidad retornada, permite modelar de manera apropiada la variabilidad, reduciendo el tiempo computacional empleado para tal fin, y proporcionando una muy buena aproximación de la solución estocástica.

Así mismo, se evidenció a partir de un análisis de varianza, que la variabilidad en las cantidades retornadas, posee un efecto significativo sobre las emisiones de dióxido de carbono, en tanto que su impacto en los costos de operación de la red es mucho menor, cuando se contemplan decisiones de tipo estratégico (apertura y localización de instalaciones). Por tanto, la consideración de la incertidumbre debida a esta fuente permite una toma de decisiones integral, en donde la criticidad de las variables de decisión asociadas con la configuración de la red en

este sector recae sobre el costo de apertura de instalaciones, y en menor medida en la capacidad de procesamiento de estas y de la flota de transporte. De esta manera, el reducido efecto de las fluctuaciones en las cantidades retornadas sobre la configuración puede ser resuelto a través de un incremento en el número de vehículos utilizados en la red, o con un aumento en la periodicidad de las labores de recolección y envío a nodos de la cadena.

Trabajos futuros podrían consistir en la exploración de nuevos objetivos en problemas de esta índole, como el consumo energético o las emisiones atmosféricas de otros gases provenientes de otras fuentes de emisión. También, representa una gran oportunidad, la solución del modelo a través del uso de heurísticas que permitan mejorar la eficiencia computacional, así como la selección de otros sectores de aplicación para definir la configuración de la red. En particular, resulta interesante la extensión a otros programas priorizados por el gobierno nacional como las iniciativas posconsumo de baterías de litio, llantas, bombillos, entre otros.

Independientemente del caso seleccionado, consideraciones frente a la disponibilidad de información podrían desencadenar en la recolección de datos a partir de fuentes primarias, utilizando entrevistas o cuestionarios a instituciones involucradas, para definir el comportamiento de la generación de residuos en ese sector y generar un inventario de emisiones, con el propósito de establecer planes para la implementación de actividades de logística inversa.

Finalmente, la discretización de la función de probabilidad normal utilizada en el modelo planteado permitió acotar el número de posibles valores que puede tomar el parámetro en estudio, y modelar bastante bien su comportamiento. Sin embargo, en futuros trabajos podría considerarse la programación estocástica utilizando distribuciones continuas con otros solucionadores que soporten este tipo de funciones, u otros entornos de modelación.

9. Bibliografía

- A. Narayana, S., A. Elias, A., & K. Pati, R. (2014). Reverse logistics in the pharmaceuticals industry: a systemic analysis. *The International Journal of Logistics Management*, 25(2), 379–398. <http://doi.org/10.1108/IJLM-08-2012-0073>
- Abbas, H., & Farooque, J. A. (2013). Return and Disposal of Unused Medicines: A Customer Perspective of Reverse Logistics. *International Journal of Business and Management Invention*, 2(11), 2319–8028. Retrieved from www.ijbmi.org
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015a). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015b). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76–92. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Alcaldía de Barranquilla. (2018). Barranquilla en Cifras: Estructura económica de Barranquilla y el reto de formular una estrategia de ciudad pertinente.
- Amin, S. H., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316–330. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>
- Arroyo, P., Villanueva, M., Gaytán, J., & García, M. (2014). Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos. Un modelo de dinámica de sistemas para la red de logística inversa. *Contaduría Y Administración*, 59(1), 9–41. [http://doi.org/10.1016/S0186-1042\(14\)71242-2](http://doi.org/10.1016/S0186-1042(14)71242-2)
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., & Peng, Q. (2016). Multi-objective optimisation of

facility location decisions within integrated forward/reverse logistics under uncertainty.

International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling, 8(3), 250–276. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.092>

Asociación de Fabricantes de Cemento Portland. (2015). CO PROCESAMIENTO EN LA

INDUSTRIA DEL CEMENTO. Buenos Aires. Retrieved from

<http://www.actualizarmiweb.com/sites/afcp->

[com/publico/coprocesamiento/Coprocesamiento.pdf](http://www.actualizarmiweb.com/sites/afcp-com/publico/coprocesamiento/Coprocesamiento.pdf)

Bazan, E., Jaber, M. Y., & El Saadany, A. M. A. (2015). Carbon Emissions and Energy Effects

on Manufacturing-Remanufacturing Inventory Models. *Computers & Industrial*

Engineering, 88, 307–316. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.002>

Bazan, E., Jaber, M. Y., & Zanoni, S. (2015). A review of mathematical inventory models for

reverse logistics and the future of its modelling: An environmental perspective. *Applied*

Mathematical Modelling, 0, 1–28.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2015.11.027>

Benavides Ballesteros, H. O., & León Arístizabal, G. E. (2007). *Nota técnica del IDEAM:*

Información Técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático. Retrieved from

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>

Bhuyar, L. B., & Shahare, A. S. (2013). Reverse Logistic Model Design Nagpur Railway

Station: A Case Study. *Journal of Engineering Research and Studies*, IV(I).

Birge, J. R., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. (Springer Series

in Operations Research and Financial Engineering, Ed.) (Second Edi). New York: Springer.

<http://doi.org/10.1007/978-1-4614-0237-4>

Bloemhof-Ruwaard, J. M., Van Wassenhove, L. N., Gabel, H. L., & Weaver, P. M. (1996). An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry.

Omega, 24(6), 615–629. [http://doi.org/10.1016/S0305-0483\(96\)00026-6](http://doi.org/10.1016/S0305-0483(96)00026-6)

Branke, J., Deb, K., & Miettinen, K. (2008). *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*.

Cabeza, D. (2012). *Logística inversa en la gestión de la cadena de suministro*. Marge Books.

Campos, E. A. R. de, Paula, I. C. de, Pagani, R. N., & Guarnieri, P. (2017). Reverse logistics for the end-of-life and end-of-use products in the pharmaceutical industry: A systematic literature review. *Supply Chain Management: An International Journal*, 22(4), 375–392.

<http://doi.org/10.1108/SCM-01-2017-0040>

Cannella, S., Bruccoleri, M., & Framinan, J. M. (2016). Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance? *International Journal of Production Economics*, 175, 35–49.

Cardoso, S. R., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., & Relvas, S. (2013). Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 226(3), 436–451.

Castillo Ramírez, M., Martínez Burgos, W., & Parody Muñoz, A. (2018). *Generación de residuos peligrosos en Barranquilla (Años 2009-2014)*. Retrieved from https://books.google.com.co/books?id=TC9MDwAAQBAJ&pg=PA34&lpg=PA34&dq=medicamentos+posconsumo+barranquilla&source=bl&ots=eL0MNjubha&sig=r45147Tqp6hSi sR4hjOb_e_L-YU&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiW1NbG8enZAhVBpFkKHRk6DUk4ChDoAQhZMAg

#v=onepage&q&f=false

Cely Torres, A. (2013). Importancia de la logística inversa para un desarrollo sostenible en

Colombia. *Gestión Y Sociedad*, 6(2), 113–126. Retrieved from

<http://revistas.lasalle.edu.co/index.php/gs/article/viewFile/2840/2382>

Cobos, F. E., & Cisneros, J. F. (2017). Manejo de desechos farmacéuticos de origen doméstico.

Estudio en la Parroquia Gil Ramírez Dávalos en Cuenca-Ecuador. *Revista de La Facultad de Ciencias Químicas*, 17, 29–40.

Committee on Understanding the Global Public Health Implications of Substandard, Falsified,

and C. M. P., Institute of Medicine;, & Board on Global Health. (2013). *The Magnitude of the Problem*. National Academies Press (US). Retrieved from

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK202527/>

Conforti, M., Cornuéjols, G., & Zambelli, G. (2014). *Integer Programming*. (Springer, Ed.).

<http://doi.org/10.1007/978-3-319-11008-0>

Contreras Castañeda, E. D., & Silva Rodríguez, J. D. (2014). Logística inversa usando

simulación en la recolección de envases de plaguicidas : Estado del arte. *Revista Ingeniería Industrial*, 1, 33–50.

Corporación Punto Azul. (n.d.). Informe de Sostenibilidad / Punto Azul. Retrieved April 23,

2018, from http://puntoazul.com.co/informe_de_sostenibilidad/?page=presentacion

Corporación Punto Azul. (2014). Memorias: Primer Encuentro Internacional de Programas de

Posconsumo de Medicamentos 2014. Retrieved from

http://www.responsabilidadintegral.org/documentos/taller_fortalecimiento_seguridad_producto/10_Ecopunto_Programa_Punto_Azul.pdf

Corporación Punto Azul. (2015). *Informe de Gestión (Asamblea General Ordinaria N°2)*.

Retrieved from <http://puntoazul.com.co/wp-content/uploads/2015/04/Informegestion070415.pdf>

Corporación Punto Azul. (2017a). *¿Quiénes Somos?* - Punto Azul. Retrieved February 4, 2018, from <http://puntoazul.com.co/quienes-somos/>

Corporación Punto Azul. (2017b). *Informe de Actualización y Avances - Plan de devolución de productos posconsumo de fármacos o medicamentos vencidos.*

Corporación Punto Azul. (2017c). *Informe de Sostenibilidad.*

Corporación Punto Azul. (2017d). *Informe de sostenibilidad, responsabilidad social y transparencia 2017.*

Corporación Punto Azul. (2018a). *Memorias: Asamblea general de asociados N° 6.* Retrieved from http://puntoazul.com.co/wp-content/uploads/2018/04/asamblea_mar_18.pdf

Corporación Punto Azul. (2018b). *Ubica tu Punto Azul* - Punto Azul. Retrieved April 28, 2018, from <http://puntoazul.com.co/donde-estamos-3/>

Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 930–939. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.041>

De la Arada Juárez, M. (2015). *Optimización de la cadena logística.*

Debesa García, F., Fernández Argüelles, R., & Pérez Peña, J. (2004). La caducidad de los medicamentos: justificación de una duda. *Revista Cubana de Farmacia*, 38(3). Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-75152004000300010

Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Rellenos sanitarios de 321 municipios colapsarán en cinco años, advierte el DNP.* Retrieved February 4, 2018, from <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Rellenos-sanitarios-de-321-municipios-colapsarán-en->

cinco-años,-advier-te-el-DNP--.aspx

Departamento Nacional De Planeación. (2014). Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. *Departamento Nacional De Planeación*, 861.

Escudero, L. F., Garín, A., Merino, M., & Pérez, G. (2007). The value of the stochastic solution in multistage problems. *TOP*, 15(1), 48–64. <http://doi.org/10.1007/s11750-007-0005-4>

Favela Ávila, H., Ojeda Benítez, S., & Lozano Olvera, G. (2009). Cuantificación de residuos sólidos domésticos peligrosos generados en dos periodos estacionales. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 12.

FEDESARROLLO, & Cámara de la Industria Farmacéutica de la ANDI. (2015). *Informe del Sector Farmacéutico*. Bogotá. Retrieved from http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/2481/Repor_Julio_2015_Fedesarrollo_y_ANDI.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Finca Raiz. (2018). www.fincaraiz.com.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. a. E. E., & Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1–17. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00230-0](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0)

Flórez, L., Toro, E., & Granada, M. (2012). Diseño de Redes de Logística Inversa: Una Revisión del Estado del Arte y Aplicación Práctica. *CIENCIA E INGENIERÍA NEOGRANADINA*, 22(2), 153–177.

Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1993). Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference*, (July).

- Garzón Ramírez, M. A., & Hernández Losada, D. F. (2014). Localización económica de los puntos de recolección de medicamentos vencidos en Bogotá. *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014) "Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity"*, 1–10.
- Gómez Montoya, R. A. (2010). Logística inversa un proceso de impacto ambiental y productividad. *Producción+Limpia*, 5(2), 1–14. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=79660780&lang=es&site=ehost-live>
- Govindan, K., & Soleimani, H. (2016). A review of Reverse Logistics and Closed-Loop Supply Chains: A Journal of Cleaner Production Focus. *Journal of Cleaner Production*. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.126>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(FEBRUARY), 603–626.
- Hugos, M. H. (2010). *Essentials of Supply Chain Management*. John Wiley & Sons.
- IPCC. (2001). *Orientación del IPCC sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Retrieved from https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/5_Waste_ES.pdf
- IPCC. (2006). Chapter 3: Mobile Combustion 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. In N. T. and T. K. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. (Ed.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IGES, Japan. Retrieved from https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf

- Jayant, A. (2012). Reverse Logistics : Perspectives , Empirical Studies and. *International Journal of Industrial Engineering*, 19(10), 369–388.
- Kara, S. S., & Onut, S. (2010). A stochastic optimization approach for paper recycling reverse logistics network design under uncertainty. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 7(4), 717–730. <http://doi.org/10.1007/BF03326181>
- Kaut, M., & Wallace, S. W. (2007). Evaluation of Scenario-Generation Methods for Stochastic Programming Evaluation of scenario generation methods for stochastic programming. *Pacific Journal of Optimization*, 3(2), 257–271. <http://doi.org/--->
- Kim, I. Y., & de Weck, O. (2005). Adaptive Weighted Sum Method for Bi-objective Optimization. *Structural Multidisciplinary Optimization*, 29(April), 149–158. Retrieved from [http://web.mit.edu/deweck/www/PDF_archive/2 Refereed Journal/2_12_SMO_AWSMOO1_deWeck_Kim.pdf](http://web.mit.edu/deweck/www/PDF_archive/2%20Refereed%20Journal/2_12_SMO_AWSMOO1_deWeck_Kim.pdf)
- Kim, I. Y., & De Weck, O. L. (2006). Adaptive weighted sum method for multiobjective optimization: A new method for Pareto front generation. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 31(2), 105–116. <http://doi.org/10.1007/s00158-005-0557-6>
- Kim, J., Chung, B. Do, Kang, Y., & Jeong, B. (2018). Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1314–1328. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.157>
- Kongar, E., Haznedaroglu, E., Abdelghany, O., & Bahtiyar, M. O. (2015). A novel IT infrastructure for reverse logistics operations of end-of-life pharmaceutical products. *Information Technology and Management*, 16(1), 51–65. <http://doi.org/10.1007/s10799-014-0195-z>
- Liao, H., & Deng, Q. (2018). EES-EOQ model with uncertain acquisition quantity and market

- demand in dedicated or combined remanufacturing systems. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 135–167. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2018.07.026>
- Lieckens, K., & Vandaele, N. (2010). Multi-Level Reverse Logistics Network Design Under Uncertainty. *International Journal of Production Research*, (April), 37–41.
- Listes, O. (2002). A decomposition approach to a stochastic model for supply-and-return network design. *Erasmus*, (2000), 1–27.
- Listes, O., & Dekker, R. (2005). A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1), 268–287. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2001.12.001>
- Marler, R. T., & Arora, J. (2004). Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 26(November 2014), 368–395. <http://doi.org/10.1007/s00158-003-0368-6>
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ε -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455–465. <http://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.037>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto Numero 4741 De 2005 (2005). Retrieved from http://www.andi.com.co/es/PC/SobProANDI/Documentos Sobre Procultivos ANDI/Decreto4741_2005_residuos_peligrosos.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Programas Posconsumo de Residuos.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Colombia celebra Día Mundial del Reciclaje | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved January 26, 2017, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=1793:colombia-celebra-dia-mundial-del-reciclaje>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Positivo balance en primer día de jornada posconsumo en la Amazonia | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Retrieved February 4, 2018, from

<http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/122-noticias-minambiente/3162-positivo-balance-en-primer-dia-de-jornada-posconsumo-en-la-amazonia>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial. Resolución Número 0371: Elementos que deben ser considerados en los Planes de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo de

Fármacos o Medicamentos Vendidos (2009). Retrieved from

http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Programa_posconsumo_existente/Resolucion_371_de_2009_-_Devolucion_medicamentos_vencidos.pdf

Ministerio de Medio Ambiente, & Ministerio de Salud. Resolución 001164 de 2002 Por la cual se adopta el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de los residuos hospitalarios y similares, Pub. L. No. 1164 (2002). Retrieved from

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=36291>

Ministerio de Transporte. (n.d.). Modelo para la determinación de costos de referencia.

Ministerio de Transporte. Decreto 1609 del 31 de julio de 2002 (2002).

Ministerio de Transporte. (2018). Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga.

Mollaei, F., & Makui, A. (2013). A mathematical model for a reverse logistic system of chemical remanufacturing PET waste with supply uncertainty: A case study of Tehran recycling organization. *Uncertain Supply Chain Management*, 1, 99–106.

<http://doi.org/10.5267/j.uscm.2013.06.001>

- Noyan, N. (2012). Risk-averse two-stage stochastic programming with an application to disaster management. *Computers & Operations Research*, 39(3), 541–559.
<http://doi.org/10.1016/j.cor.2011.03.017>
- Obredor-Baldovino, T., Barcasnegras-Moreno, E., Mercado-Caruso, N., Salas-Navarro, K., & Sana, S. S. (2018). Coverage Reduction: A Mathematical Model. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 17(3), 317–331. <http://doi.org/10.1142/S0219686718500191>
- Osorio Muriel, A. F., Brailsford, S., & Smith, H. (2014). Un modelo de optimización bi-objetivo para la selección de tecnología y asignación de donantes en la cadena de suministro de sangre. *Revista Sistemas & Telemática*, 12(30), 9–24.
- Ospina-Mateus, H., Aceverdo-Chedid, J., Salas-Navarro, K., Morales-Londoño, N., & Montero-Perez, J. (2017). Model of optimization of mining complex for the planning of flow of quarry production of limestone in multiple products and with elements for the analysis of the capacity. *Workshop of Engineering Applications*, 742, 544–555. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2>
- Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udoncy, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, 60, 460–470. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.029>
- Probarranquilla. (2013). Sector Farmacéutico Barranquilla y el Departamento del Atlántico. Barranquilla. Retrieved from
http://www.probarranquilla.org/sectorsDownloadableFiles/es/Farmaceuticos_FEB13.pdf
- Qi, Z., & Hongcheng, W. (2008). Research on construction mode of recycling network of reverse logistics of automobile enterprises. *Proceedings of the International Conference on Information Management* *Proceedings of the International Conference on Information*

Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2008, 3, 36–40.

<http://doi.org/10.1109/ICIII.2008.271>

Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A new multi-objective stochastic model for a forward/reverse logistic network design with responsiveness and quality level. *Applied Mathematical Modelling, 37*(1–2), 328–344.

<http://doi.org/10.1016/j.apm.2012.02.032>

Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics, 2*(1), 21–33. <http://doi.org/doi:10.1515/bile-2015-0008>

República de Colombia. Resolución número 728 de 2016 (2016). Colombia.

Reza Norouzi, M., Ahmadi, A., Esmael Nezhad, A., & Ghaedi, A. (2014). Mixed integer programming of multi-objective security-constrained hydro/thermal unit commitment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29*, 911–923.

<http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.020>

Robusté Antón, F. (2005). *Logística del Transporte*.

Romero-Conrado, A. R., Suárez-Agudelo, E. A., Macías-Jiménez, M. A., Gómez-Charris, Y., & Lozano-Ayarza, L. P. (2017). Diseño experimental para la obtención de compost apto para uso agrícola a partir de lodo papelerero Kraft. *Revista Espacios, 38*(28), 1–14. Retrieved from <http://repositorio.cuc.edu.co/xmlui/handle/11323/1017>

Romero, C. (1991). *Handbook of critical issues in goal programming*. Pergamon Press.

Salas-Navarro, K. (2013). *Diseño de una Estrategia de Gestión de Inventarios Colaborativos para Escenarios de Incertidumbre de una Cadena de Suministro Multi-Nivel: Caso de Aplicación Sector Madera y Muebles de la Región Caribe de Colombia*.

- Salas Navarro, K., Aceverdo-Chedid, J., Mercado-Caruso, N., & Sana, S. S. (2018). An inventory model of three-layer supply chain of wood and furniture industry in the Caribbean region of Colombia. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 2674(September), 1–18. <http://doi.org/10.1080/23302674.2016.1212428>
- Schrady, D. a. (1967). A deterministic inventory model for reparable items. *Naval Research Logistics Quarterly*, 14(3), 391–398. <http://doi.org/10.1002/nav.3800140310>
- Secretaría Distrital de Salud. (2012). Barranquilla tendrá 15 puntos para recolección de medicamentos vencidos. Retrieved February 25, 2018, from <http://www.barranquilla.gov.co/salud/index.php/boletines-de-prensa-sobre-el-dengue/16-noticias/170-barranquilla-tendra-15-puntos-para-recoleccion-de-medicamentos-vencidos>
- Seehusen, D. A., & Edwards, J. (2006). Patient Practices and Beliefs Concerning Disposal of Medications. *The Journal of the American Board of Family Medicine*, 19(6), 542–547. <http://doi.org/10.3122/jabfm.19.6.542>
- Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers and Operations Research*, 38(3), 641–650. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2010.08.008>
- Soysal, M. (2016). Closed-loop Inventory Routing Problem for returnable transport items. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 31–45. <http://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.001>
- Tamiz, M., Jones, D., & Romero, C. (1998). Theory and Methodology Goal programming for decision making: An overview of the current state-of-the-art. *European Journal of Operational Research*, 111, 569–581. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/23ac/a5bac97894cb380381a18253c39e99898aaf.pdf>

- Teunter, R. H. (2002). Economic order quantities for stochastic discounted cost inventory systems with remanufacturing. *International Journal of Logistics*, 5(2), 161–175. <http://doi.org/10.1080/13675560210148669>.
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2018). Reverse logistics network redesign under uncertainty for wood waste in the CRD industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 32–47. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.011>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2016). Calculadora FECOC.
- Van Veldhuizen, D. A., & Lamont, G. B. (2000). Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the State-of-the-Art. *Evolutionary Computation*, 8(2), 125–147.
- Vollmer, G. (2010). Disposal of Pharmaceutical Waste in Households – A European Survey. In *Green and Sustainable Pharmacy* (pp. 165–178). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. http://doi.org/10.1007/978-3-642-05199-9_11
- Wei, C., Li, Y., & Cai, X. (2011). Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand. *International Journal of Production Economics*, 134(2), 357–367. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.11.008>
- Weraikat, D., Zanjani, M. K., & Lehoux, N. (2016). Two-echelon pharmaceutical reverse supply chain coordination with customers incentives. *International Journal of Production Economics*, 176, 41–52. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.003>
- World Health Organization. (2018). WHO | Substandard and falsified medical products. Retrieved February 5, 2018, from <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs275/en/>
- Xie, Y., & Breen, L. (2012). Greening community pharmaceutical supply chain in UK: a cross boundary approach. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(1), 40–53. <http://doi.org/10.1108/13598541211212195>

- Yu, H., & Solvang, W. D. (2016). A general reverse logistics network design model for product reuse and recycling with environmental considerations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (March). <http://doi.org/10.1007/s00170-016-8612-6>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2017a). A carbon-constrained stochastic optimization model with augmented multi-criteria scenario-based risk-averse solution for reverse logistics network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 164(July), 1248–1267. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.066>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2017b). A multi-objective location-allocation optimization for sustainable management of municipal solid waste. *Environment Systems and Decisions*, 37(3), 289–308. <http://doi.org/10.1007/s10669-017-9632-y>
- Zarandi, M. H. F., Sisakht, A. H., & Davari, S. (2011). Design of a closed-loop supply chain (CLSC) model using an interactive fuzzy goal programming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56(5–8), 809–821. <http://doi.org/10.1007/s00170-011-3212-y>
- Zarei, M., Mansour, S., Husseinzadeh Kashan, A., & Karimi, B. (2010). Designing a reverse logistics network for end-of-life vehicles recovery. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, 16. <http://doi.org/10.1155/2010/649028>

10. Anexos

Anexo 1: Análisis de las cantidades retornadas en los puntos azules

En la Tabla 40 se ilustran las cifras promedio de recolección anual por contenedor a nivel nacional durante el período: 2014-2017. Los análisis estadísticos relacionados, se realizaron utilizando el Software Statgraphics Centurion XVII, versión 17.2.00 en un equipo de cómputo Acer Intel® Core i5 de 32 bits, con memoria RAM de 4GB.

Tabla 40.

Promedio de recolección de medicamentos por contenedor (kg/año).

Año	Kg recolectados en promedio
2014	89,64
2015	92,62
2016	95,11
2017	93,04

Inicialmente, se ejecutó la prueba de bondad de Kolmogorov Smirnov para determinar el posible ajuste de los datos, utilizando como referencia tres de las distribuciones más usadas en la literatura: normal, uniforme y exponencial; obteniendo resultados no concluyentes, debido a que no puede afirmarse con un nivel de confianza del 95% que los datos no proceden de alguna de las distribuciones consideradas. Sin embargo, se obtuvo un valor P muy cercano a 0,05 para el caso de la distribución exponencial lo que podría ser un indicio que los datos no corresponden a esta distribución (Tabla 41).

Posteriormente, se llevó a cabo la prueba Shapiro-Wilk, de cuyos resultados se deriva un valor-P mayor a 0,05 (Tabla 42); por lo que puede afirmarse con un nivel de confianza del 95% que no se puede rechazar la idea que la variable objeto de estudio proviene de una distribución normal. Este test de normalidad ha demostrado ser uno de los más poderosos dentro de las diferentes pruebas estadísticas existentes en la literatura, independientemente del tamaño

muestral analizado (Razali & Wah, 2011), y se fundamenta en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

Tabla 41.

Prueba de Bondad de Ajuste para datos de recolección promedio.

	Exponencial	Normal	Uniforme
DMAS	0,358052	0,173082	0,25
DMENOS	0,620161	0,253099	0,29479
DN	0,620161	0,253099	0,29479
Valor-P	0,0922177	0,959842	0,877772

Nota: Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 42.

Prueba de normalidad para datos de recolección promedio

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,960442	0,749289

Nota: Prueba Shapiro Wilk.

Adicionalmente, para validar que se cumplen los supuestos de normalidad, se analizaron los valores del sesgo y la curtosis estandarizada, los cuales se encuentran en el rango esperado (-2,2) para datos provenientes de una distribución normal (Tabla 43).

Lo anterior, se demuestra gráficamente en la Figura 30 y Figura 31, en donde se observa que los datos se ajustan aproximadamente a una línea recta y a la curva normal, respectivamente. De esta forma, a partir del análisis estadístico de las cifras de recolección reportadas por parte de la Corporación Punto Azul, se concluye que el comportamiento de esta variable se ajusta a una distribución normal con $\mu = 92,6$ y $\sigma = 2,25$.

Tabla 43.

Resumen estadístico para los datos de recolección promedio.

Recuento	4
Promedio	92,6025
Desviación Estándar	2,25504
Coefficiente de Variación	2,43519%
Mínimo	89,64
Máximo	95,11
Rango	5,47
Sesgo Estandarizado	-0,481812
Curtosis Estandarizada	0,624344

Nota: Elaboración propia

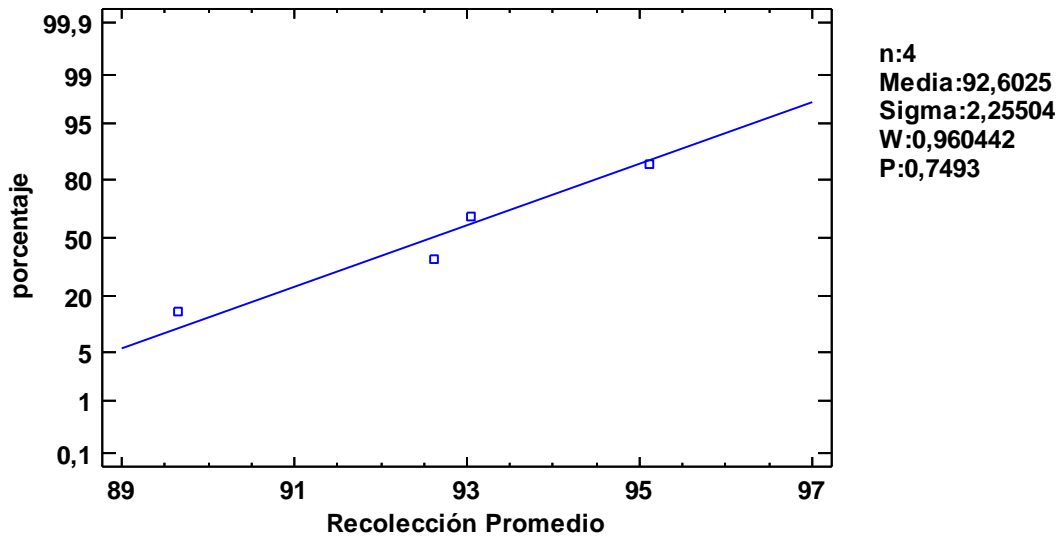


Figura 30. Gráfica de probabilidad normal para las cantidades promedio de recolección.

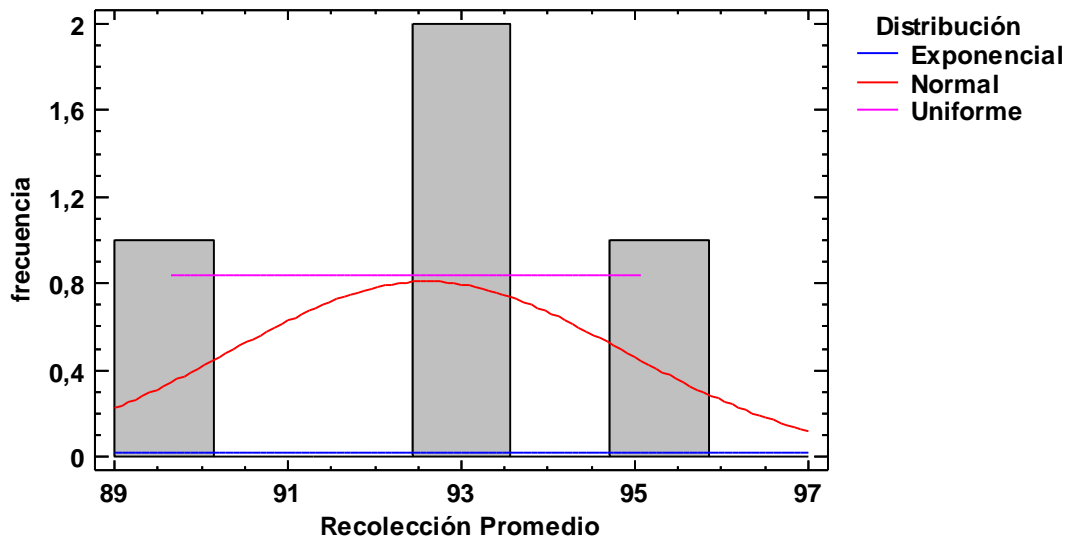


Figura 31. Histograma para los datos de recolección promedio anual por contenedor.

Anexo 2: Código del modelo determinístico en GAMS V. 25.0.3.

\$stitle Modelo MIP para configuración de cadena de suministro inversa.
 Caso: Medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla

*Declaración de conjuntos

Sets

```

c "Puntos azules" /1*31/
i "Ubicaciones potenciales para centros de inspección y clasificación"
/1*10/
r "Centro de aprovechamiento energético" /1/
d "Centro de disposición/incineración" /1*3/
k número de funciones objetivo /1,2/
km1(k) función objetivo que se expresará como restricción de acuerdo
con el método de restricciones de épsilon /2/
Alias (k, kk, lk)
;
    
```

*Declaración de parámetros

Parameters

*Los parámetros coef_costos(k) y coef_emission (k) son utilizados para desglosar las dos funciones objetivo que integran el problema.

```

coef_cost(k)
/1 1
 2 0/
coef_emission(k)
/1 0
 2 1/ ;
    
```

*Parámetros propios del modelo

parameters p(c) Cantidad de productos retornados por los clientes en los puntos azules c (kg por año)

```

/
1      88.70
2      94.79
3      95.54
4      93.15
5      91.99
6      90.56
7      91.11
8      90.26
9      92.78
10     91.46
11     93.28
12     93.56
13     92.51
14     96.73
    
```

15	97.15
16	88.34
17	93.53
18	93.46
19	92.00
20	95.71
21	92.02
22	91.72
23	91.64
24	91.13
25	368.61
26	95.47
27	94.25
28	187.47
29	92.70
30	87.89
31	93.99
/	

FI(i) Costo fijo de apertura de centro de inspección y clasificación i (\$)

/	
1	661417323
2	390000000
3	688524590
4	656692913
5	630000000
6	1083333333
7	675000000
8	825000000
9	919354839
10	916666667 /

table Distancia_CI(c,i) Distancia del punto azul c al centro de inspección i (km)

		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10		
	1	5.03	5.33	5.04	5.20	5.22
6.38	6.97	4.09	4.85	4.52		
	2	3.69	5.71	4.08	4.36	4.88
3.94	4.44	2.45	2.84	2.63		
	3	2.11	3.86	2.31	2.56	2.99
5.50	5.89	4.34	4.68	4.50		
	4	4.03	7.30	4.74	5.03	5.94
3.06	2.97	4.29	3.81	3.98		
	5	4.35	6.86	4.88	5.18	5.85
2.58	3.08	1.78	1.77	1.71		

	6	3.52	6.37	4.13	4.44	5.21
2.95	3.25	2.86	2.71	2.73		
	7	4.30	5.88	4.59	4.84	5.24
4.37	4.94	2.37	2.98	2.70		
	8	3.78	6.76	4.42	4.73	5.54
2.65	2.88	3.01	2.72	2.80		
	9	3.77	6.88	4.44	4.75	5.60
2.76	2.87	3.46	3.09	3.21		
	10	4.03	7.00	4.68	4.98	5.79
2.40	2.63	2.86	2.52	2.62		
	11	5.30	6.67	5.57	5.81	6.15
4.50	5.13	2.07	2.87	2.52		
	12	4.43	7.74	5.09	5.32	6.26
4.82	4.53	6.29	5.80	5.98		
	13	1.06	2.57	0.78	0.95	1.40
6.79	7.08	5.94	6.20	6.06		
	14	4.33	6.88	4.88	5.18	5.86
2.53	3.01	1.83	1.78	1.74		
	15	5.02	3.88	4.72	4.75	4.37
8.29	8.82	6.21	6.91	6.60		
	16	8.87	9.40	9.00	9.20	9.31
7.24	7.91	4.72	5.51	5.18		
	17	6.15	3.46	5.60	5.48	4.70
10.70	11.19	8.79	9.44	9.15		
	18	5.76	4.15	5.39	5.39	4.89
9.15	9.69	7.02	7.74	7.42		
	19	4.67	1.54	4.02	3.84	2.95
10.12	10.52	8.62	9.13	8.90		
	20	3.78	6.74	4.42	4.73	5.53
2.65	2.89	2.97	2.69	2.76		
	21	3.44	6.28	4.04	4.35	5.12
3.04	3.35	2.90	2.78	2.78		
	22	5.71	7.06	5.99	6.23	6.56
4.52	5.17	1.99	2.83	2.47		
	23	4.18	6.49	4.66	4.95	5.56
3.10	3.61	1.82	2.05	1.90		
	24	4.65	7.02	5.16	5.45	6.08
2.64	3.20	1.38	1.53	1.39		
	25	4.13	6.31	4.57	4.86	5.43
3.36	3.89	1.90	2.23	2.04		
	26	4.28	7.62	4.98	5.24	6.18
3.78	3.55	5.23	4.72	4.91		
	27	3.68	6.47	4.28	4.58	5.34
2.83	3.17	2.66	2.52	2.53		
	28	6.01	8.82	6.63	6.94	7.70
0.51	1.10	2.22	1.40	1.73		
	29	3.45	5.53	3.85	4.13	4.66
4.02	4.49	2.65	3.00	2.82		
	30	3.82	6.42	4.37	4.67	5.37
2.92	3.34	2.29	2.29	2.24		

5.64 31 6.15 6.96 6.30 6.51 6.69
 6.28 3.07 3.92 3.56
 ;

table Distancia_ID(i,d) Distancia del centro de inspección i a centro de incineración d (km)

	1	2	3
1	5.90	5.34	13.53
2	5.33	5.58	12.45
3	5.74	5.09	13.12
4	5.84	4.88	12.86
5	5.62	4.93	12.54
6	7.84	11.11	19.49
7	8.43	11.09	19.45
8	5.48	11.24	19.52
9	6.27	11.23	19.57
10	5.93	11.21	19.53

;

table Distancia_IR(i,r) Distancia del centro de inspección i al centro de aprovechamiento energético r (km)

	1
1	6.465
2	9.642
3	7.157
4	7.455
5	8.339
6	1.730
7	1.132
8	4.217
9	3.410
10	3.742

;

Scalars

FD Costo fijo de emplear una instalación de incineración d (\$) /65000/

VI Costo variable de procesar un kg en centros de inspección i (\$) por kg) /1657/

CT Costo de transporte por kg - km recorrido(\$ por kg-km) /0.75/

fpi Fracción de impropios en las cantidades depositadas /0.03/

fpr Fracción máxima de productos a aprovechar mediante co-procesamiento /0.22/

fmr Fracción mínima de productos a aprovechar mediante co-procesamiento /0.12/

N_max Máximo número de centros de inspección a abrir /2/

NM_d Máximo número de centros de incineración a seleccionar /1/
 Consumo Consumo promedio de combustible derivado del transporte
 (gal por km) /0.11/
 FE Factor de emisión de dióxido de carbono del diesel (kg CO2 por
 galón) /10.149/
 CCR Fracción de contenido de carbono en los residuos incinerados
 /0.5/
 FCF Fracción de carbono fósil en los residuos /0.9/
 EF Eficiencia de la combustión en incineradores /0.995/
 Factor Factor de conversión de Carbono en Dióxido de Carbono
 /3.667/
 M Capacidad de la ruta entre nodos de la red (kg) /4000/
 parameters

*El siguiente parámetro corresponde a la dirección de las funciones objetivo, al ser ambas de minimización, el valor será -1.

dir(k) dirección de las funciones objetivo (-1 para min y 1 para max.)
 /1 -1
 2 -1/

rhs(k) lado derecho de la función objetivo expresada como restricción en el método de restricciones de épsilon
 maxobj(k) máximo valor del objetivo k en la matriz de pagos
 minobj(k) mínimo valor del objetivo k en la matriz de pagos
 w(k) indicador de parámetros para las funciones objetivo
 payoff(k,kk) entrada de la matriz de pagos;

*Valores iniciales para los parámetros

maxobj(k)=1;
 minobj(k)=0;
 payoff(k,kk)=0;

*Parámetros requeridos para la implementación del método de restricciones de épsilon.

scalar
 g2 puntos a graficar para la función objetivo 2
 numg2 número de intervalos para la función objetivo 2 /49/
 totcounter contador de puntos generados
 jk contador usado en la aplicación del método lexicográfico
 kopt parámetro auxiliar;

*Declaración de variables

positive variables
 X(c,i) Cantidad de productos enviados del punto azul c al centro de inspección y clasificación i
 Y(i,r) Cantidad de productos tipo g enviados del centro de inspección y clasificación i al centro de aprovechamiento energético r

$Z(i,d)$ Cantidad de productos tipo g enviados del centro de inspección i al centro de incineración d

$s(k)$ Variable de holgura o exceso para el método de restricciones de ϵ ;

binary variables

$WI(i)$ Decisión de apertura de centro de inspección y clasificación i

$WD(d)$ Decisión de selección de centro de incineración d ;

free variables

$Zmin(k)$ Variables de la función objetivo

obj Variable auxiliar para la función objetivo durante la construcción de la matriz de pagos

a_objval Variable auxiliar para la función objetivo del método de restricciones de ϵ ;

equations

$r1(c)$ Garantiza la recolección y envío a inspección de todos los medicamentos posconsumo recolectados en el punto c

$r2(i)$ Ecuación de balance en centro de inspección i

$r3(i)$ Ecuación de balance - Flujo de entrada a centros de aprovechamiento energético r

$r4(i)$ Ecuación de balance - Flujo de entrada a centros de aprovechamiento energético r

$r5$ Número máximo de centros de inspección a abrir

$r6$ Número máximo de centros de incineración a seleccionar

$r7(c,i)$ Capacidad máxima a transportar en cada viaje del punto azul c al centro de inspección i .

$r8(i,r)$ Capacidad máxima a transportar en cada viaje del centro de inspección i al centro de aprovechamiento energético r

$r9(i,d)$ Capacidad máxima a transportar en cada viaje del centro de inspección i al centro de incineración d

*Expresiones relacionadas con la aplicación del método

$objf(k)$ "k-ésima función objetivo"

$con_obj(k)$ funciones objetivo incluidas como restricción

$augm_obj$ funciones objetivo aumentadas para evitar soluciones eficientes débiles

$allobj$ todas las funciones objetivo en una sola expresión;

*Restricciones del modelo

$r1(c).. \sum(i,X(c,i))=e= p(c);$

$r2(i).. \sum(c,X(c,i))=e= \sum(r,Y(i,r))+\sum(d,Z(i,d));$

$r3(i).. \sum(r,Y(i,r))=l= fpr*(\sum(c,X(c,i)))*(1-fpi);$

$r4(i).. \sum(r,Y(i,r))=g= fmr*(\sum(c,X(c,i)))*(1-fpi);$

$r5.. \sum(i,WI(i))=l=N_Max;$

$r6.. \sum(d,WD(d))=l=NM_d;$

$r7(c,i).. X(c,i)=l=M*WI(i);$

$r8(i,r).. Y(i,r)=l=M*WI(i);$

```
r9(i,d).. Z(i,d)=l=M*WD(d);
```

*Vector que almacena las funciones objetivo

```
objf(k)..
(coef_cost(k)*(sum(i,
    (WI(i)*FI(i))
  )
+sum(d,
    (WD(d)*FD)
  )
+sum((i,c),
    (X(c,i)*VI)
  )
+sum((c,i),
    (X(c,i)*Distancia_CI(c,i)*CT)
  )
+sum((i,r),
    (Y(i,r)*Distancia_IR(i,r)*CT)
  )
+sum((i,d),
    (Z(i,d)*Distancia_ID(i,d)*CT)
  )
)
+(coef_emission(k)*(sum((c,i),
    (Distancia_CI(c,i)*Consumo*FE)
  )
+sum((i,r),
    (Distancia_IR(i,r)*Consumo*FE)
  )
+sum((i,d),
    (Distancia_ID(i,d)*Consumo*FE)
  )
+sum((i,d),
    (Z(i,d)*CCR*FCF*EF*Factor)
  )
)
)
=e= Zmin(k) ;
```

\$OnText

La siguiente ecuación representa la estructura de las restricciones en el método de restricciones de ϵ .

Para una función de maximización la restricción es $obj(k) \geq rhs(k) \Rightarrow obj(k) - s(k) = rhs(k)$

Para una función de minimización la restricción es $obj(k) \leq rhs(k) \Rightarrow obj(k) + s(k) = rhs(k)$

Para garantizar el uso apropiado del signo, se emplea $dir(k)$
 $\$0ffftext$

```

con_obj(k).. Zmin(k)-dir(k)*s(k)=e= rhs(k);
augm_obj.. dir('1')*Zmin('1')+10**(-
3)*sum(k$km1(k),s(k)/(maxobj(k)-minobj(k)))=e=a_objval;

```

* La función objetivo aumentada es usada en el método de restricciones de ϵ .

* Se optimiza la primera función objetivo y se añade la segunda como restricción. El segundo término es para evitar puntos débiles en el conjunto de soluciones eficientes.

```

allobj.. sum(k,
              (w(k)*dir(k)*Zmin(k))
            )=e=obj ;

```

*allobj se utiliza para la construcción de la matriz de pagos.

```

model morlp/all/;
option iterlim=100000;
option bratio=0.25;

```

```

rhs(k)=-dir(k)*10**9;

```

*Esta ecuación $rhs(k) = -dir(k) * 10^9$ inactiva los límites derivados del parámetro $rhs(k)$, fijándolos como $(-INF, +INF)$

*El parámetro que representa el lado derecho de la restricción ($rhs(k)$) puede ser usado para almacenar "valores de reserva"

*De acuerdo con Mavrotas(2009) un valor de reserva es un límite superior o inferior, para problemas de minimización o maximización, respectivamente.

```

file payofile1 /morlp.pff/;
put payofile1 ;
put 'PAYOFF TABLE' / ;

```

*Ciclo para las optimizaciones lexicográficas de la matriz de pagos

*El conjunto lk y los parámetros jk se utilizan para optimizar la primera función objetivo de forma lexicográfica.

```

loop(lk,
      for (jk=1 to card(lk),
          if (ord(lk)+jk-1 > card(lk),
              kopt=ord(lk)+jk-1-card(lk);
            else
              kopt=ord(lk)+jk-1
            );
          w(kk)=0;

```


*Selecciona la función objetivo a optimizar.

```
w(kk)$ (ord(kk)=kopt)=1;
solve morlp using MIP maximizing obj;
payoff(lk, kk)$ (ord(kk)=kopt)=Zmin.l(kk)$ (ord(kk)=kopt);
```

*Conserva el valor del último objetivo optimizado.

```
Zmin.fx(kk)$ (ord(kk)=kopt)=Zmin.l(kk)$ (ord(kk)=kopt);
);
loop(kk,
put payoff(lk, kk):10:2
);
```

*Libera los valores fijados de las funciones objetivo para el nuevo ciclo de optimización, es decir, restaura el valor de cada una.

```
put /;
Zmin.up(kk)=10**9 ;
Zmin.lo(kk)=-10**9 ;
);
```

```
minobj(kk)=smin(k, PAYOFF(k, kk));
maxobj(kk)=smax(k, PAYOFF(k, kk));
```

```
putclose payofile1;
```

```
file payofile /morlp.out/;
put payofile ;
put ' PAYOFF TABLE '/
loop (k,
loop(kk, put payoff(k, kk):12:2);
put /;
);
```

```
putclose payofile;
```

```
payofile.ap=1;
put ' PUNTOS NO DOMINADOS A PARTIR DEL MÉTODO DE RESTRICCIONES DE
ÉPSILON'/;
option bratio = 0;
```

* option bratio=0 se utiliza para eliminar información previa almacenada producto de las soluciones consecutivas.

```
totcounter=0
put ' # z1 z2 '/;
for (g2=0 to numg2,
rhs('2') = (dir('2')+1)/2*minobj('2')-(dir('2')-1)/2*maxobj('2') +
dir('2')*(g2/numg2)*(maxobj('2')- minobj('2')));
solve morlp using MIP maximizing a_objval ;
```

```
        put payofile;
        totcounter=totcounter+1;
        if (morlp.modelstat=4 or morlp.modelstat=9 or
morlp.modelstat=10,
            put totcounter:4:0, ' **** no factible ****' /;

*Obliga a salir del ciclo si es infactible*
        else
            put totcounter:4:0, Zmin.L('1'):13:1 ;
            loop(km1,
                put Zmin.L(km1):13:1 ;
                );
            put / ;

        );
    );
putclose payofile;
```

Anexo 3. Código del modelo estocástico en GAMS V. 25.0.3.

\$stitle Modelo MIP para configuración de cadena de suministro inversa.

Caso: Medicamentos vencidos en la ciudad de Barranquilla

*Modelo estocástico en su forma extensiva

*Declaración de conjuntos

Sets

```

c "Puntos azules" /1*31/
i "Ubicaciones potenciales para centros de inspección y clasificación"
/1*10/
r "Centro de aprovechamiento energético" /1/
d "Centro de disposición/incineración" /1*3/
k "Número de funciones objetivo" /1,2/
e "Escenarios posibles" /1*30/
km1(k) función objetivo que se expresará como restricción de acuerdo
con el método de restricciones de épsilon /2/
Alias (k, kk, lk)
;

```

*Declaración de parámetros

Parameters

*Los parámetros coef_costos(k) y coef_emission (k) son utilizados para desglosar las dos funciones objetivo que integran el problema.

```

coef_cost(k)
/1 1
 2 0/
coef_emission(k)
/1 0
 2 1/ ;

```

*Parámetros propios del modelo

parameter p(c,e) Cantidad de productos retornados por los clientes en los puntos azules c (kg por año);

p(c,e)=normal(92.6,2.25);

p('25',e)=normal(92.6,2.25)+normal(92.6,2.25)+normal(92.6,2.25)+normal(92.6,2.25);

p('28',e)=normal(92.6,2.25)+normal(92.6,2.25);
display p;

parameters

pbs(e) Probabilidad de ocurrencia del escenario e;
pbs(e)= (1/card(e));

parameters

FI(i) Costo fijo de apertura de centro de inspección y clasificación i (\$)

/	
1	661417323
2	390000000
3	688524590
4	656692913
5	630000000
6	1083333333
7	675000000
8	825000000
9	919354839
10	916666667 /

table Distancia_CI(c,i) Distancia del punto azul c al centro de inspección i (km)

		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10		
	1	5.03	5.33	5.04	5.20	5.22
6.38	6.97	4.09	4.85	4.52		
	2	3.69	5.71	4.08	4.36	4.88
3.94	4.44	2.45	2.84	2.63		
	3	2.11	3.86	2.31	2.56	2.99
5.50	5.89	4.34	4.68	4.50		
	4	4.03	7.30	4.74	5.03	5.94
3.06	2.97	4.29	3.81	3.98		
	5	4.35	6.86	4.88	5.18	5.85
2.58	3.08	1.78	1.77	1.71		
	6	3.52	6.37	4.13	4.44	5.21
2.95	3.25	2.86	2.71	2.73		
	7	4.30	5.88	4.59	4.84	5.24
4.37	4.94	2.37	2.98	2.70		
	8	3.78	6.76	4.42	4.73	5.54
2.65	2.88	3.01	2.72	2.80		
	9	3.77	6.88	4.44	4.75	5.60
2.76	2.87	3.46	3.09	3.21		
	10	4.03	7.00	4.68	4.98	5.79
2.40	2.63	2.86	2.52	2.62		
	11	5.30	6.67	5.57	5.81	6.15
4.50	5.13	2.07	2.87	2.52		
	12	4.43	7.74	5.09	5.32	6.26
4.82	4.53	6.29	5.80	5.98		
	13	1.06	2.57	0.78	0.95	1.40
6.79	7.08	5.94	6.20	6.06		
	14	4.33	6.88	4.88	5.18	5.86
2.53	3.01	1.83	1.78	1.74		

	15	5.02	3.88	4.72	4.75	4.37
8.29	8.82	6.21	6.91	6.60		
	16	8.87	9.40	9.00	9.20	9.31
7.24	7.91	4.72	5.51	5.18		
	17	6.15	3.46	5.60	5.48	4.70
10.70	11.19	8.79	9.44	9.15		
	18	5.76	4.15	5.39	5.39	4.89
9.15	9.69	7.02	7.74	7.42		
	19	4.67	1.54	4.02	3.84	2.95
10.12	10.52	8.62	9.13	8.90		
	20	3.78	6.74	4.42	4.73	5.53
2.65	2.89	2.97	2.69	2.76		
	21	3.44	6.28	4.04	4.35	5.12
3.04	3.35	2.90	2.78	2.78		
	22	5.71	7.06	5.99	6.23	6.56
4.52	5.17	1.99	2.83	2.47		
	23	4.18	6.49	4.66	4.95	5.56
3.10	3.61	1.82	2.05	1.90		
	24	4.65	7.02	5.16	5.45	6.08
2.64	3.20	1.38	1.53	1.39		
	25	4.13	6.31	4.57	4.86	5.43
3.36	3.89	1.90	2.23	2.04		
	26	4.28	7.62	4.98	5.24	6.18
3.78	3.55	5.23	4.72	4.91		
	27	3.68	6.47	4.28	4.58	5.34
2.83	3.17	2.66	2.52	2.53		
	28	6.01	8.82	6.63	6.94	7.70
0.51	1.10	2.22	1.40	1.73		
	29	3.45	5.53	3.85	4.13	4.66
4.02	4.49	2.65	3.00	2.82		
	30	3.82	6.42	4.37	4.67	5.37
2.92	3.34	2.29	2.29	2.24		
	31	6.15	6.96	6.30	6.51	6.69
5.64	6.28	3.07	3.92	3.56		

;

table Distancia_ID(i,d) Distancia del centro de inspección i a centro de incineración d (km)

	1	2	3
1	5.90	5.34	13.53
2	5.33	5.58	12.45
3	5.74	5.09	13.12
4	5.84	4.88	12.86
5	5.62	4.93	12.54
6	7.84	11.11	19.49
7	8.43	11.09	19.45
8	5.48	11.24	19.52
9	6.27	11.23	19.57
10	5.93	11.21	19.53

;

table Distancia_IR(i,r) Distancia del centro de inspección i al centro de aprovechamiento energético r (km)

	1
1	6.465
2	9.642
3	7.157
4	7.455
5	8.339
6	1.730
7	1.132
8	4.217
9	3.410
10	3.742

;

Scalars

FD Costo fijo de utilización de centros de incineración d (\$) /65000/

VI Costo variable de procesar un kg en centros de inspección i (\$) por kg) /1657/

CT Costo de transporte por kg - km recorrido(\$ por kg-km) /0.75/

fpi Fracción de impropios en las cantidades depositadas /0.03/

fpr Fracción máxima de productos a aprovechar mediante co-procesamiento /0.22/

fmr Fracción mínima de productos a aprovechar mediante co-procesamiento /0.12/

N_max Máximo número de centros de inspección a abrir /2/

NM_d Máximo número de centros de incineración a seleccionar /1/

Consumo Consumo promedio de combustible derivado del transporte (gal por km) /0.11/

FE Factor de emisión de dióxido de carbono del diesel (kg CO2 por galón) /10.149/

CCR Fracción de contenido de carbono en los residuos incinerados /0.5/

FCF Fracción de carbono fósil en los residuos /0.9/

EF Eficiencia de la combustión en incineradores /0.995/

Factor Factor de conversión de Carbono en Dióxido de Carbono /3.667/

M Capacidad de la ruta entre nodos de la red (kg) /4000/

parameters

*El siguiente parámetro corresponde a la dirección de las funciones objetivo, al ser ambas de minimización, el valor será -1.

dir(k) dirección de las funciones objetivo (-1 para min y 1 para max.)

/1 -1
2 -1/

rhs(k) lado derecho de la función objetivo expresada como restricción en el método de restricciones de ϵ
 maxobj(k) máximo valor del objetivo k en la matriz de pagos
 minobj(k) mínimo valor del objetivo k en la matriz de pagos
 w(k) indicador de parámetros para las funciones objetivo
 payoff(k,kk) entrada de la matriz de pagos;

*Valores iniciales para los parámetros
 maxobj(k)=1;
 minobj(k)=0;
 payoff(k,kk)=0;

*Parámetros requeridos para la implementación del método de restricciones de ϵ .

scalar
 g2 puntos a graficar para la función objetivo 2
 numg2 número de intervalos para la función objetivo 2 /49/
 totcounter contador de puntos generados
 jk contador usado en la aplicación del método lexicográfico
 kopt parámetro auxiliar;

*Declaración de variables
 positive variables
 X(c,i,e) Cantidad de productos enviados del punto azul c al centro de inspección y clasificación i en el escenario e
 Y(i,r,e) Cantidad de productos enviados del centro de inspección y clasificación i al centro de aprovechamiento energético r en el escenario e
 Z(i,d,e) Cantidad de productos enviados del centro de inspección i al centro de incineración d en el escenario e
 s(k) Variable de holgura o exceso para el método de restricciones de ϵ en el escenario e;

*Variables de primera etapa
 binary variables
 WI(i) Decisión de apertura de centro de inspección y clasificación i
 WD(d) Decisión de selección de centro de incineración d;
 free variables
 Zmin(k) Variables de la función objetivo en el escenario e
 obj Variable auxiliar para la función objetivo durante la construcción de la matriz de pagos
 a_objval Variable auxiliar para la función objetivo del método de restricciones de ϵ ;

```

equations
r1(c,e) Garantiza la recolección y envío a inspección de todos los
medicamentos posconsumo recolectados en el punto c
r2(i,e) Ecuación de balance en centro de inspección i
r3(i,e) Ecuación de balance - Flujo de entrada a centros de
aprovechamiento energético r
r4(i,e) Ecuación de balance - Flujo de entrada a centros de
aprovechamiento energético r
r5    Número máximo de centros de inspección a abrir
r6    Número máximo de centros de incineración a seleccionar
r7(c,i,e) Capacidad máxima a transportar en cada viaje del punto
azul c al centro de inspección i.
r8(i,r,e) Capacidad máxima a transportar en cada viaje del centro
de inspección i al centro de aprovechamiento energético r
r9(i,d,e) Capacidad máxima a transportar en cada viaje del centro
de inspección i al centro de incineración d

```

```

*Expresiones relacionadas con la aplicación del método
objf(k) "k-ésima función objetivo"
con_obj(k) funciones objetivo incluidas como restricción
augm_obj funciones objetivo aumentadas para evitar soluciones
eficientes débiles
allobj todas las funciones objetivo en una sola expresión;

```

*Restricciones del modelo

```

r1(c,e).. sum(i,X(c,i,e))=e= p(c,e);
r2(i,e).. sum(c,X(c,i,e))=e= sum(r,Y(i,r,e))+sum(d,Z(i,d,e));
r3(i,e).. sum(r,Y(i,r,e))=l= fpr*(sum(c,X(c,i,e)))*(1-fpi);
r4(i,e).. sum(r,Y(i,r,e))=g= fmr*(sum(c,X(c,i,e)))*(1-fpi);
r5.. sum(i,WI(i))=l=N_Max;
r6.. sum(d,WD(d))=l=NM_d;
r7(c,i,e).. X(c,i,e)=l=M*WI(i);
r8(i,r,e).. Y(i,r,e)=l=M*WI(i);
r9(i,d,e).. Z(i,d,e)=l=M*WD(d);

```

*Vector que almacena las funciones objetivo

```

objf(k)..
(coef_cost(k)*(sum(i,
    (WI(i)*FI(i))
    )
+sum(d,
    (WD(d)*FD)
    )
+sum(e,pbs(e)*
    (sum((i,c),
    (X(c,i,e)*VI)

```



```

)
+sum((c,i),
(X(c,i,e)*Distancia_CI(c,i)*CT)
)
+sum((i,r),
(Y(i,r,e)*Distancia_IR(i,r)*CT)
)
+sum((i,d),
(Z(i,d,e)*Distancia_ID(i,d)*CT)
)
)
)
)
+(coef_emission(k)*
(sum((c,i),
(Distancia_CI(c,i)*Consumo*FE)
)
+sum((i,r),
(Distancia_IR(i,r)*Consumo*FE)
)
+sum((i,d),
(Distancia_ID(i,d)*Consumo*FE)
)
)
+(sum(e,pbs(e)*
sum((i,d),
(Z(i,d,e)*CCR*FCF*EF*Factor)
)
)
)
)
)
)
)
=e= Zmin(k) ;

```

\$OnText

La siguiente ecuación representa la estructura de las restricciones en el método de restricciones de épsilon.

Para una función de maximización la restricción es $obj(k) \geq rhs(k) \Rightarrow obj(k) - s(k) = rhs(k)$

Para una función de minimización la restricción es $obj(k) \leq rhs(k) \Rightarrow obj(k) + s(k) = rhs(k)$

Para garantizar el uso apropiado del signo, se emplea $dir(k)$

\$Offtext

```

con_obj(k).. Zmin(k)-dir(k)*s(k)=e= rhs(k);
augm_obj.. dir('1')*Zmin('1')+10**(-
3)*sum(k$km1(k),s(k)/(maxobj(k)-minobj(k)))=e=a_objval;

```

* La función objetivo aumentada es usada en el método de restricciones de ϵ .

* Se optimiza la primera función objetivo y se añade la segunda como restricción. El segundo término es para evitar puntos débiles en el conjunto de soluciones eficientes.

```
allobj.. sum(k,
            (w(k)*dir(k)*Zmin(k))
            )=e=obj ;
```

*allobj se utiliza para la construcción de la matriz de pagos.

```
model morlp/all/;
option iterlim=100000;
option bratio=0.25;
```

```
rhs(k)=-dir(k)*10**9;
```

*Esta ecuación $rhs(k)=-dir(k)*10**9$ inactiva los límites derivados del parámetro $rhs(k)$, fijándolos como $(-INF,+INF)$

*El parámetro que representa el lado derecho de la restricción ($rhs(k)$) puede ser usado para almacenar "valores de reserva"

*De acuerdo con Mavrotas(2009) un valor de reserva es un límite superior o inferior, para problemas de minimización o maximización, respectivamente.

```
file payofile1 /morlp.pff/;
put payofile1 ;
put 'PAYOFF TABLE' / ;
```

*Ciclo para las optimizaciones lexicográficas de la matriz de pagos

*El conjunto lk y los parámetros jk se utilizan para optimizar la primera función objetivo de forma lexicográfica.

```
loop(lk,
    for (jk=1 to card(lk),
        if (ord(lk)+jk-1 > card(lk),
            kopt=ord(lk)+jk-1-card(lk);
        else
            kopt=ord(lk)+jk-1
        );
    w(kk)=0;
```

*Selecciona la función objetivo a optimizar.

```
w(kk)$ (ord(kk)=kopt)=1;
solve morlp using MIP maximizing obj;
payoff(lk, kk)$ (ord(kk)=kopt)=Zmin.l(kk)$ (ord(kk)=kopt);
```

*Conserva el valor del último objetivo optimizado.

```
Zmin.fx(kk)$ (ord(kk)=kopt)=Zmin.l(kk)$ (ord(kk)=kopt);
);
```

```

        loop(kk,
            put payoff(1k,kk):10:2
                );

    *Libera los valores fijados de las funciones objetivo para el nuevo ciclo
    de optimización, es decir, restaura el valor de cada una.
        put /;
        Zmin.up(kk)=10**9 ;
        Zmin.lo(kk)=-10**9 ;
    );

minobj(kk)=smin(k,PAYOFF(k,kk));
maxobj(kk)=smax(k,PAYOFF(k,kk));

putclose payofile1;

file payofile /morlp.out/;
put payofile ;
put ' PAYOFF TABLE'/
loop (k,
    loop(kk, put payoff(k,kk):12:2);
    put /;
);

putclose payofile;

payofile.ap=1;
put ' PUNTOS NO DOMINADOS A PARTIR DEL MÉTODO DE RESTRICCIONES DE
ÉPSILON'/;
option bratio = 0;

* option bratio=0 se utiliza para eliminar información previa almacenada
producto de las soluciones consecutivas.

totcounter=0
put ' #      z1          z2      '/;
for (g2=0 to numg2,
    rhs('2') = (dir('2')+1)/2*minobj('2')-(dir('2')-1)/2*maxobj('2') +
dir('2')*(g2/numg2)*(maxobj('2')- minobj('2'));
    solve morlp using MIP maximizing a_objval ;

    put payofile;
    totcounter=totcounter+1;
    if (morlp.modelstat=4 or morlp.modelstat=9 or
morlp.modelstat=10,
        put totcounter:4:0, ' **** no factible ****'/;

*Obliga a salir del ciclo si es infactible*
    else
        put totcounter:4:0, Zmin.L('1'):13:1 ;

```

```
        loop(km1,  
            put Zmin.L(km1):13:1 ;  
            );  
        put / ;  
    );  
);  
putclose payofile;
```

Anexo 4. Solución de los problemas WS individuales

1			9		
	F1	F2		F1	F2
F1	395464844	6710,03	F1	395465450	6710,55
F2	395465860	6193,84	F2	395466467	6194,3
2			10		
	F1	F2		F1	F2
F1	395484785	6727,41	F1	395476884	6720,51
F2	395485806	6209,31	F2	395477903	6203,16
3			11		
	F1	F2		F1	F2
F1	395455290	6701,71	F1	395471750	6716,02
F2	395456305	6186,43	F2	395472768	6199,16
4			12		
	F1	F2		F1	F2
F1	395467063	6711,95	F1	395462580	6708,05
F2	395468080	6195,54	F2	395463596	6192,07
5			13		
	F1	F2		F1	F2
F1	395465517	6710,62	F1	395476620	6720,29
F2	395466534	6194,36	F2	395477639	6202,96
6			14		
	F1	F2		F1	F2
F1	395484248	6726,94	F1	395453115	6699,82
F2	395485269	6208,88	F2	395454129	6184,74
7			15		
	F1	F2		F1	F2
F1	395474829	6718,72	F1	395451159	6698,11
F2	395475848	6201,57	F2	395452173	6183,22
8			16		
	F1	F2		F1	F2
F1	395466157	6711,18	F1	395474507	6718,43
F2	395467174	6194,85	F2	395475525	6201,31

17			24		
	F1	F2		F1	F2
F1	395457738	6703,84	F1	395419088	6670,18
F2	395458753	6188,32	F2	395420096	6158,36
18			25		
	F1	F2		F1	F2
F1	395459260	6705,17	F1	395452497	6699,28
F2	395460276	6189,51	F2	395453511	6184,26
19			26		
	F1	F2		F1	F2
F1	395444731	6692,49	F1	395477307	6720,87
F2	395445744	6178,22	F2	395478326	6203,48
20			27		
	F1	F2		F1	F2
F1	395471874	6716,14	F1	395449741	6696,87
F2	395472892	6199,27	F2	395450755	6182,12
21			28		
	F1	F2		F1	F2
F1	395494997	6736,29	F1	395459572	6705,45
F2	395496019	6217,21	F2	395460588	6189,76
22			29		
	F1	F2		F1	F2
F1	395484481	6727,11	F1	395486095	6728,52
F2	395485502	6209,04	F2	395487116	6210,3
23			30		
	F1	F2		F1	F2
F1	395460820	6706,53	F1	395443801	6691,72
F2	395461836	6190,72	F2	395444814	6177,54

Anexo 5. Cumplimiento de los supuestos estadísticos para el análisis de los tratamientos.

Los análisis estadísticos relacionados a continuación, se realizaron utilizando el Software Statgraphics Centurion XVII, versión 17.2.00 en un equipo de cómputo Acer Intel® Core i5 de 32 bits, con memoria RAM de 4GB. Las pruebas gráficas (Figura 32- 35) comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad para garantizar un análisis confiable de los resultados del diseño factorial.

- **Efecto sobre F_1**

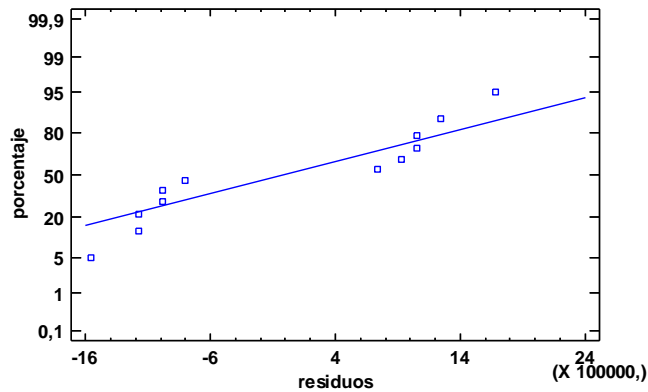


Figura 32. Gráfico de probabilidad normal para residuos de F_1

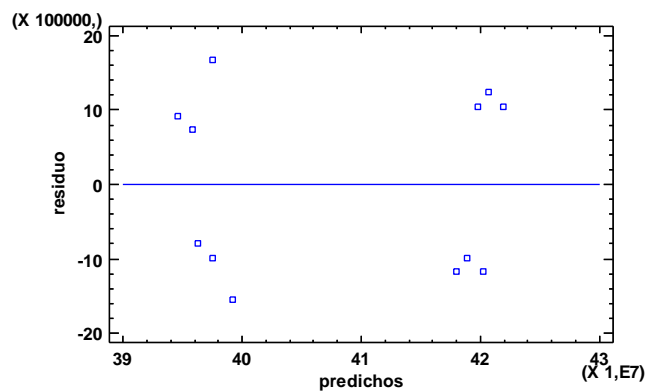


Figura 33. Gráfico de residuos vs. predichos para F_1

- **Efecto sobre F_2**

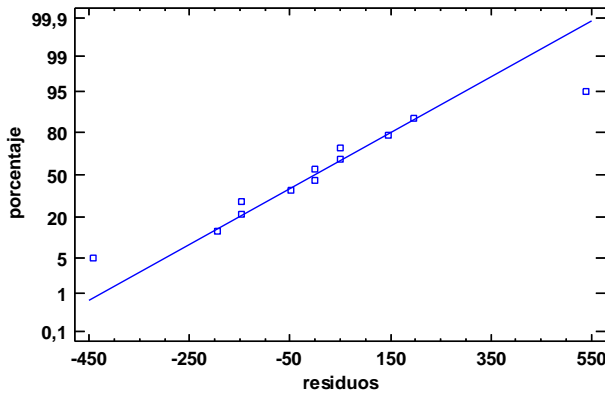


Figura 34. Gráfico de probabilidad normal para residuos F_2

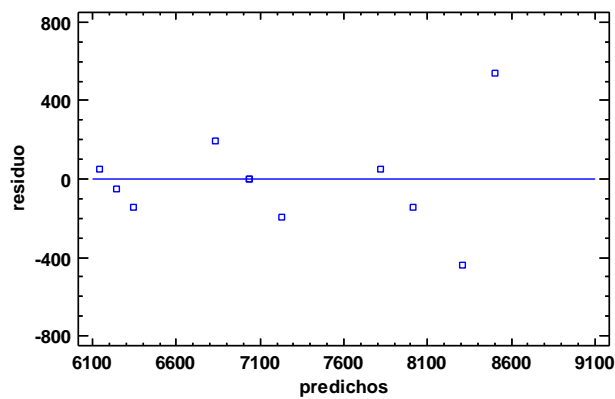


Figura 35. Gráfico de residuos vs predichos para F_2

Analizando las gráficas de probabilidad normal obtenidas (Figuras 32 y 34), es posible afirmar que, a pesar de la existencia de algunos puntos atípicos, los datos se ajustan en gran proporción a una distribución normal.

En lo que concierne a las gráficas de residuos vs predichos, la Figura 33 demuestra una variación alrededor de ± 20 para el factor 1 (cantidades retornadas). En tanto que, la variación de los residuos para el factor 2 es muy similar a nivel general (Figura 35). Por lo que es posible observar igualdad de varianzas alrededor de ± 400 , excluyendo algunos residuos atípicos.