

**Problema de localización-ruteo en atención post-desastre. Un análisis comparativo de metodologías para la toma de decisiones bajo incertidumbre.
Caso COVID-19.**

Andrés Felipe Martínez Reyes

**Universidad de La Sabana
Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas
Chía, Colombia
2021**

Problema de localización-ruteo en atención post-desastre. Un análisis comparativo de metodologías para la toma de decisiones bajo incertidumbre. Caso covid-19.

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de

Magíster en gerencia de operaciones
(Modalidad de Investigación)

Andrés Felipe Martínez Reyes

Director

Carlos Leonardo Quintero Araujo Ph.D.

Co-director

Elyn Lizeth Solano Charris Ph.D.

Universidad de La Sabana

Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas

Chía, Colombia

2021

AGRADECIMIENTOS

A CARLOS LEONARDO QUINTERO ARAUJO (PhD) y a ELYN LIZETH SOLANO CHARRIS (PhD) por la orientación en este trabajo y demás producciones científicas derivadas de este proceso, por su apoyo incondicional y calidad humana, que han sido base fundamental para superar los retos, conseguir los resultados consignados en esta tesis y lograr un aprendizaje significativo durante el desarrollo de la Maestría en Gerencia de Operaciones.

A la Universidad de la Sabana y especialmente a la comisión de la Maestría en Gerencia de Operaciones y a su director CARLOS ALBERTO VEGA MEJIA (PhD) por la beca otorgada y el apoyo indispensable para el desarrollo del programa y de este proyecto.

Resumen:

La logística humanitaria es una temática de estudio de gran importancia para la mitigación y atención de víctimas de un desastre. Dentro de los diferentes enfoques para abordar los problemas que se generan a partir de un desastre, la investigación de operaciones permite generar planes, métodos y sistemas estructurados, que respondan de forma eficiente a las necesidades de las poblaciones afectadas. Este trabajo se desarrolla en el contexto de la pandemia por COVID-19 desde una perspectiva de investigación de operaciones. El brote de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) ha generado una necesidad inminente de equipos de protección personal (EPP) que se volvieron esenciales para todas las poblaciones y mucho más para los centros de salud, clínicas, hospitales y Unidades de Cuidados Intensivos (UCIs). Teniendo en cuenta este hecho, uno de los principales problemas para los gobiernos es la distribución de EPP a las UCIs.

En este trabajo se proponen dos métodos de solución bajo los enfoques de optimización multi-arranque y algoritmos sim-heurísticos aplicados al problema de Localización-Ruteo (LRP) para la ubicación de centros de distribución y suministro de EPP a las UCIs habilitadas en la ciudad de Bogotá, Colombia. El objetivo de este trabajo es proporcionar dos herramientas que soporten la toma de decisiones en un escenario de incertidumbre, particularmente se considera la demanda como un parámetro estocástico. Los enfoques de solución consideran la minimización de los costos totales y políticas de Stock de seguridad que apuntan a mejorar la confiabilidad de las soluciones. Los resultados muestran que ambos métodos de solución superan a los obtenidos por GAMS/Cplex (Sin óptimos encontrados y con GAP de optimalidad promedio de 13,67%) en el escenario determinístico en un 9,8% en promedio, por otro lado, las políticas de Stock de seguridad muestran una gran efectividad en la disminución de los costos estocásticos esperados y el aumento de la confiabilidad. A medida que se aumenta el Stock de seguridad, la confiabilidad tiende a aumentar, sin embargo, los costos estocásticos presentan una tendencia decreciente hasta que llegan a su punto más bajo en la política de stock de seguridad del 6% para la instancia representativa evaluada, el análisis de otros indicadores descriptivos sugiere nuevos enfoques de investigación como políticas de balance de carga o distancias recorridas por las rutas.

Palabras Clave: COVID-19, Localización-Ruteo, Demandas inciertas, Sim-heurística, Algoritmo Multi-Arranque.

Abstract:

Humanitarian logistics is a topic of study of great importance to provide faster and better relief operations after the occurrence of a disaster, in that sense, operations research provides effective tools for the development of structured plans and systems that respond to humanitarian disasters. This paper is developed in the context of the COVID-19 pandemic from an operations research perspective. The outbreak of the coronavirus disease (COVID-19) has generated an imminent need for personal protective equipment (PPE) that became essential for all populations and much more for health centers, clinics, hospitals, and Intensive Care Units (ICU). Taking this fact into account, one of the main problems for governments is the distribution of PPE to ICUs.

In this work two solution methods are proposed under multi-start optimization and sim-heuristic approaches algorithms applied to the Location-Routing problem (LRP) for the location of distribution centers and the supply of personal protective equipment to the intensive care units enabled in the city of Bogotá, Colombia. The objective of this work is to provide two tools that support decision-making in a scenario of uncertainty, in this work, demand is considered as a stochastic parameter. The solution approaches consider the minimization of total costs (Location costs plus Distribution costs) and Safety Stock policies that aims to improve the reliability of the solutions. The results show that both solution methods exceed those obtained by GAMS / Cplex (No optimal solution found and average optimal GAP equal to 13.67%) in the deterministic scenario by 9.8% on average, on the other hand, Safety Stock policies show great effectiveness in reducing expected stochastic costs and increased reliability. As Safety Stock is increased, reliability tends to increase, however, stochastic costs show a decreasing trend until they reach their lowest point in the 6% Safety Stock policy for the representative instance evaluated, the analysis of other descriptive indicators suggests other research approaches such as load balancing or distances traveled policies.

Key words: COVID-19, Location-Routing, Uncertain demands, Simheuristic, Multi-Start algorithm.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
TABLA DE CONTENIDO.....	3
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE GRÁFICAS	6
LISTA DE PUBLICACIONES	7
PARTICIPACIONES EN EVENTOS.....	7
1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	8
1.1. Planteamiento del problema.....	8
1.2. Pregunta de investigación.....	10
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo general.....	10
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Justificación y alcance.....	10
1.5. Organización del documento.....	12
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	14
2.1. Problemas de Asignación:.....	19
2.2. Problemas de Diseño de red.....	20
2.3. Problemas de Ruteo:.....	21
2.4. Problemas de Localización:	21
2.5. Problemas de Localización-Ruteo:.....	22
2.6. Trabajos relacionados al COVID-19 desde un punto de vista logístico:	25
3. DISEÑO METODOLÓGICO	28
3.1. Definición del problema.....	29
3.2. Caracterización del problema.....	33
3.3. Enfoque de Solución	34
3.3.1. Método Multi-Arranque.....	34

3.3.2. Método Sim-Heurístico.....	36
4. CONFIGURACIÓN COMPUTACIONAL	46
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	48
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
REFERENCIAS.....	62
ANEXOS	69
A. PRIMERA PÁGINA DE PUBLICACIONES INDEXADAS.....	69
B. Enlace archivo con Instancias MQS#.....	71
C. Ejemplo de Código en GAMS implementado para el LRP	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de citas por año (2017-2021).....	17
Tabla 2. Trabajos científicos sobre LRP aplicado a la logística humanitaria.....	24
Tabla 3. Configuración de las Instancias MQS-BOG #.....	47
Tabla 4. Resultados para el caso Determinístico	50
Tabla 5. Configuración de la mejor solución y tiempos computacionales de los métodos propuestos para cada instancia	51
Tabla 6, Prueba t de diferencia de medias	52
Tabla 7. Resultados de las políticas de Stock de Seguridad de 0% a 6% - Caso estocástico.	54
Tabla 8. Resultados de las políticas de Stock de Seguridad de 9% a 15% - Caso estocástico.	55

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Artículos por año (2017-2021).....	16
Gráfica 2. Documentos por área del conocimiento.....	17
Gráfica 3. Red de Co-ocurrencias.....	18
Gráfica 4. Distribución de problemas de Investigación de operaciones en Logística Humanitaria (2017-2021).....	19
Gráfica 5. Diagrama de flujo de la metodología del trabajo para el desarrollo de los enfoques de solución.....	28
Gráfica 6. Representación gráfica de una solución completa para el LRP.....	32
Gráfica 7. Pseudocódigo de la heurística propuesta.....	34
Gráfica 8. Procedimiento de Localización.....	34
Gráfica 9. Procedimiento de Asignación.....	35
Gráfica 10. Procedimiento de Ruteo.....	36
Gráfica 11. Pseudocódigo del método sim-heurístico (versión 1).....	37
Gráfica 12. Operador de Diversificación de la primera versión del modelo sim-heurístico.....	39
Gráfica 13. Operadores de Búsqueda Local de la primera versión del modelo sim-heurístico....	40
Gráfica 14. Pseudocódigo del método sim-heurístico (versión final).....	41
Gráfica 15. Diagrama de flujo del procedimiento ILS.....	42
Gráfica 16. Operadores de Diversificación.....	43
Gráfica 17. Operadores de Búsqueda Local.....	44
Gráfica 18, Intervalos de Confianza 95% (Instancia 18 %SS=0%).....	52
Gráfica 19. Gráfico de caja para las mejores soluciones por método de solución.....	53
Gráfica 20. Valores promedio de los costos esperados y confiabilidades de las mejores soluciones estocásticas para diferentes políticas de stock de seguridad.....	56
Gráfica 21. Porcentajes de demanda no atendida en la ruta planeada para el top 10 de mejores soluciones.....	57
Gráfica 22. Porcentaje promedio de ocupación de las rutas del top 10 de mejores soluciones....	58
Gráfica 23. Costo promedio de transporte (USD) del top 10 de mejores soluciones.....	58

LISTA DE PUBLICACIONES

Del presente trabajo de tesis se han derivado las siguientes publicaciones en revistas indexadas ISI/Scopus:

- Martínez-Reyes, A., Quintero-Araújo, C. L., & Solano-Charris, E. L. (2021). Supplying Personal Protective Equipment to Intensive Care Units during the COVID-19 Outbreak in Colombia. A Simheuristic Approach Based on the Location-Routing Problem. *Sustainability*, 13(14), 7822.
- Martínez-Reyes A., Quintero-Araújo C.L., Solano-Charris E.L. (2021) A Decision Support Tool for the Location Routing Problem During the COVID-19 Outbreak in Colombia. In: Rossit D.A., Tohmé F., Mejía Delgadillo G. (eds) *Production Research. ICPR-Americas 2020. Communications in Computer and Information Science*, vol 1408. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76310-7_3

PARTICIPACIONES EN EVENTOS

- Ponencia “Operations Research in Humanitarian Logistics: a Bibliometric Analysis” en IAMBOG2019: 11th Conference of the Iberoamerican Academy of Management celebrada en Chía – Cundinamarca en la Universidad de La Sabana (2019).
- Ponencia “A decision support tool for the location routing problem during the COVID-19 outbreak in Colombia” en ICPR - AMERICAS 2020: THE INTERNATIONAL CONFERENCE OF PRODUCTION RESEARCH - AMERICAS 2020 celebrada virtualmente (2020).

1. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La Logística Humanitaria puede definirse como el proceso de planificación, implementación y control del flujo efectivo y eficiente de productos, materiales e información con el objetivo de satisfacer las necesidades de supervivencia (Thomas, 2008). Por su relevancia, han aparecido un gran número de publicaciones científicas relacionadas con el tema desde diferentes áreas de conocimiento y considerando las diferentes etapas de los procesos de logística humanitaria. Debido a la complejidad de los desastres humanitarios, todas las actividades y los actores deben sincronizarse para responder a la crisis humanitaria, para ello, la logística humanitaria se entiende como el proceso de planificación, implementación y control de diferentes planes eficientes y rentables para el almacenamiento, el intercambio de información, el intercambio de conocimientos y el uso de bienes enfocados en las operaciones de alivio de crisis (Ülkü, Bell, & Wilson, 2015).

Los desastres humanitarios, se pueden clasificar en desastres naturales y los causados por el hombre, dentro de los cuales, se encuentran los riesgos biológicos como las epidemias.

Las epidemias, al igual que todos los tipos de desastres se caracterizan por ser inciertos y por causar grandes impactos en las poblaciones, como es el caso del COVID-19 reportado en diciembre de 2019 en Wuhan, China, y que ha dejado millones de muertes en todo el mundo. (Torrealba-Rodriguez, Conde-Gutiérrez, & Hernández-Javier, 2020; P. Wang, Zheng, Li, & Zhu, 2020).

De acuerdo con el informe sobre las estadísticas sanitarias mundiales 2021 de la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicado en Mayo de este año (World Health Organization, 2021) el número total de muertes por COVID-19 reportadas a nivel mundial es de 3.4 millones de personas, sin embargo, la OMS estima que los casos reales pueden ascender a los 10 millones de fallecidos, en donde los países más afectados en términos de número de muertes han sido Estados Unidos, Brasil e India.

Considerando estos hechos, es evidente la amenaza para la salud y el bienestar de la población que supone la pandemia por COVID-19, generando un gran impacto en los gobiernos a nivel mundial y en todos los sectores de la economía. Particularmente, en el sector salud, el COVID-19 ha ocasionado grandes interrupciones en los hospitales y centros de atención de pacientes infectados

con el virus, los cuales han implicado un desafío innegable para el sector y las empresas logísticas, teniendo en cuenta las variaciones en la demanda (personas infectadas), necesidades de insumos, capacidades hospitalarias, entre otras, por lo que, la eficiencia de las operaciones de la gestión de la cadena de suministro y logística, tiene un papel crucial que desempeñar (Illahi & Mir, 2021).

En Colombia, de acuerdo con el informe del 22 de julio de 2021, la ciudad con mayor número de casos confirmados fue Bogotá, representando el 30% de los casos confirmados del país y con el 75.5% de ocupación del total de Unidades de Cuidados Intensivos (UCI) (Secretaría Distrital de Salud, 2021). Como el virus COVID-19 es causado principalmente por contacto o transmisión de gotas infectadas, atribuida a partículas respiratorias relativamente grandes que están sujetas a fuerzas gravitacionales y viajan solo aproximadamente a un metro del paciente, los equipos de protección personal (EPP), como mascarillas, protectores faciales y guantes, son esenciales para proteger a los trabajadores de la salud, mitigar la carga en los hospitales y prevenir la propagación de COVID-19 (Das & Rajalingham, 2020).

Durante el brote de la enfermedad por coronavirus (COVID-19) en Bogotá, Colombia, algunas estrategias para enfrentar el creciente número de personas infectadas y el nivel de ocupación de las unidades de cuidados intensivos incluyen el uso EPP, los cuales son un componente crucial para la atención de los pacientes y una prioridad para proteger a los trabajadores de la salud.

Considerando las necesidades de la ciudad y que la mayoría de los estudios sobre COVID-19 se han enfocado en modelos de predicción, se considera fundamental abordar un enfoque de optimización de operaciones para la ubicación de posibles instalaciones y distribución de EPP a las UCIs, considerando la incertidumbre subyacente en la demanda. Este problema se define como el Problema de localización-ruteo (LRP), que es un problema NP-Hard (Salhi & Rand, 1989). En los problemas de LRP, se busca la localización de instalaciones y se establecen los esquemas de ruteo para atender a un conjunto de clientes al mínimo costo. A pesar de la importancia de suministrar equipos de protección personal a las unidades de cuidados intensivos durante el brote de COVID-19, pocos trabajos han estudiado este problema (Martínez-Reyes, Quintero-Araújo, & Solano-Charris, 2021a), por su parte, existe un mayor interés por parte de académicos y profesionales por el estudio y predicción de la propagación de COVID-19 (Torrealba-Rodriguez, Conde-Gutiérrez, & Hernández-Javier, 2020; P. Wang, Zheng, Li, & Zhu, 2020).

1.2.Pregunta de investigación

¿Cómo pueden las herramientas de la investigación de operaciones apoyar la eficiente toma de decisiones en la localización de instalaciones y distribución de EPP a las UCIs en Bogotá, Colombia, considerando la incertidumbre subyacente en un escenario de pandemia por COVID-19?

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar dos modelos para la localización de instalaciones y distribución de EPP a las UCIs ubicadas en la ciudad de Bogotá, que permitan a los hospitales un abastecimiento eficiente de estos elementos para el despliegue de la atención de pacientes COVID-19, bajo los enfoques de Optimización Multi-Arranque y Sim-heurísticas en un escenario de pandemia.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el problema en estudio bajo la estructura de un problema LRP para implementar un modelo matemático del problema que considere el caso determinístico.
- Desarrollar herramientas de solución para el problema en estudio basadas en métodos de Optimización Multi-Arranque y Sim-heurísticas para evaluar y comparar los resultados de estos modelos junto con los resultados del modelo matemático del escenario determinístico.
- Diseñar indicadores de desempeño logístico para el caso de estudio, con el fin de utilizarlos como criterios de comparación y evaluación de la calidad de los métodos de solución propuestos.

1.4. Justificación y alcance

Como señalan Şatir Akpunar & Akpinar (2021), el problema de localización-ruteo se ha convertido en los últimos años, en un problema interesante y un área de investigación activa, el cual ha considerado diferentes variantes y aplicaciones (Prodhon & Prins, 2014). En particular, el objetivo de este trabajo es analizar la entrega eficiente de EPP (compuesto por mascarillas, guantes y trajes

desechables) que requieren los equipos médicos (médicos, enfermeras y terapeutas) para atender a los pacientes con COVID-19.

En Colombia, de acuerdo con el Instituto Nacional de Salud (INS), el total de casos confirmados es de 4.8 millones de personas, al 18 de agosto de 2021 (Instituto nacional de Salud, 2021), representando aproximadamente un 10% de la población del país. Por otro lado, como ya se había mencionado, la ciudad con mayor número de casos confirmados es Bogotá, con un total de 1,4 millones de casos totales, lo que corresponde a aproximadamente al 20% de la población de la ciudad y al 30% de los casos confirmados del país (Secretaría Distrital de Salud, 2021).

En este trabajo se desarrollan dos modelos de solución para la ubicación de los centros de distribución dentro de la ciudad y las rutas correspondientes para abastecer las diferentes UCIs habilitadas para recibir pacientes COVID-19 en Bogotá. Este problema se asocia al problema de localización-ruteo con demandas estocásticas (LRPSD por sus siglas en inglés) debido a la naturaleza del campo de aplicación y al comportamiento de la demanda de los EPP, ya que esta depende directamente de la cantidad de pacientes infectados internados en la UCIs, el cual presenta una alta incertidumbre de acuerdo con las cifras registradas diariamente desde el inicio de la pandemia. El LRPSD es una variante del problema de localización-ruteo que considera la incertidumbre en las demandas como una variable estocástica. El LRP involucra todos los niveles de decisión en la gestión de la cadena de suministro y la logística, es decir, estratégico, táctico y operativo. Desde una perspectiva de investigación de operaciones, puede verse como la combinación de dos problemas NP-Hard conocidos, los cuales son: el problema de localización de instalaciones y el problema de ruteo de vehículos con varios depósitos. Por lo tanto, el LRP y el LRPSD también son problemas de complejidad NP-Hard. Los problemas NP-Hard se caracterizan por tener una complejidad computacional tal que no se pueden resolver en un tiempo polinomial, en otras palabras, el tiempo y esfuerzo computacional requerido para resolver este tipo de problemas crece exponencialmente dependiendo del tamaño del problema. Debido a la naturaleza compleja del problema, los métodos basados en heurísticas son cada vez más frecuentes, ya que estos son algoritmos sencillos que presentan muy buenos resultados y son de fácil implementación. Los enfoques desarrollados en este trabajo corresponden a metodologías de optimización Multi-arranque y Sim-heurísticas. El primero, corresponde a un algoritmo constructivo de soluciones aleatorias que incorpora una versión modificada del algoritmo del vecino más cercano, este modelo

compone la etapa inicial del modelo Sim-heurístico. El segundo, desarrolla un método sim-heurístico basado en un algoritmo búsqueda local iterativa (ILS) en el que las soluciones iniciales se crean utilizando una elección aleatoria de depósitos combinada con una versión aleatoria sesgada de la heurística del vecino más cercano. La estructura del procedimiento ILS considera 2 operadores de diversificación y 4 de búsqueda local. Además, se incluyen distintas etapas de simulación de Monte Carlo (SMC) que siguen la estructura del modelo sim-heurístico. De acuerdo con Quintero-Araujo, Guimarans, & Juan (2019), los métodos sim-heurísticos son eficientes al momento de abordar los problemas de optimización combinatoria en condiciones de incertidumbre.

Como lo mencionan Pacheco & Laguna (2020), ante la pandemia por COVID-19, los sistemas de salud tienen una necesidad por adquirir suministros clave como lo son los equipos de protección personal. Los EPP juegan un papel importante a la hora de mitigar la exposición directa del personal médico al virus, por lo que se debe garantizar que los hospitales y centros de atención médica cuenten con la cantidad suficiente de estos elementos para atender a los pacientes COVID internados. Por este motivo, en el presente trabajo se busca, desde un enfoque de optimización de operaciones, atender la necesidad de localizar centros de distribución de EPP y establecer los esquemas de ruteo para el suministro de estos elementos a las UCIs para la atención de pacientes infectados por COVID-19.

1.5. Organización del documento

El presente documento está organizado de la siguiente manera: En el capítulo 2, se presenta el estado del arte y la revisión de la literatura, en donde se lleva a cabo un análisis bibliométrico de las publicaciones científicas con perspectivas de investigación de operaciones aplicadas a problemas y escenarios de logística humanitaria. De igual manera, se presenta una revisión de los trabajos recientes sobre los principales problemas de investigación operativa y una revisión más exhaustiva de los trabajos que desarrollan el problema de localización-ruteo y aquellos relacionados a la pandemia por COVID-19 desde un punto de vista logístico. En el capítulo 3, se presenta la formulación del LRP, la caracterización del problema en estudio y los enfoques de solución, que corresponde a un algoritmo bajo un esquema multi-arranque y una sim-heurística que integra la estructura de búsqueda local iterativa con la simulación de Monte Carlo. En el capítulo 4, se presenta la configuración computacional utilizada para la implementación de los

métodos propuestos y la generación de las instancias consideradas para la validación de los métodos propuestos. En el capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos y se desarrollan los análisis correspondientes. Adicionalmente se presentan tres indicadores descriptivos para analizar el comportamiento de otros parámetros relevantes que permiten complementar el análisis de los resultados obtenidos por los métodos propuestos. Por último, en el capítulo 6, se establecen las conclusiones relacionadas a los resultados obtenidos y se presentan recomendaciones sobre futuras perspectivas de investigación que pueden estar motivadas por este trabajo.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

A lo largo de la historia, la humanidad se ha visto afectada por innumerables desastres humanitarios en los que las poblaciones afectadas pueden sufrir enormes pérdidas humanas y materiales. Los desastres humanitarios se pueden definir como una interrupción en un sistema natural o humano, que impacta a las poblaciones en su comportamiento normal, causando daños imprevistos que exceden la capacidad del sistema, para repararse y corregirse por sí mismo (Van Wassenhove, 2006). Los desastres humanitarios se pueden clasificar en naturales o provocados por el hombre tales como hambrunas, ataques terroristas, tornados, inundaciones o terremotos (Maspero & Ittmann, 2008). Debido al impacto monetario y social, académicos y profesionales han centrado su atención en los estudios humanitarios durante las últimas dos décadas, para abordar de mejor manera la conciencia, planificación y control (Kovacs & Moshtari, 2019).

Debido a la complejidad de los desastres humanitarios, todas las actividades y los actores impulsados por atender a la población afectada, deben sincronizarse para una operación impecable. La logística humanitaria puede entenderse como el proceso de planificación, implementación y control de planes eficientes y rentables para el almacenamiento, el intercambio de información, el intercambio de conocimientos y el uso de bienes enfocados en las operaciones de ayuda humanitaria (Ülkü et al., 2015).

Los problemas logísticos humanitarios incluyen servicios de salud y esquemas de seguridad, dependiendo de la naturaleza de la crisis, para atender las necesidades de la población afectada. Se pueden encontrar cinco flujos principales en el proceso de logística humanitaria, los cuales son: materiales, información, dinero, conocimiento y grupos humanos. Según Tomasini & Wassenhove (2009), el conocimiento adquirido de desastres pasados debe ser transferido a nuevos contextos, dentro de los cuales, la asignación de grupos humanos y el movimiento deben ser considerados como un tema de alta importancia. En general, los materiales, la información y los flujos financieros atraviesan todos los actores, creando un sistema similar al que se encuentra en las cadenas de suministro comerciales (Van Wassenhove, 2006).

La logística humanitaria ha surgido como un campo de estudio interesante para proporcionar operaciones de socorro más rápidas y eficientes después de la ocurrencia de un desastre. En ese sentido, la investigación de operaciones es una de las herramientas recomendadas para apoyar la toma de decisiones en las operaciones de logística humanitaria (Martínez-Reyes et al., 2021a).

Desde una perspectiva de investigación operativa, los problemas de logística humanitaria se clasifican en los siguientes: Localización, ruteo, localización-ruteo, modelamiento de inventario, diseño de red, asignación y evaluación de riesgos (Kara & Savaşer, 2017)

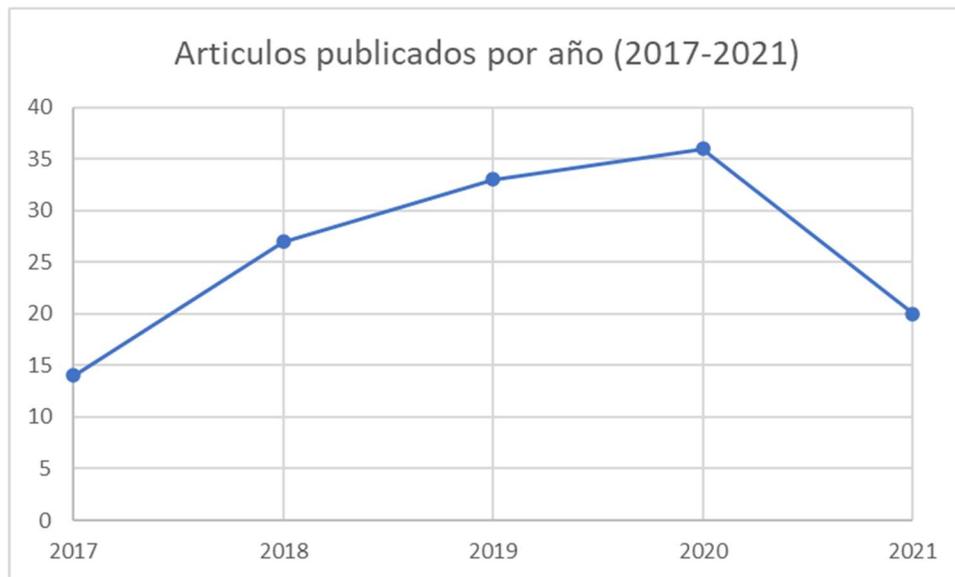
Teniendo en cuenta que sobre la logística humanitaria existe una extensa literatura, se presentan un análisis bibliométrico y una revisión sistemática para analizar la literatura existente. En logística humanitaria, se han realizado algunos trabajos que involucran un análisis bibliométrico (Ceballos-Parra, Sarache, & Gómez, 2018; Fosso Wamba, 2020; Fu, Ji, Lu, & Fan, 2021), sin embargo, no existe un análisis de trabajos recientes desde un enfoque de investigación de operaciones. Como afirman Merigó, Muller, Modak, & Laengle (2019), los estudios bibliométricos han estado motivados por el creciente acceso a la información bibliográfica.

En términos generales, el análisis bibliométrico proporciona una medida cuantitativa para evaluar a los autores, teniendo en cuenta varios parámetros como “Número de publicaciones”, “Número de citas”, entre otros. Esta metodología también se puede utilizar para proporcionar un análisis de palabras clave fundamentadas en la literatura. El análisis bibliométrico se basa en las relaciones más comunes, es decir, “relaciones de citas”, “co-ocurrencia de palabras clave” y “relaciones de co-autoría”, presentándolas en una red ponderada, en la que los nodos representan autor o palabras clave, y los arcos (o aristas) representan la relación entre dos nodos separados (Eck & Waltman, 2014).

Para analizar los trabajos recientes relacionados a la logística humanitaria desde una perspectiva de investigación de operaciones, se ha recuperado de la base de datos Scopus, información de artículos publicados en revistas indexadas desde 2017 hasta ahora. La ecuación de búsqueda utilizada fue: KEY (("Humanitarian Logistic*" OR "Humanitarian operation*" OR " Relief operation*" OR " disaster management") AND ("operation* research*" OR "heuristic*" OR "metaheuristic" OR "stochastic programming" OR "robust optimi*" OR "simulation")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2021) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2020) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017). Tomado el 13/07/2021.

Para cada artículo, se ha tomado la información bibliográfica y las referencias correspondientes. Posteriormente, se llevan a cabo el análisis sobre la base de datos, utilizando el software VOSviewer, que es una conocida herramienta para realizar análisis bibliométricos.

La ecuación de búsqueda otorgó un total de 127 artículos. La Gráfica 1 muestra los artículos publicados por año, en donde se ve una tendencia ascendente de publicaciones desde el año 2017 hasta el 2020, para lo corrido del presente año 2021 se han publicado un total de 20 artículos.



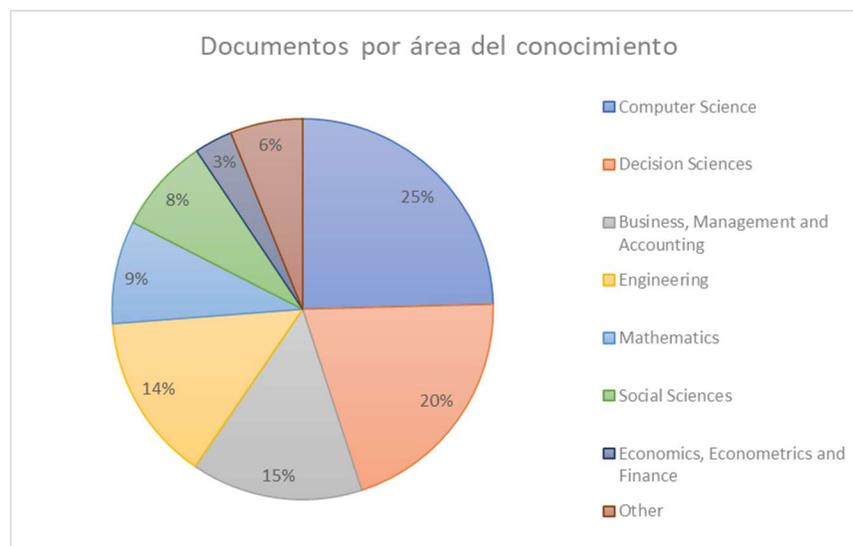
Gráfica 1. Artículos por año (2017-2021)

En la Tabla 1 se muestra la siguiente información: año de publicación (Año), el número de artículos publicados (AP), la cantidad de artículos citados (AC) y la proporción de artículos citados AC/AP. Adicionalmente, los artículos publicados por año se clasificaron en 5 categorías así: (50,inf) totaliza la cantidad de artículos con más de 50 citas, (10,50] indica los artículos que tienen entre 10 y 50 citas, (5,10] indica el total de los artículos que tienen entre 5 y 10 citas, (1,5] muestra los artículos que han sido citados entre 1 y 5 veces en otros trabajos y por último (0,1] indica aquellos artículos que han sido citados una única vez.

Tabla 1. Comparación de citas por año (2017-2021)

Año	AP	AC	AC/AP	(50,inf)	(10,50]	(5,10]	(1,5]	(0,1]
2017	13	11	0.85	2	8	0	1	0
2018	26	26	1.00	0	15	10	1	0
2019	33	33	1.00	1	7	14	10	1
2020	36	30	0.83	0	5	6	12	7
2021	19	4	0.21	0	0	1	1	2

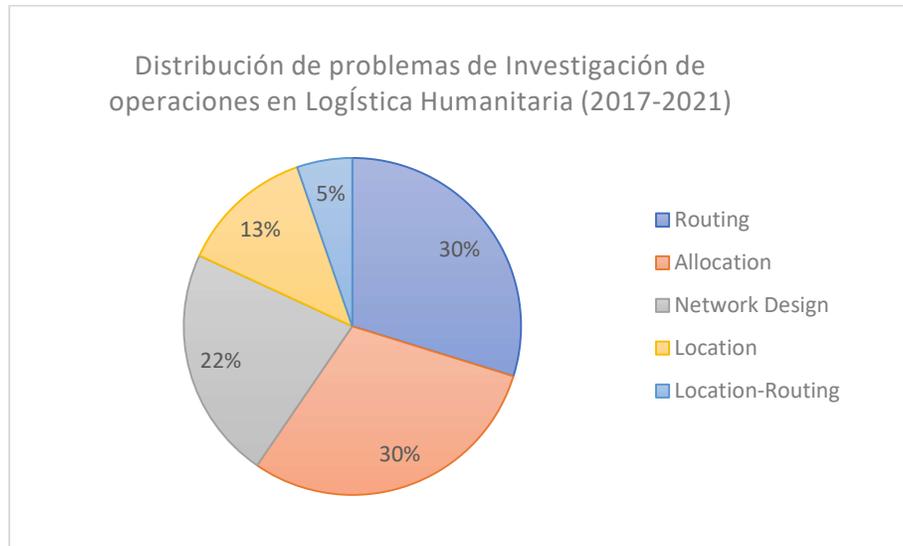
La Gráfica 2 muestra la distribución porcentual de los artículos de acuerdo con las áreas de estudio a las que pertenecen. Los enfoques que más destacan son: ciencias de la computación (25%), ciencias de la decisión (20%), Negocios, administración y contabilidad (15%) e Ingeniería (14%).



Gráfica 2. Documentos por área del conocimiento

En la Gráfica 3, se muestra la red de co-ocurrencias de palabras clave relacionadas a la cadena de búsqueda, que relaciona la investigación de operaciones dentro de las actividades de logística humanitaria. La red de co-ocurrencias considera la cantidad de veces que un término o palabra clave aparece junto con otras en los artículos, generando conexiones que indican el tipo de relación entre ellas (Eck & Waltman, 2014). En la red se pueden evidenciar tres grandes grupos identificados por color; el grupo rojo está mayormente relacionado a logística humanitaria,

de ubicación-enrutamiento (16%) y los problemas de modelado de inventarios (10%). Sin embargo, los enfoques de investigación de trabajos posteriores (2017 - 2021) han cambiado, la revisión de la literatura a partir de la base de datos obtenida por la cadena de búsqueda muestra que los problemas mayormente estudiados son: Ruteo (30%), asignación (30%) y diseño de red (22%). La distribución de problemas de logística humanitaria se puede ver en la Gráfica 4.



Gráfica 4. Distribución de problemas de Investigación de operaciones en Logística Humanitaria (2017-2021)

Los problemas de investigación operativa en logística humanitaria se pueden definir de la siguiente manera:

2.1. Problemas de Asignación:

En los problemas de asignación, se busca relacionar recursos o nodos de demanda, a locaciones como depósitos o centros de distribución. Ejemplos de trabajos que abordan esta problemática en logística humanitaria son: Wang, Cai, Yue, & Suresh (2021), los cuales abordaron el problema de posicionamiento previo de recursos, en el cual se propone un modelo de programación estocástico, basado en escenarios de dos etapas de preparación-respuesta, con datos de ubicación de teléfonos móviles para la optimización de la operación de respuesta en tiempo real y el posicionamiento previo integrado. Yu, Zhang, Jiang, Yang, & Shang (2021) estudiaron el problema de asignación

de recursos considerando tres indicadores de desempeño (i.e., eficiencia, efectividad y equidad). Los autores proponen un modelo de programación no lineal de enteros mixtos con múltiples objetivos y múltiples períodos y adicionalmente, proponen un algoritmo de Q-learning, el cual actúa como un método de aprendizaje por refuerzo, para abordar la complejidad del problema. Wang, Dong, & Hu (2021) desarrolla el problema de posicionamiento previo de suministros de socorro, considerando oportunidades de transbordo lateral e incertidumbre en la demanda. Los autores desarrollan un modelo de programación estocástica de dos etapas, el cual es aplicado a un escenario real en la región de la Costa del Golfo de los Estados Unidos. Nayeri, Asadi-Gangraj, & Emami (2019) abordó el problema de asignación y programación de unidades de rescate en desastres naturales con efecto de fatiga. Los autores propusieron un modelo de programación lineal y desarrollaron tres algoritmos metaheurísticos (algoritmo de recocido simulado, optimización por enjambre de partículas y un método híbrido compuesto por los dos algoritmos) para solucionar el problema.

2.2. Problemas de Diseño de red

Dentro de los problemas de diseño de red se determina la infraestructura y la configuración física de la cadena de suministro, en este tipo de problemas se consideran aspectos estratégicos a la hora de determinar la configuración de la red, estos factores pueden ser la gestión de inventarios, nivel cooperación de los participantes de la red, restauración de red, entre otros. Normalmente, se considera la información geográfica del problema junto con variables con incertidumbre, tales como la demanda, oferta, capacidades y costos. En logística humanitaria se pueden evidenciar los siguientes trabajos: Akbarpour, Ali Torabi, & Ghavamifar (2020) abordó el problema de diseño de red para artículos farmacéuticos. En este trabajo se propone un modelo multi-objetivo que tiene en cuenta la caducidad de los artículos farmacéuticos, la movilidad de las instalaciones de socorro y los beneficios de un mecanismo de cobertura cooperativa en el diseño de la red. Adicionalmente, se desarrolla un modelo robusto mínimo-máximo para abordar la incertidumbre en la demanda. Erbeyoğlu & Bilge (2020) desarrollan el problema de diseño de red bajo un enfoque de programación entera mixta, para la localización de instalaciones y niveles de inventario, que permitiera suministrar una correcta combinación de artículos de socorro. En este trabajo, los autores utilizan la descomposición de Benders. Sanci & Daskin (2019) proponen un modelo de

programación estocástica de dos etapas, para abordar los problemas de localización, restauración de red y distribución de artículos de socorro simultáneamente. Los autores consideran la incertidumbre en los tiempos de reparación de carreteras dañadas. En el trabajo, se desarrolló un método de aproximación de promedio de muestra con conjuntos de concentración. Acar & Kaya (2019) desarrollaron un modelo de diseño de red, que considera las decisiones de localización y reubicación de hospitales móviles, utilizando un modelo de programación estocástico de dos etapas con varios escenarios de desastre. El modelo es aplicado a un estudio de caso de la vida real para un terremoto en Estambul, mostrando las mejoras significativas en el servicio de salud al considerar hospitales móviles.

2.3. Problemas de Ruteo:

En los problemas de ruteo, se busca encontrar un conjunto óptimo de rutas para una flota de vehículos que entregan bienes o servicios a un grupo de clientes localizados en diferentes ubicaciones, considerando las limitaciones del problema y buscando maximizar o minimizar uno o varios objetivos. Su aplicación en logística humanitaria se puede ver en los siguientes trabajos: Pacheco & Laguna (2020) abordaron el problema de ruteo de vehículos para la entrega de protectores faciales a centros de salud y otras compañías, en un entorno de pandemia por COVID-19, por medio del desarrollo de un modelo heurístico de Búsqueda Tabú. Espejo-Díaz & Guerrero (2021) abordaron el problema de ruteo e inventario, bajo un esquema de simulación por agentes, que recrea las características del problema, integrando estas variables en un modelo matemático, para determinar la gestión del inventario y el ruteo de vehículos. El modelo es probado en un caso de estudio de deslizamiento en Mocoa, Colombia del año 2017. Zhu, Gong, Xu, & Gu (2019) abordaron el problema de ruteo de vehículos, desarrollando dos modelos matemáticos para la atención de víctimas. Adicionalmente los autores propusieron un algoritmo metaheurístico basado en la optimización por colonia de hormigas.

2.4. Problemas de Localización:

Los problemas de localización de instalaciones se relacionan a la selección de la ubicación de una o varias instalaciones dentro de un conjunto de posibles alternativas, para satisfacer un conjunto de nodos clientes, una serie de restricciones y minimizar o maximizar uno o varios objetivos,

considerando las limitaciones propias del problema que se esté estudiando. Este tipo de problema presenta gran similitud con los problemas de asignación, sin embargo, este último se preocupa únicamente de la asignación de recursos a instalaciones con ubicaciones fijas. Ejemplos de los trabajos que se enfocan en desarrollar este tipo de problema dentro del marco de logística humanitaria son: Stienen, Wagenaar, den Hertog, & Fleuren (2021) desarrollaron un método para determinar las ubicaciones de los depósitos que minimizan el costo de transporte y el tiempo máximo de respuesta a un desastre. El comportamiento de los dos parámetros objetivos se analizó usando la frontera de Pareto. Adicionalmente, se llevó a cabo un procedimiento de optimización robusta para encontrar soluciones robustas ante la incertidumbre en la ubicación y la magnitud de desastres futuros. El método de solución es llevado a un estudio de caso del depósito de respuesta humanitaria de las Naciones Unidas. Turkeš, Sörensen, & Cuervo (2021) desarrollaron una mateheurística, para resolver el problema de localización de instalaciones estocástico, considerando la cantidad de varios tipos de suministros almacenados en cada instalación, minimizando la demanda insatisfecha y el tiempo de respuesta. Los autores consideraron como parámetros la incertidumbre de la demanda, el deterioro del inventario y la disponibilidad en la red de transporte. Sharma, Ramkumar, Subramanian, & Malhotra (2019) propusieron una herramienta para la localización de bancos de sangre temporales que permitiera atender los requerimientos de los hospitales, con un tiempo de respuesta mínimo. El objetivo del problema buscaba minimizar la distancia entre bancos de sangre y hospitales, para ello, los autores desarrollaron un método heurístico de búsqueda Tabú para calcular el número óptimo de centros de sangre temporales y establecer la ubicación de estos.

2.5. Problemas de Localización-Ruteo:

En los problemas de localización-ruteo se integran las decisiones descritas en los problemas de ruteo, asignación y localización. Como afirman Nagy & Salhi (2006), este es un problema NP-Hard, ya que abarca dos problemas NP-Hard, los cuales son: la localización de las instalaciones y el ruteo de vehículos. Aunque tradicionalmente los problemas de localización-ruteo se han abordado desde un punto de vista determinístico (Quintero-Araujo, Caballero-Villalobos, Juan, & Montoya-Torres, 2017; Tordecilla et al., 2021), existe un especial interés en la comunidad científica en involucrar parámetros con incertidumbre, ya que estos representan de una mejor

manera, el comportamiento en casos reales. La incertidumbre en este tipo de problemas se asocia comúnmente a las demandas, tiempos de viaje, ventanas de tiempo, entre otros.

Fazayeli, Eydi, & Kamalabadi (2018) aborda el problema de localización-ruteo en una red de transporte multimodal con ventanas de tiempo y demandas difusas, con un enfoque de solución heurístico, desarrollando un algoritmo genético. Nadizadeh & Kafash (2019) estudiaron el problema de localización-ruteo capacitado difuso con incertidumbre en las demandas de recolección y entrega. El modelamiento del problema se lleva a cabo por medio de un modelo de tipo “chance-constrained” difuso y un método de agrupamiento codicioso. Zhang, Liu, Ma, & Zhang (2020) presentaron un modelo de localización-ruteo con demandas difusas de tipo “chance-constrained”, con un algoritmo de optimización de enjambre de partículas híbrido, que incluye una simulación estocástica y estrategias de búsqueda local basadas en el algoritmo de búsqueda de entornos variables. Ghaffari-Nasab, Ahari, & Ghazanfari (2013) desarrollan un modelo “chance-constrained” y un algoritmo de recocido simulado con simulación estocástica, para abordar el problema de localización-ruteo con demandas difusas. Nadizadeh & Hosseini Nasab (2014) estudiaron el problema de enrutamiento de ubicación capacitado dinámico con demandas difusas, desarrollando un modelo difuso tipo “chance-constrained”, junto con un algoritmo heurístico híbrido que agrega elementos de simulación estocástica y métodos de búsqueda local. Zare Mehrjerdi & Nadizadeh (2013) resolvieron el problema de localización-ruteo capacitado con demandas difusas bajo un modelo de programación difusa de tipo “chance-constrained” y un método de agrupamiento codicioso que incluye la simulación estocástica.

Albareda-Sambola, Fernández, & Laporte (2007) consideraron el problema de localización-ruteo estocástico. La incertidumbre se modela bajo un vector de variables aleatorias independientes que siguen la distribución Bernoulli como vector de demanda. Los autores desarrollaron una heurística de dos fases con un procedimiento de búsqueda local iterativa para solucionar el problema. Zhang, Chen, & Zhang (2019) abordaron el problema de localización-ruteo para estaciones de intercambio de baterías de vehículos eléctricos con demandas estocásticas. En este trabajo, se propone un algoritmo de búsqueda de entornos variables híbrido integrado con la optimización de enjambre de partículas. Rabbani, Heidari, & Yazdanparast (2019) abordaron el problema localización-ruteo estocástico multi-período, para desechos peligrosos industriales con demandas inciertas, bajo un modelo de programación no lineal estocástica de enteros mixtos multiobjetivo, un algoritmo

genético de clasificación no dominado II y una simulación de Monte Carlo. En Quintero-Araujo, Guimarans, & Juan (2019) se investiga el problema del localización-ruteo capacitado con demandas estocásticas, en el que se desarrolla un algoritmo simheurístico que combina el método de simulación Monte Carlo, con una metaheurística de búsqueda local iterativa. Tordecilla et al. (2021) estudiaron el problema de localización-ruteo de tamaño flexible, considerando un enfoque estocástico y difuso para modelar la demanda, y desarrollando una metaheurística compuesta de un algoritmo de búsqueda local iterativa y simulación de Monte Carlo.

Tabla 2. Trabajos científicos sobre LRP aplicado a la logística humanitaria

Artículo	Problema	Incertidumbre	Objetivos	Enfoque
Tirkolaee, Abbasian, & Weber (2021)	Problema difuso de localización-ruteo de múltiples viajes para la gestión de desechos médicos	Demanda	Múltiple: Min. Tiempo total de recorrido Min. Violaciones a las ventanas de tiempo Min. Exposición al riesgo	Modelo MILP, programación de tipo chance-constrained
Martínez-Reyes, Quintero-Araújo, & Solano-Charris (2021b)	Localización de centros de distribución y distribución de elementos de protección personal a unidades de ciudades intensivos de atención de pacientes COVID-19	Demanda	Único: Min. Costos totales de localización y transporte	Simheurística basada en el algoritmo de vecino más cercano y búsqueda local iterativa
Adarang, Bozorgi-Amiri, Khalili-Damghani, & Tavakkoli-Moghaddam (2020)	Modelo de localización-ruteo para la prestación de servicios médicos de emergencia	Demanda	Múltiple: Min. Tiempo de atención Min. Costos totales de localización y transporte	Optimización robusta basada en el algoritmo de salto de rana barajada para resolver el problema y el rendimiento se evalúa utilizando el método de restricción ϵ y el algoritmo NSGA-II.
Ghorashi, Hamed, & Sadeghian (2020)	Gestión de la cadena de suministro de sangre de emergencia considerando la compatibilidad sanguínea, el ruteo y las decisiones de localización y asignación.	-	Múltiple: Min. costos y tiempo total Max. Confiabilidad mínima de las rutas establecidas	Metaheurístico basado en la optimización de enjambre de partículas multiobjetivo y el algoritmo NSGA-II
Shiripour & Mahdavi-Amiri (2019)	Distribución de población lesionada en una red de transporte multimodal con tiempos de viaje dependientes del daño	-	Único: Min. Tiempo de transporte y de atención	Heurístico desarrollando dos algoritmos basados en un enfoque de algoritmo genético y una versión discreta del algoritmo competitivo imperialista para resolver grandes instancias
(Nedjati, Izbirak, & Arkat, 2017)	Problema de localización-ruteo de recorrido de cobertura bi-objetivo con reabastecimiento en depósitos intermedios	-	Múltiple: Min. Tiempo total de espera Min. Demanda perdida	Modelo ILP y algoritmo NSGA-II

La Tabla 2 muestra los trabajos recientes que abordan el problema de localización-ruteo dentro del marco de logística humanitaria. En la tabla se relaciona el problema desarrollado, los parámetros con incertidumbre, los objetivos del modelo y el enfoque de solución por cada artículo relacionado.

2.6. Trabajos relacionados al COVID-19 desde un punto de vista logístico:

Recientemente, el problema de localización-ruteo con demanda estocástica se encuentra en Martínez-Reyes et al. (2021b), en donde, los autores presentan un algoritmo de búsqueda local iterativa integrado con la simulación de Monte Carlo, para suministrar equipos de protección personal a las unidades de cuidados intensivos para la atención de pacientes COVID-19. Tirkolaee et al. (2021) formuló el problema de localización-ruteo con múltiples viajes, con limitaciones de tiempo para la gestión de desechos médicos en la pandemia COVID-19.

Principalmente, la mayor parte de la literatura sobre COVID-19, se centra en modelos de predicción. Torrealba-Rodriguez et al. (2020) estudió la predicción de casos de infección por COVID-19 en México. Shen (2020) consideró el modelo de crecimiento logístico de la proliferación de COVID-19 en China y sus implicaciones internacionales. Wang et al. (2020) predijo la tendencia global y las tendencias específicas de Brasil, Rusia, India, Perú e Indonesia. Por otro lado, solo unos pocos trabajos integran los resultados de los modelos de predicción para apoyar la toma de decisiones. Por ejemplo, Loske (2020) analizó el impacto de COVID-19 en el volumen de transporte en la logística minorista de alimentos en Alemania, así como sus implicaciones resultantes. El autor propuso un análisis de regresión, para validar las interdependencias de COVID-19 y la logística de transporte en la logística minorista, y consideró la reasignación de la capacidad de atención médica, la reutilización de los hospitales y la estrecha colaboración entre el gobierno y el comité de atención médica. Pacheco & Laguna (2020) abordaron el problema de ruteo de vehículos para la entrega urgente de caretas protectoras, por medio del desarrollo de un modelo heurístico de búsqueda tabú. Zhang, Yan, Wu, & Zheng (2020) abordaron la programación de vehículos para transportar personas infectadas a áreas médicas aisladas y lo resolvieron utilizando un enfoque metaheurístico. Yu, Sun, Solvang, & Zhao (2020) propusieron el diseño de una red logística inversa multiobjetivo en brotes epidémicos.

La logística humanitaria ha surgido como un campo de estudio interesante para proporcionar operaciones de socorro más rápidas y eficientes después de la ocurrencia de un desastre, el análisis de publicaciones muestra una ascendente desde el año 2017 al 2020. En ese sentido, la investigación de operaciones es una de las herramientas recomendadas para apoyar la toma de decisiones en las operaciones de logística humanitaria.

La distribución de los problemas de logística humanitaria muestra que existe un vacío en la literatura en cuanto a estudios que aborden directamente el problema de LRP en un contexto humanitario. La toma de decisiones del LRP considera dos tipos de problemas, es decir, el problema de localización de instalaciones (decisión estratégica/táctica) y el problema de ruteo de vehículos (decisión operativa). Generalmente, debido a la complejidad de los problemas de localización de instalaciones y ruteo de vehículos, la mayoría de los trabajos en la literatura tienden a tratar cada problema por separado, sin embargo, este enfoque puede proporcionar soluciones inviables o subóptimas.

Dentro de los problemas de localización-ruteo, pocos trabajos involucran parámetros con incertidumbre dentro del desarrollo de los modelos de optimización, en donde las metodologías basadas en programación estocástica y optimización robusta son las más utilizadas, mientras que, pocos trabajos hacen uso de métodos de simulación integrados a algoritmos metaheurísticos.

Los trabajos recientes, muestran un especial interés de la comunidad científica en modelar la demanda como un parámetro estocástico y el enfoque de optimización se basa en la minimización de costos de localización y transporte y tiempos de recorrido principalmente.

Por último, los trabajos que se desarrollan en el contexto de la pandemia por COVID-19 se enfocan mayormente en modelos de predicción e impacto económico y logístico de la proliferación del virus, mientras que, pocos trabajos integran los resultados de los modelos de predicción en la toma de decisiones y, así mismo, existe una brecha en la literatura en el desarrollo de trabajos desde un punto de vista de investigación operativa al contexto de pandemia por COVID-19.

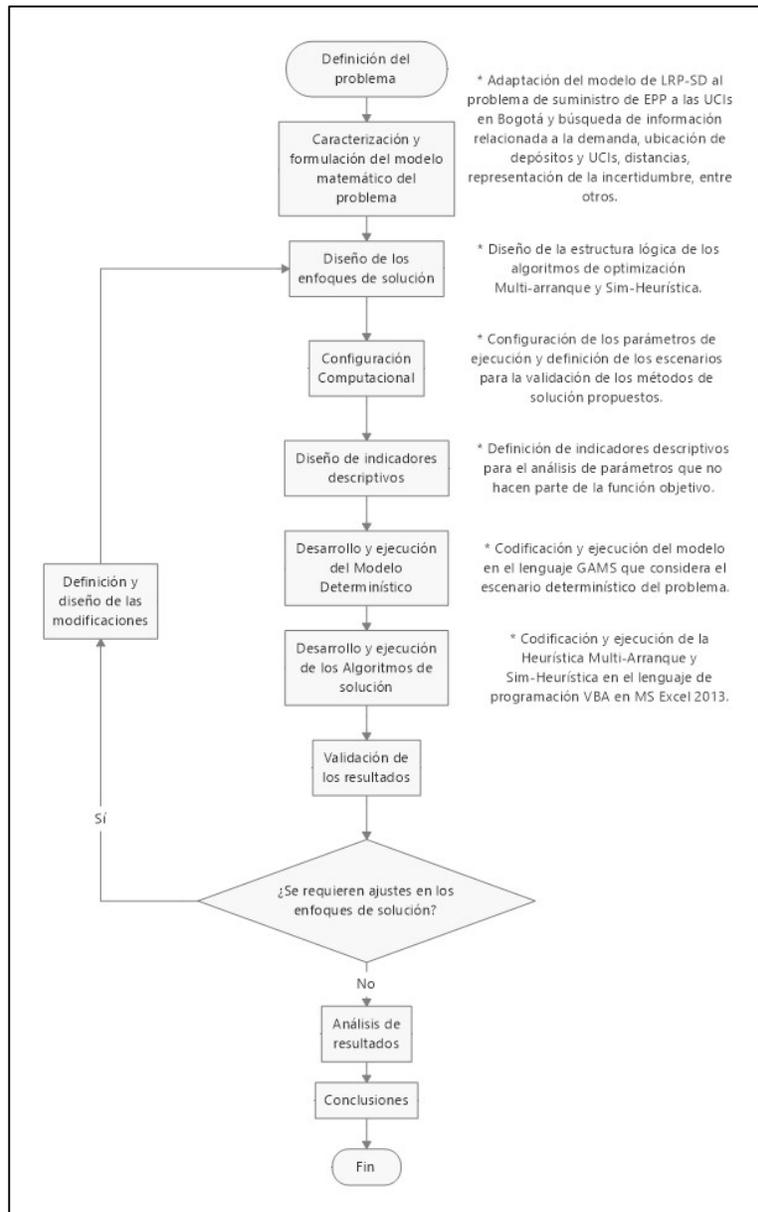
En este trabajo, se abordan las decisiones de localización y ruteo con demandas estocásticas desde un enfoque de optimización multi-arranque y Sim-heurístico como una alternativa para atender el suministro de EPP a las UCIs ubicadas en Bogotá, Colombia. Los principales aportes de este trabajo son:

- (i) Se atiende un problema emergente real para el suministro de EPP a las UCI.

- (ii) Se considera una ciudad (Bogotá, Colombia) con altos niveles de infecciones y muertes por la pandemia por COVID-19.
- (iii) Se consideran datos reales asociados a las instalaciones y a las UCIs.
- (iv) La incertidumbre en la demanda se estimó utilizando datos históricos de ocupación UCI en Bogotá, debido a la variación diaria de los pacientes con COVID-19.
- (v) Se propone un enfoque de optimización multi-arranque y uno simheurístico para facilitar el análisis de la confiabilidad durante la evaluación de soluciones alternativas de alta calidad que integran una búsqueda local iterativa con simulación de Monte Carlo.
- (vi) Se evaluaron diferentes políticas de stock de seguridad para hacer frente a la demanda incierta.
- (vii) Se proporciona una evaluación de las soluciones considerando el costo de distribución y la confiabilidad.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

A continuación, se muestra el diagrama de flujo (Gráfica 5) que representa la metodología utilizada en el presente trabajo de grado para el diseño, implementación y análisis de los enfoques de solución para resolver el problema de distribución de EPP a las UCIs de Bogotá, de tal manera que el personal médico pueda afrontar con una mayor protección, el reto de atender a los pacientes ingresados a las UCIs por infección por COVID-19. El detalle de lo realizado en cada fase de la metodología se detalla en las secciones 3.1 a 5.



Gráfica 5. Diagrama de flujo de la metodología del trabajo para el desarrollo de los enfoques de solución.

3.1. Definición del problema

En esta sección, se presenta un modelo para el suministro de EPP a las UCIs en Bogotá. El propósito del modelo es buscar un conjunto de ubicaciones de almacenes para proveer de EPP a las diferentes UCIs del sistema de salud en Bogotá, Colombia. Debido al contexto humanitario, se pueden considerar diversos factores con incertidumbre, como los tiempos de viaje, demanda, oferta, entre otros. Sin embargo, ante la pandemia de COVID-19, se decidió dirigir el enfoque en la incertidumbre de la demanda, ya que en la situación actual es fundamental garantizar que la cantidad de EPP entregados a las diferentes UCIs cubra las demandas reales, las cuales por la dinámica de la pandemia presentan un alto grado de incertidumbre. La demanda de EPP en la UCIs se considera como parámetro estocástico debido a que esta depende directamente de la cantidad de pacientes COVID internados, esto se debe a que el equipo médico debe renovar los EPP con cierta frecuencia dependiendo de la cantidad de pacientes que requieren atención. Tomando en consideración lo anterior, el problema se define formalmente como el problema de localización-ruteo con demandas estocásticas, debido al comportamiento de los requerimientos en las UCIs basado en la tasa de ingreso de pacientes con COVID-19.

El modelo de localización-ruteo con demandas estocásticas (LRP-SD por sus siglas en inglés), se define en un gráfico dirigido $G = (V, A)$. Donde V representa el conjunto de nodos que comprenden m posibles ubicaciones de depósito (W es el subconjunto de ubicaciones potenciales y S es un subconjunto de nodos) y n nodos UCI (I es un subconjunto de UCIs), mientras que A es el conjunto de arcos $a = (i, j)$ con costos C_a . $\delta^-(S)$ y $\delta^+(S)$ corresponden al conjunto de arcos que entran y salen de S , respectivamente, y $L(S)$ es el conjunto de arcos que terminan en S . Cada depósito está asociado a una capacidad fija Q_w y un costo de apertura O_w . Las UCIs tienen una demanda estocástica $D_i > 0$ y su variación se define de acuerdo con una distribución de probabilidad. Para hacer frente a la demanda incierta, se considera un stock de seguridad $\%SS$, el cual reduce la capacidad de los vehículos a la hora de planear las rutas, y a su vez se vuelve un colchón de seguridad frente a la incertidumbre a la hora de ejecutarlas (Simulación). Se dispone de una flota de K de vehículos homogéneos con capacidad h para el suministro de EPP a las UCIs y costo fijo de utilización por vehículo U . Se considera un costo variable relacionado con el consumo de combustible por vehículo C_a , que depende de la distancia recorrida por ruta. Se utilizan las siguientes variables de decisión binarias: Y_w se utiliza para representar la apertura del

depósito w , f_{ak} representa si el vehículo k atraviesa el arco a , o no y, finalmente, X_{iw} es para representar si una UCI i se asigna a depósito w o no.

Una solución del LRP-SD es un conjunto de ubicaciones de depósito abierto con UCIs asignadas y rutas de vehículos para suministrar los EPP a las UCIs desde el depósito asignado. El problema de localización-ruteo tiene como objetivo minimizar el costo total esperado y a su vez garantizar la confiabilidad de la solución. El costo total esperado incluye: (i) el costo de apertura de los depósitos, (ii) el costo de utilización de la flota de vehículos y (iii) el costo de transporte de las rutas para visitar a todas las UCIs representado por R_k , el cual considera un costo correctivo ρ de una solución, cuando la demanda supera la capacidad del vehículo, debido a la naturaleza estocástica de la demanda de las UCIs. La confiabilidad es medida y considera las fallas en las diferentes rutas, debido a la incertidumbre en la demanda. Como parte de las limitaciones, la demanda D_i debe ser atendida por un vehículo, por lo que no se consideran entregas parciales. Se debe respetar la demanda total de las UCIs. Cada ruta comienza y termina en alguno de los depósitos abiertos. Los depósitos y las rutas deben respetar la capacidad del depósito y del vehículo, respectivamente.

El modelo propuesto para el para el problema se basa en trabajos previos realizados por Martínez-Reyes et al. (2021a), Prins, Prodhon, & Calvo (2006) y Quintero-Araujo et al. (2019), y se formula de la siguiente manera:

$$\min z = \sum_{w \in W} O_w Y_w + \sum_{k \in K} \sum_{a \in \delta^+(M)} U f_{ak} + \sum_{k \in K} E[R_k] \quad (1)$$

$$R_k = \begin{cases} \sum_{a \in A} c_a f_{ak} & \text{Si } \sum_{i \in I} \sum_{a \in \delta^-(i)} D_i f_{ak} \leq (1 - \%SS)h \\ \sum_{a \in A} c_a f_{ak} + \rho & \text{D.L.C} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{a \in \delta^-(i)} f_{ak} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{a \in \delta^-(i)} E[D_i] f_{ak} \leq (1 - \%SS)h \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(j)} f_{ak} - \sum_{a \in \delta^-(j)} f_{ak} = 0 \quad \forall k \in K, \forall j \in V \quad (5)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(j)} f_{ak} \leq 1 \quad \forall k \in K, \forall i \in I \quad (6)$$

$$\sum_{a \in L(s)} f_{ak} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq I, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(w) \cap \delta^-(i)} f_{ak} - \sum_{a \in \delta^-(i)} f_{ak} \leq 1 + x_{iw} \quad \begin{matrix} \forall i \in I, \forall w \\ \in W, \forall k \in K \end{matrix} \quad (8)$$

$$\sum_{a \in L(s)} E[D_i] x_{iw} \leq Q_w y_w \quad \forall w \in W \quad (9)$$

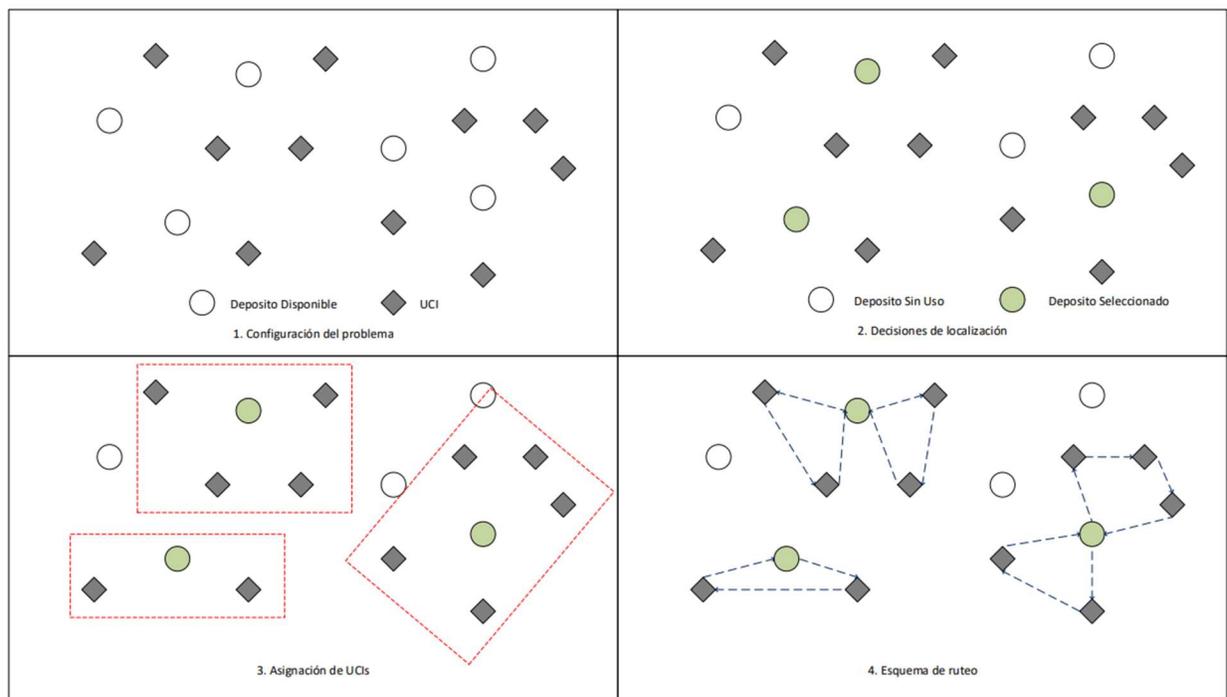
$$f_{ak}, x_{iw}, y_w \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A, \forall k \in K, \forall i \in I, \forall w \in W \quad (10)$$

La ecuación (1) es la función objetivo que consiste en la minimización de los costos de apertura, enrutamiento y falla, se considera que una ruta falla cuando esta no puede atender la demanda de una UCI, por lo que estos costos corresponden a un recorrido adicional desde la UCI al depósito, para abastecer el vehículo, y un recorrido desde el depósito a dicha UCI para abastecerla y retomar la ruta planeada. La ecuación (2) calcula los costos de falla. Las restricciones (3) garantizan que se atiende a cada UCI por un vehículo, estableciendo que una ruta debe hacer uso de un arco que llegue a dicha UCI. Las restricciones (4) garantizan que las demandas esperadas sean atendidas por cada ruta y respete la capacidad reducida de cada vehículo (es decir, la capacidad una vez que se aplica la política de stock de seguridad). Las restricciones (5) aseguran la continuidad de cada ruta y, combinada con las restricciones (6), se obliga a que cada vehículo regrese a su almacén de salida. Las desigualdades (7) evitan sub-rutas. Las restricciones (8) permiten que se generen rutas desde un depósito hacia las UCIs, si estas, han sido asignadas a dicho depósito. Las restricciones (9) respetan la capacidad del depósito. Finalmente, las expresiones (10) definen nuestras variables de decisión.

Las decisiones relacionadas al problema de localización-ruteo se muestran en la Gráfica 6. El problema considera las ubicaciones potenciales del centro de distribución (círculos) y las UCIs (cuadrados). La Gráfica 6 muestra la configuración inicial del problema (arriba a la izquierda), la

selección de los centros de distribución que se abrirán (arriba a la derecha), la asignación de UCIs a los centros de distribución abiertos (abajo a la izquierda) y la ruta desde los depósitos abiertos a sus UCIs asignadas (abajo a la derecha), al tiempo que se satisfacen el conjunto de restricciones.

Es bien sabido que las decisiones de localización tienen un gran impacto en los planes de ruteo, por lo que, el problema relacionado al suministro de EPP a las UCIs debe abordarse a través del LRP-SD, por otro lado, en situaciones de emergencia humanitaria, normalmente la configuración de la red logística no está definida, por lo que se requieren llevar a cabo las decisiones de localización a la vez que se definen los esquemas de ruteo. Sin embargo, a diario, la situación podría derivar en un problema de generación de rutas para vehículos de varios depósitos con demandas estocásticas. El diseño del algoritmo es flexible para manejar ambas situaciones con pequeños ajustes.



Gráfica 6. Representación gráfica de una solución completa para el LRP

3.2. Caracterización del problema

Para definir las principales variables y conjuntos asociados al problema LRP-SD para la distribución de EPP a las UCIs localizadas en Bogotá, se realizó una primera consulta, de acuerdo con el reporte del 31 de agosto de 2020 de casos confirmados de COVID-19 en Bogotá y la ocupación del total de UCI (Secretaría Distrital de Salud, 2021), para definir la cantidad de UCIs habilitadas para la atención de pacientes COVID, y la capacidad de atención (camas UCI disponibles). Posteriormente, con ayuda de Google Maps, se estableció la ubicación geográfica de la UCIs.

La información relacionada a los centros de distribución (Capacidad, costo y ubicación) se construyó de acuerdo con una búsqueda de depósitos disponibles para arriendo ubicados en Bogotá y que tuvieran una capacidad disponible de ente 4500 y 5000 Kg. Posteriormente, se realiza una depuración de depósitos con ubicación similar (≤ 6 Km) y una lista final de 9 depósitos. Una vez definidos los conjuntos de UCIs y CEDIS, se consolida la matriz de distancias del problema por medio de la API de Google “gmapsdistance” y con ayuda del software R. La capacidad y autonomía de los vehículos corresponde a la información de carga real del Chevrolet NHR (Chevrolet, 2020).

Para definir la demanda de cada UCI, inicialmente se consultó con el director general de la clínica de la Universidad de La Sabana sobre el equipamiento diario de EPP requerido por el cuerpo médico, para dar atención a un paciente COVID-19, el cual considera la cantidad de médicos, especialistas y enfermeras que dan atención al paciente y el número de revisiones diarias que el equipo realiza y que requieren de EPP. Con base en esta información, se definen los kits de EPP compuestos por guantes, tapabocas, mascarillas y trajes desechables, y se establece un peso neto de 1 Kg para cada kit.

Para representar la incertidumbre en la demanda de EPP requeridos por las UCIS, se modela con una distribución de probabilidad, de acuerdo con el reporte del 31 de agosto de 2020 de casos confirmados de COVID-19 en Bogotá y el porcentaje de ocupación total de las UCIs (Secretaría Distrital de Salud, 2021). El ajuste de la distribución se realizó utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 26 para seleccionar la distribución estadística que mejor se ajusta a la demanda.

3.3. Enfoque de Solución

3.3.1. Método Multi-Arranque

En esta sección, se presenta la lógica del algoritmo Multi-Arranque, el cual sigue tres pasos principales relacionados a las decisiones de localización, asignación y ruteo. El pseudocódigo de la heurística propuesta se presenta en la Gráfica 7.

```
Procedimiento Multi_arranque_LRP()
  Para iter ← 1 hasta max_iter
    Localización()           // Abrir depósitos
                             // aleatoriamente
    Asignación()             // Asignar UCIs a un depósito
                             // abierto
    Ruteo()                  // Construir rutas para cada
                             // depósito abierto

    Si F(s) < F(s*)
      F(s*) ← F(s)
      s* ← s
    Fin si
  Siguiendo
Fin procedimiento
```

Gráfica 7. Pseudocódigo de la heurística propuesta

En el procedimiento de localización se selecciona aleatoriamente un conjunto de depósitos candidatos. El número de depósitos dentro del conjunto debe garantizar que se pueda atender la demanda total. El procedimiento se describe en la Gráfica 8.

```
Procedimiento Localización()
  Cobertura=0

  // Abrir depósitos aleatoriamente

  Mientras que Cobertura < Demanda_total
    Abrir_WH_R()
    Cobertura ← Cobertura + WH_cap()
  Repetir
Fin Procedimiento
```

Gráfica 8. Procedimiento de Localización

En la etapa de asignación, los clientes se asignan a los depósitos previamente seleccionados, para ello, se selecciona aleatoriamente un nodo y se asigna al depósito abierto más cercano con

capacidad disponible. Luego, se actualiza la capacidad del depósito. Este proceso se ejecuta hasta que todos los nodos se asignan a un depósito abierto. Si se necesitan más depósitos, la función `Abrir_WH_R ()` se ejecuta y los nodos no asignados se asignan a un nuevo depósito abierto aleatoriamente. La Gráfica 9 muestra el detalle del esquema de asignación.

```
Procedimiento Asignación()  
  // Asignar UCIs a un depósito abierto  
  
  Hasta que Asignación_UCIs_WH ← Verdadero  
    j ← Seleccionar_cliente_R()  
  
    Para i=1 hasta num_depots  
      Si Cap_disponible(i) ≥ UCI_Demand  
        Si Dist_Dep_UCI(i,j) < Dist_Dep_UCI(Mejor_depot,j) o  
          Mejor_depot ← Vacio  
  
          Mejor_depot ← i  
        Fin si  
      Fin Si  
    Siguiete  
  
    Asignar_WH_UCI() // Asigna la UCI al Mejor_depot y se  
                    // actualiza Cap_disponible(Mejor_depot)  
  
    Si WH_Disponible ← Falso  
      Abrir_WH_R()  
      Asignar_WH_cliente()  
    Fin si  
  Repetir  
Fin Procedimiento
```

Gráfica 9. Procedimiento de Asignación

Para crear las rutas, se ejecuta el algoritmo de ruteo. En este proceso, se ejecuta una versión modificada de la heurística del vecino más cercano, la cual selecciona aleatoriamente el nodo inicial y se ejecuta la heurística tradicional del vecino más cercano, finalizando la ruta en el depósito cuando la demanda del próximo cliente no puede ser atendida por el vehículo. Este proceso se ejecuta hasta que se visitan todos los nodos. El procedimiento se describe en la Gráfica 10.

```

Procedimiento Ruteo()

//Construir rutas para cada depósito abierto

Para i ← 1 hasta num_WH
  Si WH_Abierto(i) ← Verdadero

    Ruta ← 1
    Hasta que Cliente_WH_Visitado ← Verdadero

      VMC() // Heurística del vecino más cercano hasta
            // completar capacidad del vehículo
      Ruta ← Ruta + 1
    Repetir
  Fin si
Siguiendo

Si F(s) < F(s*)
  F(s*) ← F(s)
  s* ← s
Fin si

Fin procedimiento

```

Gráfica 10. Procedimiento de Ruteo

El algoritmo se ejecuta durante un número determinado de iteraciones (max_iter) y se mantiene la mejor solución entre las ejecuciones. El método Multi-arranque se presenta como un modelo sencillo de exploración aleatoria que se utiliza como método para la generación de las soluciones iniciales del modelo Sim-heurístico. De igual manera, al proveer este método una solución completa al problema, y en la cual es susceptible de aplicarse una política de protección, se considera en este trabajo como un método independiente.

3.3.2. Método Sim-Heurístico

En esta sección se detalla el modelo sim-heurístico desarrollado para abordar el problema de localización-ruteo con demanda estocásticas. El enfoque se basa en un algoritmo de búsqueda local iterativa (ILS por sus siglas en inglés) combinado con simulación de Monte Carlo (SMC), de acuerdo con Lourenço, Martin, & Stützle, (2010) y Carlos L. Quintero-Araujo et al., (2017), los métodos ILS resultan ser una alternativa de implementación simple mostrando una gran efectividad para resolver problemas complejos y, a diferencia de otros enfoques en la literatura que constan de un gran número de parámetros que deben ser ajustados, el enfoque ILS requiere poco ajuste. La parte de optimización del algoritmo se lleva a cabo siguiendo el esquema ILS,

mientras que la simulación se utiliza para evaluar la calidad de las soluciones proporcionadas en el comportamiento estocástico del problema. El esquema ILS es un enfoque basado en búsqueda local usado frecuentemente en la academia y el cual resulta efectivo para solucionar problemas determinísticos. Por ello, se define una estrategia de protección (política de stock de seguridad) para enfrentar la incertidumbre de la demanda y, por lo tanto, obtener mejores resultados en el escenario estocástico.

Durante el desarrollo del modelo sim-heurístico se realizaron dos versiones de este, las cuales se describen a continuación:

La primera aproximación del método sim-heurístico comprende un procedimiento Multi-Arranque para obtener un conjunto de soluciones iniciales. Posteriormente, estas soluciones se pasan a través de un motor SMC (Simulación de Monte Carlo), para estimar su calidad en entornos estocásticos. Luego, las soluciones prometedoras mejor clasificadas se llevan al procedimiento ILS, con el fin de mejorar el conjunto de soluciones. Finalmente, se realiza un procedimiento de SMC para afinar las estimaciones sobre la calidad de las soluciones obtenidas en el escenario estocástico. Una vez finalizado el algoritmo, se reportan las 10 mejores soluciones obtenidas (ver Gráfica 11).

```
Procedimiento Sim-Heurística.ver1 (LS_op, Div_op)

  Para iter ← 1 hasta max_iter
    Multi_Arranque_LRP (MS_pool)      // Construir MS_pool de
                                     // soluciones iniciales aleatorias
  Siguiendo
    SMC (Sim_iter, MS_pool)
    ILS (ILS_pool, Top10_MS_pool, LS_op, Div_op) //Algoritmo ILS para
                                                // cada solución en
                                                // Top10_MS_pool
    SMC (Sim_iter, ILS_pool)
    Reportar soluciones en Top10_ILS_pool

Fin procedimiento
```

Gráfica 11. Pseudocódigo del método sim-heurístico (versión 1)

Como se detalló en la sección anterior, el procedimiento Multi-Arranque se divide en 3 etapas:

- (i) Apertura de depósitos: los depósitos que se abrirán se seleccionan al azar, hasta que haya suficiente capacidad disponible para atender la demanda total esperada.
- (ii) Asignación de UCIs a depósitos abiertos: se elige al azar una UCI no asignada y se asigna a su depósito abierto más cercano, con capacidad disponible para atender la demanda de la UCI seleccionada; este proceso se ejecuta hasta que se hayan asignado todas las UCIs. En caso de que no se pueda asignar un subconjunto de UCIs debido a limitaciones de capacidad, se selecciona aleatoriamente un depósito cerrado, se establece como abierto y se le asignan las UCIs no asignadas.
- (iii) Planificación de rutas: para crear rutas, desde cada depósito abierto, se selecciona aleatoriamente la primera UCI que se visitará, mientras que las siguientes UCIs se agregan utilizando la heurística del vecino más cercano, hasta que se satisfaga la capacidad; luego, el vehículo se envía de regreso al depósito y se conforman nuevas rutas usando la misma lógica hasta que se visitan todas las UCIs.

Las etapas antes mencionadas se ejecutan durante un cierto número de iteraciones, manteniendo las mejores soluciones encontradas. Una vez ejecutado el procedimiento Multi-Arranque, se realiza una etapa de simulación, para tener una aproximación de los costos estocásticos esperados y las confiabilidades para cada solución. Es importante señalar que los costos estocásticos se definen como el costo requerido para atender una UCI, cuando su demanda no se puede atender en su totalidad, es decir, el costo de un viaje de ida y vuelta desde la UCI correspondiente al depósito, para recargar completamente el vehículo y regresar a la UCI para atenderla y continuar la ruta. Cada vez que una ruta no puede atender a todos los clientes, el número de fallos de ruta aumenta en uno. Luego, la confiabilidad estimada de cada ruta se puede calcular como uno menos el cociente entre las fallas de la ruta y el total de ejecuciones de simulación, como se muestra en la ecuación (11).

$$Confiabilidad_r = \left(1 - \frac{\sum_{n=0}^{Ejecuciones\ SMC} Fallas\ en\ Ruta}{Total\ Ejecuciones\ SMC} \right) * 100\% \quad (11)$$

La confiabilidad global para una solución dada s conformada por rutas R se calcula como se muestra en la ecuación (12).

$$Confiabilidad_s = \prod_{r=1}^R Confiabilidad_R \quad (12)$$

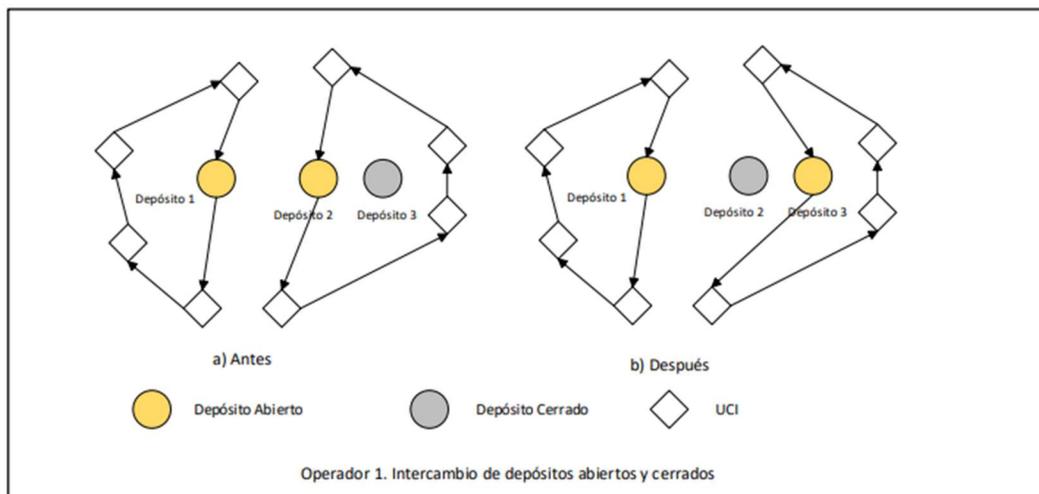
Posteriormente, las 10 mejores soluciones obtenidas por el procedimiento Multi-Arranque se mejoran utilizando un marco ILS en el que primero se aplica un procedimiento de búsqueda local en cada solución, luego se perturba la solución y nuevamente se realiza una búsqueda local sobre esta. Para ello, se implementó un operador de perturbación y dos operadores de búsqueda local diferentes.

La descripción gráfica del operador de diversificación y los operadores búsqueda local utilizados en la primera versión del modelo sim-heurístico se pueden ver en la Gráfica 12 y la Gráfica 13 respectivamente.

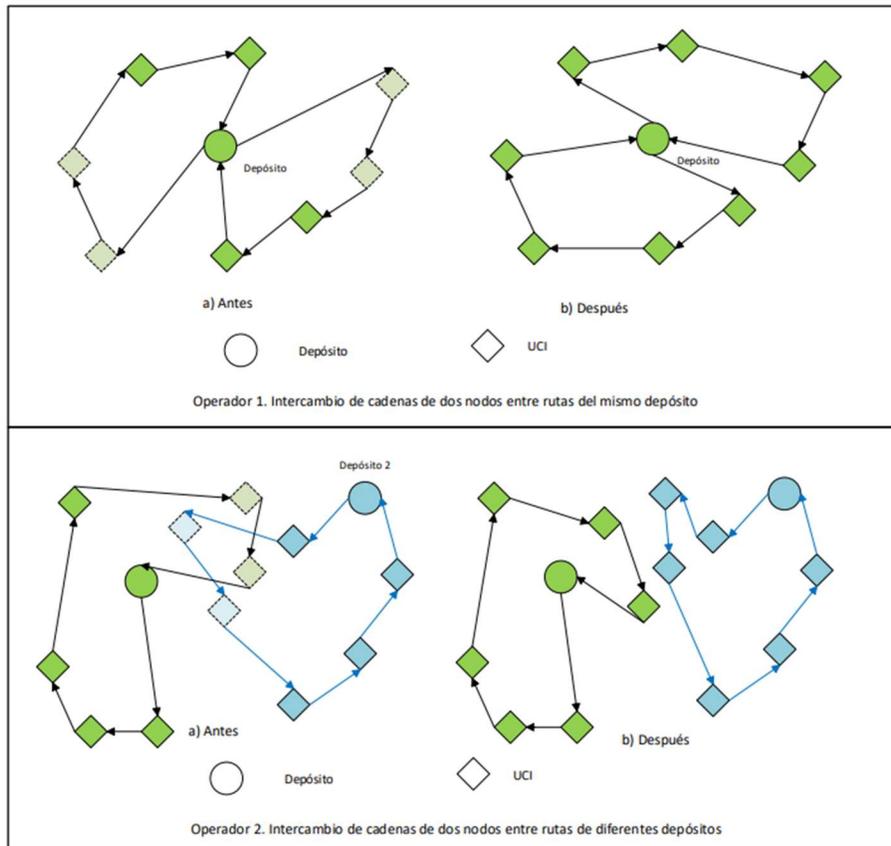
El operador de diversificación consta de un intercambio de depósitos abiertos y cerrados, en donde, se selecciona un depósito abierto aleatoriamente y se intercambia con un depósito cerrado de capacidad igual o superior, las UCIs previamente atendidas por el depósito que se cerrará se asignan al depósito recientemente abierto y las rutas se planifican utilizando la heurística de enrutamiento explicada en el procedimiento Multi-Arranque.

Los operadores de búsqueda locales se definieron de la siguiente manera:

- (i) Intercambio de cadenas de dos nodos entre rutas del mismo depósito.
- (ii) Intercambio de cadenas de dos nodos entre rutas de diferentes depósitos.



Gráfica 12. Operador de Diversificación de la primera versión del modelo sim-heurístico



Gráfica 13. Operadores de Búsqueda Local de la primera versión del modelo sim-heurístico

Las soluciones prometedoras obtenidas por el método ILS se pasan a través de un proceso de simulación, para realizar las estimaciones tanto de los costos estocásticos esperados, como de la confiabilidad. Cabe mencionar que los stocks de seguridad (%SS) se utilizan en la planificación de rutas, para reducir la posibilidad de no atender algunas UCIs al realizar las tareas de enrutamiento, debido a la incertidumbre de la demanda. Sin embargo, después de un cierto valor (demasiado conservador) de stock de seguridad, los costos esperados podrían aumentar debido a costos fijos excesivos. El objetivo es encontrar la política de stock de seguridad más conveniente, es decir, el valor que proporcione la mejor compensación entre los costos esperados y la confiabilidad.

Para la segunda versión del algoritmo sim-heurístico, se llevan a cabo etapas similares descritas en la primera versión, pero con algunos cambios significativos. El modelo empieza de igual

manera, con un método Multi-Arranque para establecer un conjunto de soluciones iniciales. Posteriormente, estas soluciones se pasan a través de un motor SMC de dos fases, para estimar su calidad en entornos estocásticos. La primera fase consiste en una estimación de los costos estocásticos y confiabilidades dentro del conjunto de soluciones comprendidas en MS_pool, mientras que, en la segunda fase, se refinan los costos estocásticos y las confiabilidades de las 10 mejores soluciones con una simulación intensiva. Luego, las soluciones prometedoras mejor clasificadas se llevan al procedimiento ILS extendido, con el fin de mejorar el conjunto de soluciones. Finalmente, se realizan dos procesos SMC para ordenar las soluciones de acuerdo con sus costos estocásticos esperados y afinar las estimaciones sobre la calidad de las soluciones obtenidas en el escenario estocástico. Una vez finalizado el algoritmo, se reportan las 10 mejores soluciones obtenidas (ver Gráfica 14).

```
Procedimiento Sim-Heurística (LS_op, Div_op)

  Para iter ← 1 hasta max_iter
    Multi_Arranque_LRP (MS_pool) // Construir MS_pool de soluciones
                                iniciales aleatorias

  Siguiendo

  SMC (Short_iter, MS_pool)
  SMC (Long_iter, Top10_MS_pool)

  ILS (ILS_Pool, Top10_MS_pool, LS_op, Div_op) //Algoritmo ILS para
                                                cada solución en
                                                Top10_MS_pool

  SMC (Short_iter, ILS_pool)
  SMC (Long_iter, Top10_ILS_pool)

  Reportar soluciones en Top10_ILS_Pool

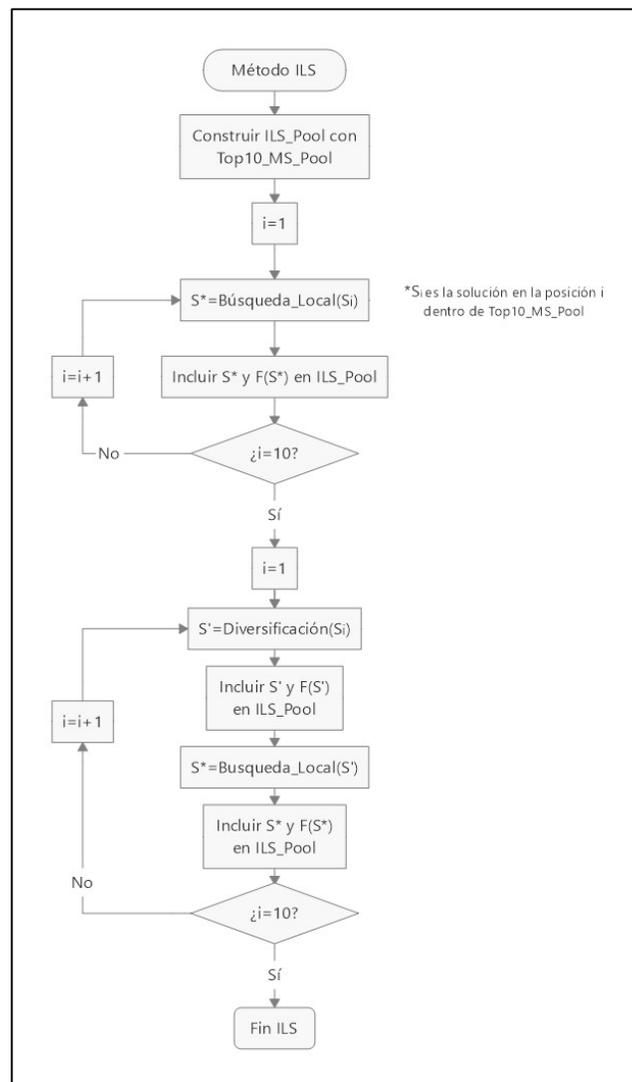
Fin Procedimiento
```

Gráfica 14. Pseudocódigo del método sim-heurístico (versión final)

La estructura del procedimiento Multi-Arranque del modelo sim-heurístico es igual a la descrita anteriormente y se ejecuta durante un cierto número de iteraciones, manteniendo las mejores soluciones encontradas. Una vez ejecutado el procedimiento Multi-Arranque del modelo sim-heurístico, se realizan dos etapas de simulación. La primera etapa es una pequeña simulación para

tener una primera aproximación de los costos estocásticos esperados y las confiabilidades para cada solución. Posteriormente, se realiza una simulación más intensiva, para refinar las estimaciones anteriores para las 10 mejores soluciones, de acuerdo con sus costos estocásticos estimados.

Después del segundo proceso de simulación, las 10 mejores soluciones obtenidas por el procedimiento Multi-Arranque se mejoran, utilizando un marco ILS (ver Gráfica 15) en el que primero se aplica un procedimiento de búsqueda local en cada solución, luego se perturba la solución y nuevamente se realiza una búsqueda local sobre esta. Para ello, se implementaron dos operadores de perturbación y cuatro operadores de búsqueda local diferentes.

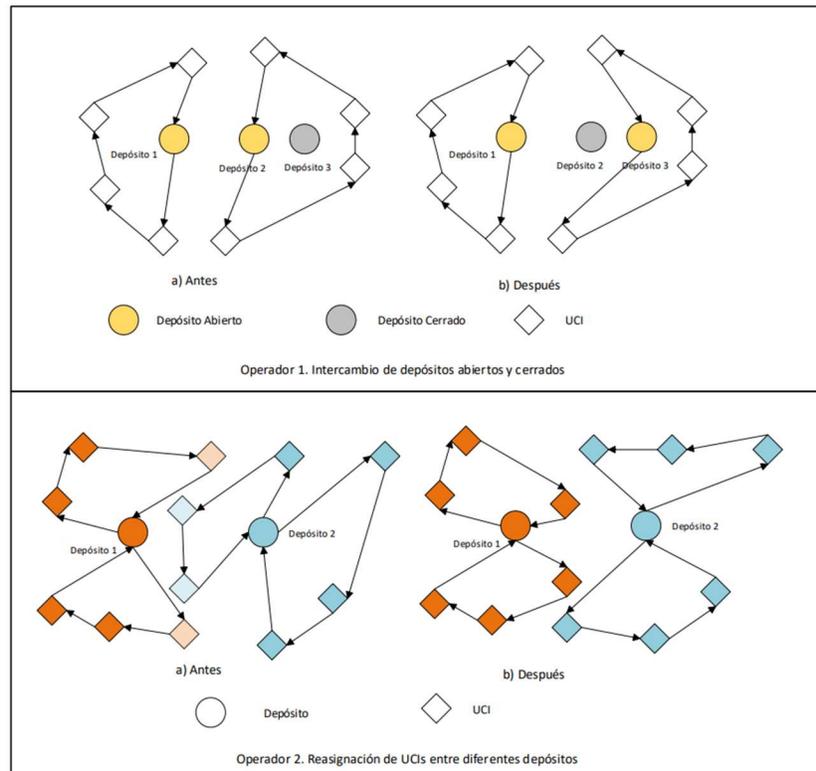


Gráfica 15. Diagrama de flujo del procedimiento ILS

Los operadores de perturbación son:

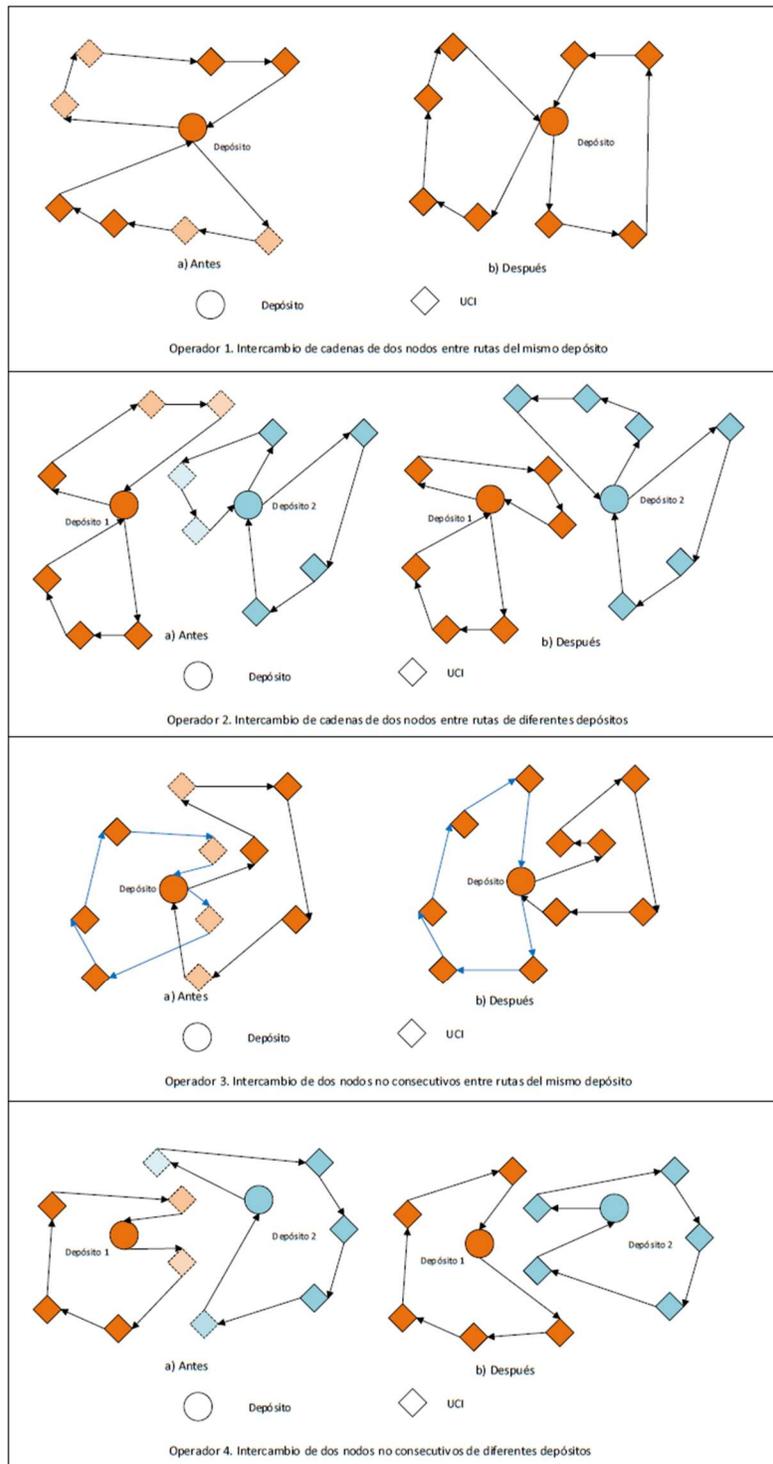
- (i) Intercambio de depósitos abiertos y cerrados: se selecciona aleatoriamente un depósito entre los abiertos y se intercambia con un depósito cerrado, seleccionado aleatoriamente, con capacidad igual o superior para satisfacer la demanda de las UCIs correspondientes, es decir, las UCIs previamente asignadas al depósito que se cerrará; luego las UCIs se asignan al depósito recientemente abierto y las rutas se planifican utilizando la heurística de enrutamiento explicada en el procedimiento Multi-Arranque (consulte la Gráfica 16, arriba).
- (ii) Reasignación de UCIs entre diferentes depósitos: un porcentaje dado de UCIs, que oscila entre el 20% y el 50%, se selecciona aleatoriamente y se intercambia entre los depósitos abiertos (ruptura de la asignación de UCI) y, las siguientes rutas se crean con el enrutamiento ya mencionado. (Gráfica 16, abajo).

En la Gráfica 16, se presenta un esquema grafico de los operadores de perturbación.



Gráfica 16. Operadores de Diversificación

En la Gráfica 17 se presenta un esquema grafico de los cuatro operadores de búsqueda local.



Gráfica 17. Operadores de Búsqueda Local

Los operadores de búsqueda locales se definieron de la siguiente manera:

- (i) Intercambio de cadenas de dos nodos entre rutas del mismo depósito.
- (ii) Intercambio de cadenas de dos nodos entre rutas de diferentes depósitos.
- (iii) Intercambio de dos nodos no consecutivos entre rutas del mismo depósito.
- (iv) Intercambio de dos nodos no consecutivos entre rutas de diferentes depósitos.

Las soluciones prometedoras, obtenidas por el método ILS, se pasan a través de un breve proceso de simulación, después del cual se clasifican por sus costos estocásticos esperados. Posteriormente, las 10 mejores soluciones estocásticas siguen por un proceso de simulación intensivo, para refinar las estimaciones tanto de los costos estocásticos esperados, como de la confiabilidad. Cabe mencionar que los stocks de seguridad (%SS) se utilizan en la planificación de rutas para reducir la posibilidad de no atender algunas UCIs al realizar las tareas de enrutamiento, debido a la incertidumbre de la demanda. Sin embargo, después de un cierto valor (demasiado conservador) de stock de seguridad, los costos esperados podrían aumentar debido a costos fijos excesivos. El objetivo es encontrar la política de stock de seguridad más conveniente, es decir, el valor que proporcione la mejor compensación entre los costos esperados y la confiabilidad.

4. CONFIGURACIÓN COMPUTACIONAL

Los experimentos se realizaron en un PC personal con sistema operativo Windows y con procesador con Intel® Core™ i7 - sexta generación y 8 Gb de RAM. El problema de localización-ruteo se modeló y resolvió utilizando el lenguaje de modelado GAMS, con Cplex 12.8.0.0 como motor de solución y un límite de tiempo de 8 h (28800 segundos). Para ello, hemos adaptado la formulación del problema de localización-ruteo con demandas estocásticas propuesta por Quintero-Araujo et al. (2019), para representar la versión determinista, eliminando los costos de falla, asumiendo demandas determinísticas y usando $\%SS = 0$. La heurística Multi-Arranque y la sim-heurística propuesta fue codificada en lenguaje Visual Basic para Aplicaciones (VBA) en MS Excel 2013. Como establecen Erdoğan (2017) y Martínez-Reyes et al. (2021a), las soluciones basadas en hojas de cálculo se consideran debido a su familiaridad con la interfaz, facilidad de uso, flexibilidad, accesibilidad y bajo costo, generando importantes ahorros para las empresas, especialmente en los países en vía de desarrollo.

El conjunto de instancias se generó considerando la ubicación de las UCIs y posibles ubicaciones de los centros de distribución en Bogotá, Colombia. Las ubicaciones se tomaron de Google Maps con sus correspondientes coordenadas de latitud y longitud. La distancia para cada arco (i, j) se recupera utilizando la API de distancias de Google “gmapsdistance” y el software R-4.0.2. El valor esperado para las demandas (DE) corresponde al peso del EPP compuesto por máscara, guantes y overoles impermeables, requerido para cada UCI, asumiendo que cada paciente es atendido por un equipo compuesto por un médico, una enfermera y un terapeuta. El equipo visita a cada paciente una vez por hora, por lo que se requieren 24 visitas durante un día completo (Martínez-Reyes et al., 2021a).

La demanda incierta relacionada con los requerimientos de EPP se modela con una distribución de probabilidad, de acuerdo con el reporte del 31 de agosto de 2020 de casos confirmados de COVID-19 en Bogotá y la ocupación del total de UCI (Secretaría Distrital de Salud, 2021). El ajuste de la distribución se realiza utilizando el software IBM SPSS Statistics versión 26, para seleccionar la distribución estadística que mejor se ajusta a la demanda. Como resultado, se obtuvo la distribución de Weibull con los parámetros $a = 13.8$; $b = 1.4$, donde a es la escala y b es la forma. Así, la variación de las demandas D_i se genera con la siguiente ecuación:

$$D_i = b * (-LN(RAND()))^{(1/a)} \tag{13}$$

En donde $RAND()$ corresponde a un número pseudoaleatorio uniforme entre 0 y 1. La capacidad de los depósitos garantiza la satisfacción total de la demanda. El O_i para cada CD corresponde a los costos reales de renta mensual en Bogotá en US \$ (4.7US \$ / m² por mes). La capacidad de la flota $Q = 2218$ Kg y el consumo de combustible (11,4 Km / galón) corresponden a la información de carga real del Chevrolet NHR (Chevrolet, 2020). Cada equipo de EPP pesa 1 Kg y el costo del combustible es de 2,1US\$ / galón. Todas las instancias están disponibles en <https://cutt.ly/obASjVa>. Los nombres de archivo se definen como MQS-BOG #, donde # identifica el número de la instancia. En total se generaron 18 instancias configuradas como se puede ver en la Tabla 3. Cada instancia se generó seleccionando aleatoriamente un número de UCIs y depósitos de una lista de 53 y 9 nodos respectivamente, en donde, la instancia 18 considera el escenario completo que considera el total de UCIs y depósitos disponibles.

Tabla 3. Configuración de las Instancias MQS-BOG #

Instancia #	UCIs	Depósitos
MQS-BOG 1	30	5
MQS-BOG 2	35	5
MQS-BOG 3	40	5
MQS-BOG 4	45	5
MQS-BOG 5	50	5
MQS-BOG 6	53	5
MQS-BOG 7	30	7
MQS-BOG 8	35	7
MQS-BOG 9	40	7
MQS-BOG 10	45	7
MQS-BOG 11	50	7
MQS-BOG 12	53	7
MQS-BOG 13	30	9
MQS-BOG 14	35	9
MQS-BOG 15	40	9
MQS-BOG 16	45	9
MQS-BOG 17	50	9
MQS-BOG 18	53	9

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el conjunto de instancias, se evalúan dos escenarios, los cuales corresponden a la versión determinística del LRP y el LRP-SD. Los resultados detallados para el caso determinístico se proporcionan en la Tabla 4. La tabla muestra por cada instancia los resultados de GAMS/cplex, la mejor solución determinística reportada por ambos enfoques de solución (heurística Multi-Arranque y Sim-heurística), el GAP entre los resultados de ambos algoritmos y GAMS, y el GAP entre las soluciones encontradas por el algoritmo Multi-Arranque y la Sim-heurística. Vale la pena mencionar que, ninguna de las soluciones proporcionadas por GAMS/cplex demostró ser óptima en el límite de tiempo definido (28800 segundos).

Los indicadores Costo total y Confiabilidad, definidos en el capítulo 3, se usan para comparar los resultados de cada instancia. Adicionalmente, con el fin de evidenciar el comportamiento de otros parámetros que no se usaron como medida para establecer la calidad de las soluciones, se diseñaron los siguientes indicadores descriptivos:

- (i) Porcentaje promedio de demanda no atendida en la ruta planeada: Contabiliza el porcentaje promedio de la demanda que no es atendida en el primer recorrido de las rutas planificadas. Como se mencionó en el capítulo 3, si los kits de EPP disponibles en el vehículo no son suficientes para atender la demanda de una UCI, el vehículo realiza un recorrido desde esta UCI al depósito para abastecerse y posteriormente continuar la ruta. Este indicador refleja la cantidad de kits de EPP faltante promedio en Kg, para completar la demanda de la UCI en la que falló la ruta y las demandas siguientes, hasta finalizar la ruta a lo largo de las simulaciones. La ecuación 14 refleja el cálculo de este indicador.

$$\% \text{ Demanda no atendida} = \frac{\sum_{i=0}^{\text{Ejecuciones SMC}} DF_i}{\text{Ejecuciones SMC} * \text{Demanda Total}} \quad (14)$$

$DF_i = \text{Demanda no atendida en ruta planeada de la simulación } i$

- (ii) Porcentaje de ocupación de los vehículos: Refleja el porcentaje de la demanda asignada a cada ruta k sobre la capacidad del vehículo. La ecuación 15 presenta el cálculo de este indicador.

$$\% \text{ ocupación}_k = \frac{\text{CargarAsig}_k}{\text{CapacidadVehículo}} \quad (15)$$

(iii) Costo promedio de transporte: Representa el costo promedio de transporte de cada ruta k a lo largo de las simulaciones. El cálculo de este indicador se refleja en la ecuación 16.

$$\text{Cto Promedio Transporte}_k = \frac{\sum_{i=0}^{\text{Ejecuciones SMC}} \text{CtoTransporte}_{k,i}}{\text{EjecucionesSMC}} \quad (16)$$

Como puede verse, ambos enfoques de solución superan a las soluciones proporcionadas por el software GAMS en todas las instancias, con brechas porcentuales que van del -24.38% al -0.02% con respecto a la mejor solución encontrada por GAMS/Cplex. En promedio, nuestra brecha representa una reducción del 9.63% con el algoritmo Multi-arranque y del 9.86% con la Sim-heurística en comparación con los resultados de GAMS. De acuerdo con el GAP% entre las soluciones de los 2 algoritmos, se puede afirmar que el método Sim-heurístico es ligeramente mejor en todas las instancias que el algoritmo Multi-arranque, representando una brecha promedio del 0.19%. En la Tabla 5, se detalla la configuración de cada instancia, en cuanto a número de depósitos y UCIs, como también los tiempos computacionales de cada uno de los algoritmos. Es importante mencionar que ambos algoritmos requieren de tiempos de cálculo cortos para ejecutarse, siendo de alrededor 2.5 segundos y de 46 segundos en promedio por instancia, en el peor de los casos para el algoritmo Multi-arranque y el método Sim-heurístico respectivamente. Este es un factor clave de nuestros enfoques, ya que el tiempo disponible para la toma de decisiones asociado es escaso (2-3 horas en la vida real).

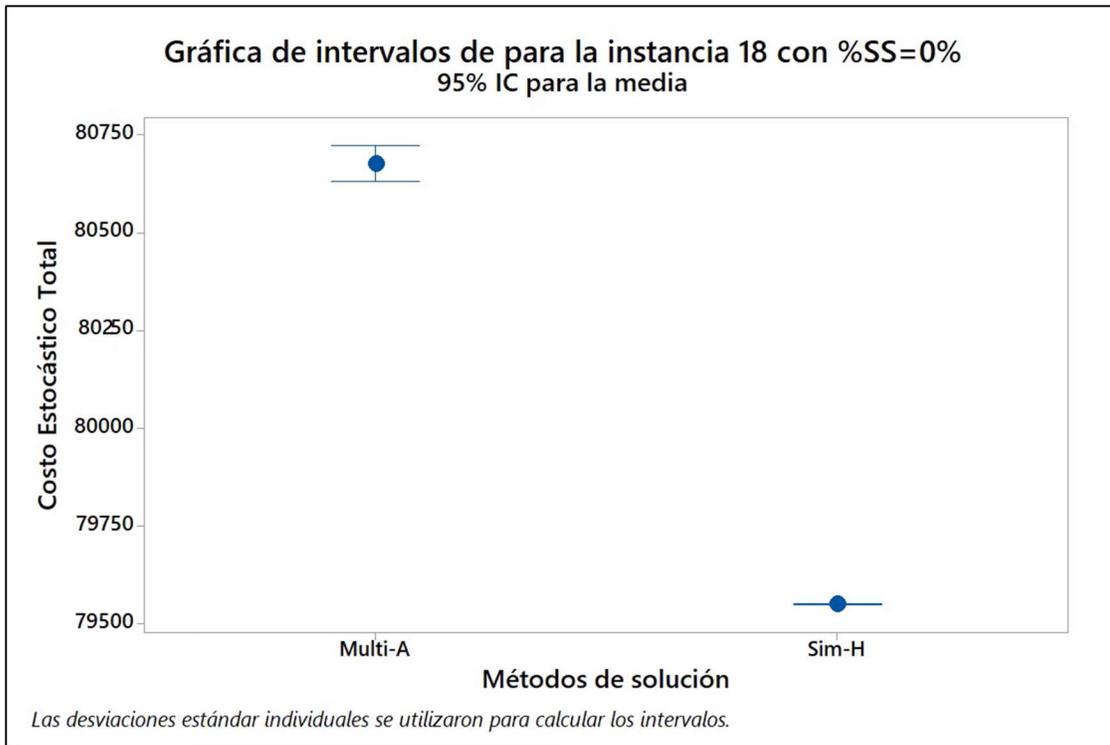
Tabla 4. Resultados para el caso Determinístico

Instancia	GAMS/cplex (1)	Multi-Arranque	Sim-Heurística	GAP% (2)-(1)	GAP% (3)-(1)	GAP% (2)-(3)
		Mejor Solución (2)	Mejor Solución (3)			
MQS-BOG1	44,889.30	44,873.22	44,872.61	-0.04%	-0.04%	0.001%
MQS-BOG2	53,853.77	53,821.79	53,820.48	-0.06%	-0.06%	0.002%
MQS-BOG3	59,881.04	59,837.62	59,837.25	-0.07%	-0.07%	0.001%
MQS-BOG4	82,393.23	79,594.03	79,592.52	-3.40%	-3.40%	0.002%
MQS-BOG5	101,602.15	79,985.95	79,983.04	-21.28%	-21.28%	0.004%
MQS-BOG6	92,227.30	91,247.07	91,245.24	-1.06%	-1.06%	0.002%
MQS-BOG7	53,829.25	53,819.02	53,817.39	-0.02%	-0.02%	0.003%
MQS-BOG8	62,773.60	59,387.53	57,565.60	-5.39%	-8.30%	3.165%
MQS-BOG9	62,753.39	58,956.65	58,955.68	-6.05%	-6.05%	0.002%
MQS-BOG10	92,202.79	69,725.86	69,721.68	-24.38%	-24.38%	0.006%
MQS-BOG11	97,794.08	76,282.63	76,235.00	-22.00%	-22.05%	0.062%
MQS-BOG12	110,441.48	87,015.32	87,009.51	-21.21%	-21.22%	0.007%
MQS-BOG13	49,635.79	49,600.99	49,598.94	-0.07%	-0.07%	0.004%
MQS-BOG14	69,746.49	53,822.32	53,821.92	-22.83%	-22.83%	0.001%
MQS-BOG15	75,367.08	69,288.43	69,287.91	-8.07%	-8.07%	0.001%
MQS-BOG16	75,372.46	69,293.83	69,290.25	-8.06%	-8.07%	0.005%
MQS-BOG17	95,046.09	76,240.08	76,237.23	-19.79%	-19.79%	0.004%
MQS-BOG18	N/A	79,551.25	79,547.55	-	-	-
PROMEDIO				-9.63%	-9.862%	0.192%

Tabla 5. Configuración de la mejor solución y tiempos computacionales de los métodos propuestos para cada instancia

Instancia	Depósitos	UCIs	Multi-Arranque		Sim-Heurística	
			Tiempo para encontrar la mejor solución (s)	Tiempo total (s)	Tiempo para encontrar la mejor solución (s)	Tiempo total (s)
MQS-BOG1	5	30	0.1	0.5	1.2	23.6
MQS-BOG2	5	35	1	1.1	0.9	26.0
MQS-BOG3	5	40	0.8	1.3	29.1	30.0
MQS-BOG4	5	45	0.1	1.8	7.8	32.1
MQS-BOG5	5	50	0.7	2.2	1.4	39.2
MQS-BOG6	5	53	0.3	2.4	22.4	37.4
MQS-BOG7	7	30	0.1	0.6	13.0	22.5
MQS-BOG8	7	35	0.3	1.1	5.3	26.6
MQS-BOG9	7	40	1.2	1.4	6.9	30.5
MQS-BOG10	7	45	1.5	2.1	21.5	32.5
MQS-BOG11	7	50	1.2	2.3	23.7	36.9
MQS-BOG12	7	53	2	2.5	23.3	38.0
MQS-BOG13	9	30	0.5	0.7	23.2	25.2
MQS-BOG14	9	35	0.7	1.1	20.5	25.5
MQS-BOG15	9	40	0.8	1.4	0.7	30.4
MQS-BOG16	9	45	1.5	2.2	1.0	33.7
MQS-BOG17	9	50	1.3	2.3	24.5	37.5
MQS-BOG18	9	53	1.2	2.5	1.0	45.8
PROMEDIO			0.9	1.6	12.6	31.9

La Gráfica 18, muestra los intervalos de confianza (95%) de las 30 mejores soluciones obtenidas por los métodos de solución para la instancia 18, considerando una política de Stock de seguridad del 0%, como se puede ver, los resultados obtenidos por la Sim-heurística son mejores que los obtenidos por el método Multi-arranque. Por otro lado, la Tabla 6 muestra que la media del costo estocástico es de \$ 79,550.46 (USD) y de \$ 79,938.91 (USD) para el método Sim-heurístico y Multi-arranque respectivamente. Adicionalmente, la prueba t de diferencia de medias que tiene como hipótesis nula que las medias son iguales, da una significancia menor a 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se establece, con una confiabilidad del 95%, que las medias son diferentes.



Gráfica 18, Intervalos de Confianza 95% (Instancia 18 %SS=0%)

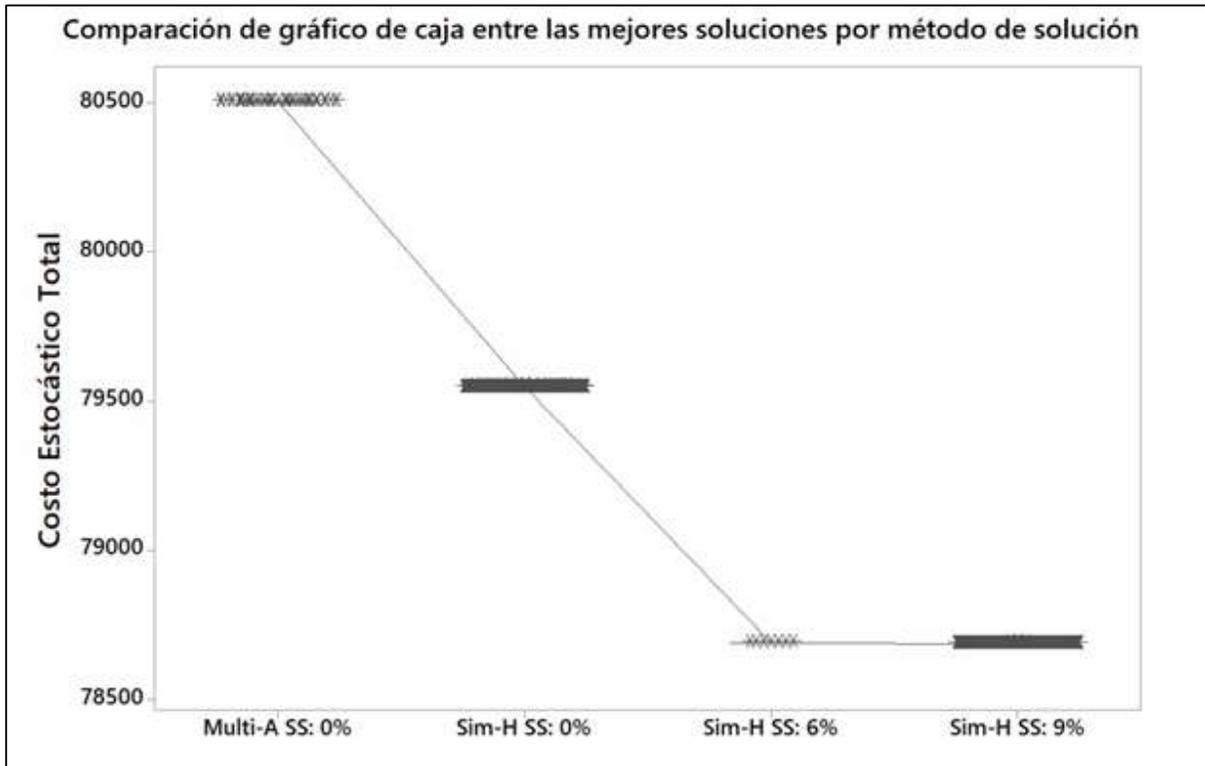
Tabla 6, Prueba t de diferencia de medias

Group Statistics					
	Met_Sol	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
Cto_Est_Total	Sim-H	30	79550.4627	.64243	.11729
	Multi-A	30	80678.0755	122.63682	22.39032

Independent Samples Test										
		Levene's Test for Equality of Variances				t-test for Equality of Means				
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Cto_Est_Total	Equal variances assumed	65.723	.000	-50.361	58	.000	-1127.61287	22.39063	-1172.43258	-1082.79317
	Equal variances not assumed			-50.361	29.002	.000	-1127.61287	22.39063	-1173.40674	-1081.81901

En la Gráfica 19, se puede observar los costos estocásticos totales para la mejor solución obtenida por el método Multi-arranque en el escenario determinístico, sin protección de Stock de seguridad, contra las mejores soluciones obtenidas por la Sim-heurística, considerando políticas de Stock de seguridad de 0%, 6% y 9% para una instancia representativa (Instancia 18). Si comparamos los costos estocásticos esperados de las soluciones sin protección, podemos ver que el método Sim-

heurístico presenta un mejor costo esperado y con menor variabilidad, evidenciando así el factor de mejora que tiene el método ILS, dentro de la estructura del algoritmo Sim-heurístico, frente a la exploración aleatoria de soluciones que caracteriza el método Multi-Arranque. Por otro lado, se puede observar que aquellas soluciones con protección de seguridad superan a las dos primeras en términos de costos estocásticos esperados.



Gráfica 19. Gráfico de caja para las mejores soluciones por método de solución

Los resultados para el caso estocástico, guiados por el método Sim-heurístico, se presentan en la Tabla 7 y la Tabla 8, las cuales muestran el comportamiento de los costos estocásticos esperados y las confiabilidades para cada instancia, cuando se utilizan seis políticas de stock de seguridad diferentes (0%, 3%, 6%, 9%, 12% y 15%). Para cada política de stock de seguridad, se reporta la mejor solución estocástica y la confiabilidad esperada de esta. El algoritmo proporciona resultados consistentes, independientemente del tamaño de la instancia, ya que el GAP% promedio entre las mejores soluciones reportadas y el top 10 de soluciones para cada instancia no supera el 0.03%.

Tabla 7. Resultados de las políticas de Stock de Seguridad de 0% a 6% - Caso estocástico.

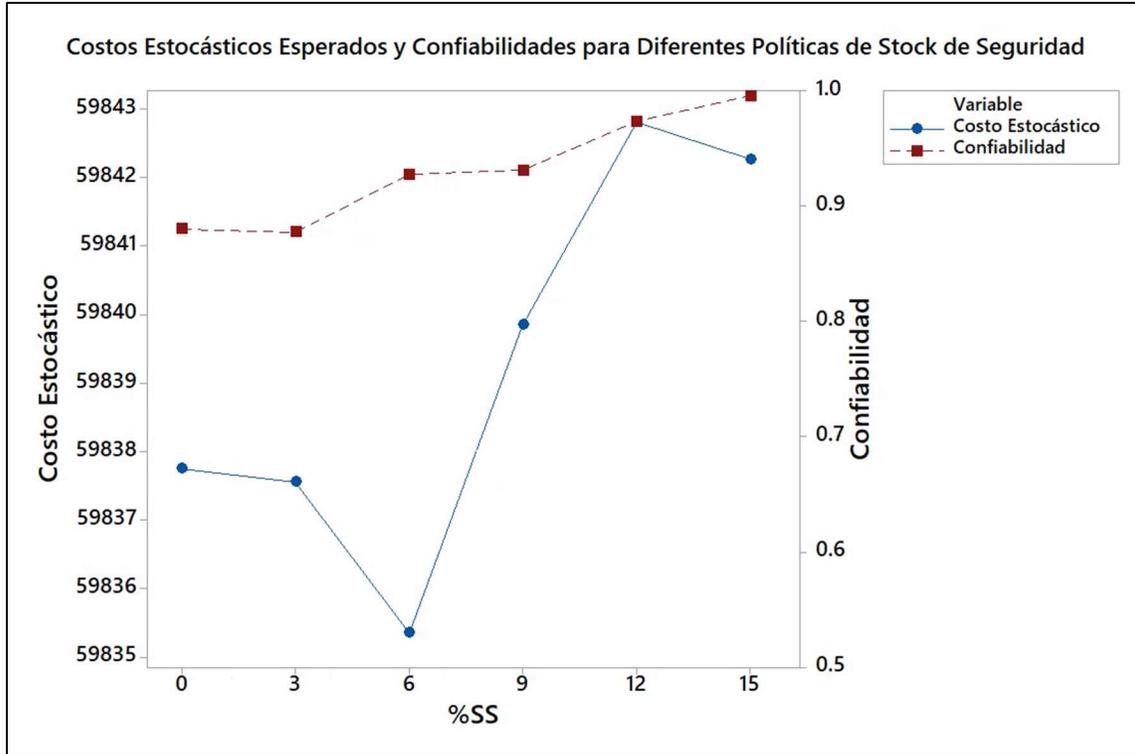
Política de Stock de Seguridad	0%		3%		6%	
Instancia	Mejor Solución	Confiabilidad Esperada	Mejor Solución	Confiabilidad Esperada	Mejor Solución	Confiabilidad Esperada
MQS-BOG1	44,872.79	96.52%	44,875.11	98.03%	44,875.17	98.19%
MQS-BOG2	53,820.53	97.38%	53,817.14	99.06%	53,820.03	94.50%
MQS-BOG3	59,837.75	88.04%	59,837.56	87.78%	59,835.35	92.76%
MQS-BOG4	79,593.46	70.14%	79,592.76	70.56%	79,593.01	81.78%
MQS-BOG5	79,983.40	90.64%	79,983.02	68.65%	79,982.34	57.85%
MQS-BOG6	91,245.51	79.12%	91,245.49	79.67%	91,245.48	88.75%
MQS-BOG7	53,817.45	94.55%	53,817.79	97.36%	53,817.62	98.80%
MQS-BOG8	57,565.79	94.31%	57,565.66	94.18%	57,566.95	97.01%
MQS-BOG9	58,955.90	93.00%	58,956.34	98.56%	58,955.30	92.98%
MQS-BOG10	69,722.11	71.96%	69,725.74	69.63%	69,727.60	78.75%
MQS-BOG11	76,236.10	35.36%	76,236.16	46.27%	76,235.71	59.07%
MQS-BOG12	87,009.98	87.24%	87,010.16	88.16%	87,010.42	93.10%
MQS-BOG13	49,599.43	80.94%	49,599.03	89.06%	49,600.36	81.00%
MQS-BOG14	53,822.45	95.80%	53,822.77	82.06%	53,823.42	80.84%
MQS-BOG15	69,288.51	80.45%	69,288.27	80.76%	69,289.07	87.86%
MQS-BOG16	69,290.82	80.82%	69,289.65	80.09%	69,293.84	87.84%
MQS-BOG17	76,237.71	88.55%	76,235.55	81.38%	76,237.68	81.16%
MQS-BOG18	79,548.20	72.47%	79,548.64	76.48%	78,688.90	69.78%

Tabla 8. Resultados de las políticas de Stock de Seguridad de 9% a 15% - Caso estocástico.

Política de Stock de Seguridad	9%		12%		15%	
Instancia	Mejor Solución	Confiabilidad Esperada	Mejor Solución	Confiabilidad Esperada	Mejor Solución	Confiabilidad Esperada
MQS-BOG1	44,874.96	96.60%	44,875.12	98.64%	44,872.86	99.44%
MQS-BOG2	53,820.79	94.26%	53,819.79	97.40%	53,821.40	94.60%
MQS-BOG3	59,839.85	93.12%	59,844.47	97.35%	59,842.27	99.60%
MQS-BOG4	79,595.61	80.90%	79,596.84	89.26%	79,596.19	89.24%
MQS-BOG5	79,982.87	93.73%	79,983.61	71.77%	79,983.43	81.97%
MQS-BOG6	91,246.63	70.44%	91,247.72	87.21%	91,250.07	92.61%
MQS-BOG7	53,817.73	98.90%	53,818.35	98.84%	53,818.76	99.02%
MQS-BOG8	57,564.59	97.10%	57,566.10	97.20%	57,566.79	98.80%
MQS-BOG9	58,957.83	93.97%	58,955.86	98.66%	58,958.16	99.88%
MQS-BOG10	69,727.41	87.21%	69,730.17	84.29%	69,728.18	83.71%
MQS-BOG11	76,235.07	57.81%	76,239.91	71.14%	76,237.24	81.47%
MQS-BOG12	87,011.12	92.69%	87,010.46	96.52%	87,008.45	97.09%
MQS-BOG13	49,599.69	88.60%	49,600.33	90.34%	49,600.78	93.98%
MQS-BOG14	53,822.53	89.22%	53,823.61	81.14%	53,824.00	97.46%
MQS-BOG15	69,287.80	88.47%	69,286.15	93.74%	69,286.10	94.17%
MQS-BOG16	69,293.35	81.46%	69,290.80	87.98%	69,293.23	94.56%
MQS-BOG17	76,235.91	81.56%	76,237.32	81.68%	76,238.08	80.87%
MQS-BOG18	78,687.33	70.08%	78,687.14	93.02%	79,549.12	88.83%

En la Gráfica 20 se presenta un ejemplo gráfico basado en una instancia representativa para analizar el comportamiento de los costos estocásticos esperados y las confiabilidades, utilizando las diferentes políticas de stock de seguridad. Como era de esperar, en el caso de no considerar ningún tipo de protección o una protección baja (es decir, 0% y 3% de stock de seguridad), las confiabilidades asociadas son las más bajas entre todas las políticas. Una vez que se aumenta la política de protección, el valor correspondiente de confiabilidad tiende a aumentar también. En cuanto a los costos estocásticos, podemos ver una tendencia decreciente hasta que los costos llegan a su punto más bajo en la política de stock de seguridad del 6% para este ejemplo. Los costos estocásticos esperados, tienden a ser mayores al considerar políticas más conservadoras ($SS\% > 6\%$), esto se puede explicar debido al aumento de los costos asociados a un mayor número de rutas planificadas, que requieren una mayor flota de vehículos y que no compensan la disminución de

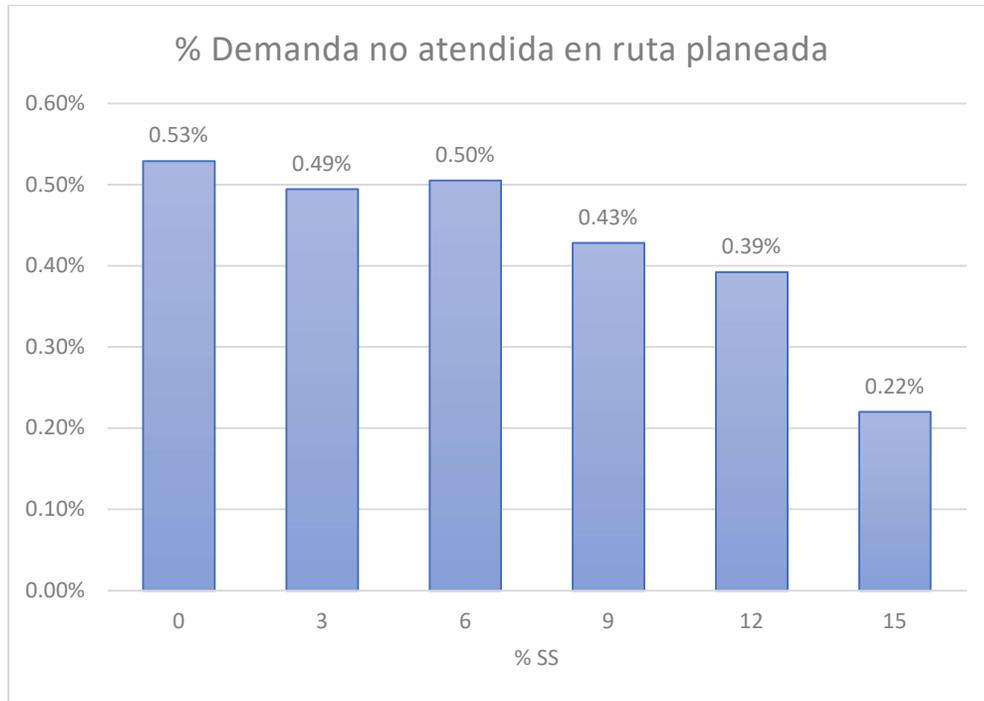
los costos correctivos (aquellos asociados a el viaje de ida y vuelta entre una UCI y el depósito para reabastecer la carga del vehículo, atende la UCI y retomar la ruta).



Gráfica 20. Valores promedio de los costos esperados y confiabilidades de las mejores soluciones estocásticas para diferentes políticas de stock de seguridad

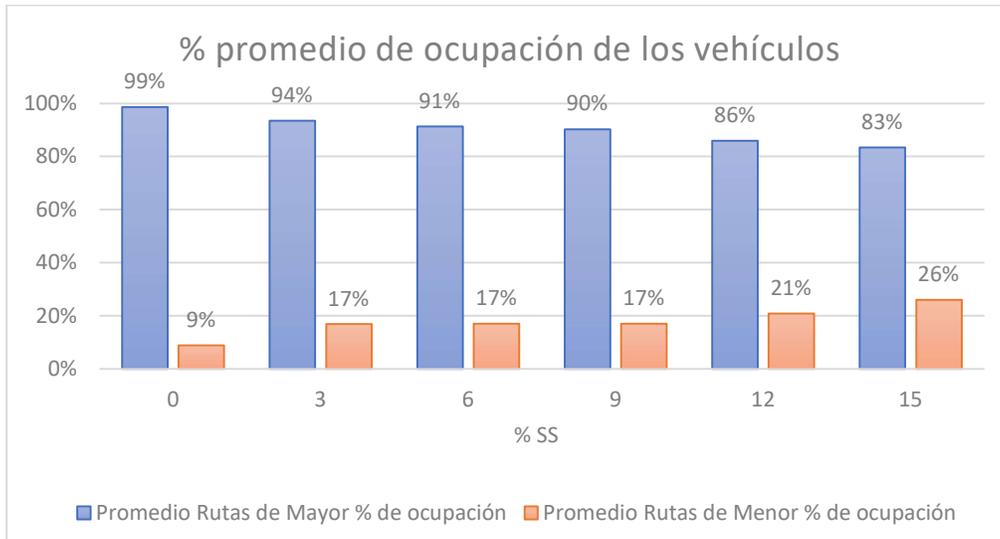
Análisis de indicadores descriptivos:

La Gráfica 21 muestra el porcentaje promedio de demanda no atendida en la ruta planeada para el top 10 de mejores soluciones obtenidas por cada política de Stock de seguridad. Los resultados muestran una tendencia decreciente, a medida que se incrementa el porcentaje de protección en los vehículos, en donde los mejores resultados se obtienen con una política de 15% de Stock de seguridad, siendo de 0.22%. Cabe resaltar que la demanda que no es atendida en la ruta planeada es muy baja para cada uno de los escenarios, siendo menor al 1% en cada caso.



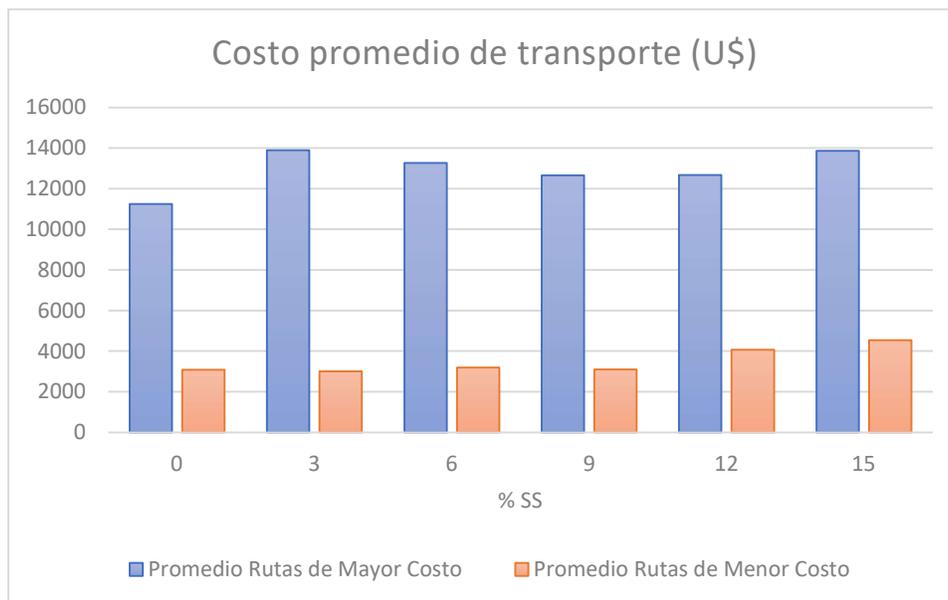
Gráfica 21. Porcentajes de demanda no atendida en la ruta planeada para el top 10 de mejores soluciones

En la Gráfica 22 se evidencia el porcentaje promedio de ocupación de la ruta con mayor carga (Barras azules) y la ruta de menor carga (Barras naranjas) del top 10 de soluciones obtenidas para cada política de % de Stock de seguridad. Se puede evidenciar una brecha significativa en los porcentajes de ocupación, en donde en promedio se obtiene un 72.7% de diferencia entre la ruta de mayor ocupación, contra la ruta de menor ocupación, sin embargo, cabe resaltar que a medida que se incrementa la política de protección, esta brecha se hace menor, pasando de un 90% cuando no se aplica ninguna política de stock de seguridad y de 57% cuando la política de protección es del 15%.



Gráfica 22. Porcentaje promedio de ocupación de las rutas del top 10 de mejores soluciones

La Gráfica 23 muestra el costo promedio de transporte de la ruta de mayor carga (Barras azules) y la ruta de menor carga (Barras naranjas) del top 10 de soluciones obtenidas para cada política de % de Stock de seguridad. En estos resultados se puede evidenciar una brecha significativa en los costos de transporte, los cuales tienen una diferencia promedio de \$ 9,426 (USD) entre la ruta de mayor carga, contra la de menor carga.



Gráfica 23. Costo promedio de transporte (USD) del top 10 de mejores soluciones.

Los resultados muestran la solidez de los métodos Multi-arranque y Sim-heurístico para suministrar los EPP a las UCIs, durante el brote de COVID-19, el cual se enfrentan a demandas inciertas y variables del problema. Además, estos métodos se pueden adaptar a otras ciudades o zonas que enfrentan el mismo problema o incluso en otro tipo de aplicaciones que manejan el LRP-SD. Para ello, es necesario analizar los casos históricos de personas infectadas, para definir la distribución de probabilidad de la demanda, así como el número de UCIs a atender, el número de centros de distribución disponibles, el tamaño de la flota, la capacidad de los vehículos, las políticas de stock de seguridad, las distancias a los arcos que conectan los nodos del problema (los centros de distribución y las UCIs), el costo de apertura de las instalaciones, el costo de transporte al visitar todas las UCIs, el costo de los vehículos y el costo correctivo de una solución, cuando la demanda excede la capacidad del vehículo, debido a la naturaleza incierta de la demanda de EPP de las UCIs.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se ha estudiado la necesidad inminente de suministrar equipos de protección personal a las Unidades de Cuidados Intensivos durante el brote de COVID-19 en Bogotá, Colombia, definido como un Problema de Localización-Ruteo con Demandas Estocásticas. Dado que el número de personas infectadas puede variar de un día a otro y, en consecuencia, el número de pacientes en las UCIs, hemos recopilado datos reales de las UCIs de la ciudad, para estimar la distribución estocástica asociada y, en consecuencia, estimar las necesidades de EPP en cada UCI. Para hacer frente a este problema, se propuso dos enfoques de optimización, un algoritmo multi-arranque y un modelo sim-heurístico que consideran demandas inciertas, costos de distribución y confiabilidad en las soluciones. El algoritmo multi-arranque se enfoca en la exploración aleatoria de soluciones, mientras que el modelo sim-heurístico combina la simulación de Monte Carlo con la búsqueda local iterativa. Los métodos propuestos se codificaron en VBA y se probaron, utilizando dieciocho instancias diferentes generadas con datos recuperados de Google Maps para caracterizar la distribución geográfica de los almacenes y las UCI en la ciudad más grande de Colombia.

En primer lugar, los resultados de ambos enfoques fueron comparados con los obtenidos por GAMS en la versión determinística del problema, mostrando resultados prometedores. En el escenario estocástico, los resultados muestran el comportamiento de los costos estocásticos esperados y las confiabilidades cuando se utilizan diferentes políticas de stock de seguridad para cada escenario probado. Además, los resultados también muestran que esta versión del LRP es un problema difícil y su complejidad aumenta según el nivel de incertidumbre. Como era de esperar, cuando no se considera alguna política de protección, hay muchas fallas de ruta debido a la incertidumbre en la demanda, en donde, se obtienen mayores costos y la confiabilidad no es la mejor. Por otro lado, cuando el valor de la política de existencias de seguridad alcanza el valor ideal, los costos tienden a aumentar, mientras que el incremento en la confiabilidad es menos notorio. Estos resultados, en una aplicación realista, se pueden utilizar para asegurar la sostenibilidad del sistema de salud de la ciudad, y garantizar el suministro de EPP para proteger a los médicos, enfermeras y terapeutas de primera línea que atienden la pandemia actual.

En cuanto a la investigaciones futuras y recomendaciones, existe la oportunidad de evaluar criterios sostenibles para abordar la toma de decisiones de emergencia, así como para incluir otras representaciones de parámetros con incertidumbre y diseñar otros enfoques para manejarlas. Dado que nuestro modelo consideró la distribución de Weibull para representar el comportamiento de la demanda, se podrían adaptar otras distribuciones para evaluar la solidez de los métodos propuestos. Teniendo en cuenta que la incertidumbre puede afectar la toma de decisiones en una crisis humanitaria, se podrían implementar otros métodos (ej.: Optimización robusta) y fuentes de incertidumbre (ej.: Tiempos de viaje, ventanas de tiempo, entre otros). Además, también se puede considerar la adaptación de los algoritmos a problemas de gran escala. Por otro lado, el análisis de los indicadores descriptivos establece otros parámetros de interés que pueden incluirse en el diseño y la estructura de los algoritmos, por lo que este trabajo puede motivar investigaciones que involucren políticas de balanceo de carga y de distancias recorridas por ruta. Este tipo de políticas están justificadas en un escenario realista debido a la utilización de los recursos disponibles como lo son la flota de vehículos.

REFERENCIAS

- Acar, M., & Kaya, O. (2019). A healthcare network design model with mobile hospitals for disaster preparedness: A case study for Istanbul earthquake. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 130, 273–292. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.007>
- Adarang, H., Bozorgi-Amiri, A., Khalili-Damghani, K., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2020). A robust bi-objective location-routing model for providing emergency medical services. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 10(3), 285–319. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-11-2018-0072>
- Akbarpour, M., Ali Torabi, S., & Ghavamifar, A. (2020). Designing an integrated pharmaceutical relief chain network under demand uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101867>
- Albareda-Sambola, M., Fernández, E., & Laporte, G. (2007). Heuristic and lower bound for a stochastic location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 940–955. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.04.051>
- Ceballos-Parra, P. J., Sarache, W. A., & Gómez, D. M. (2018). A bibliometric analysis of trends in humanitarian logistic [Un Análisis Bibliométrico de las Tendencias en Logística Humanitaria]. *Informacion Tecnologica*, 29(1), 91–104. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000100091>
- Chevrolet. (2020). NHR Reward Euro IV. Retrieved November 17, 2020, from <https://www.camionescolombia.com.co/comprar-vehiculo-chevrolet-colombia-nhr-reward-euro-iv.html?m=&m=adwords&ad=457630024942&kw=%2Bnhr%2Breward&mt=b&nw=g&dev=c&pm=&tg=&ap=&gclid=Cj0KCQjw-LOEBhDCARIsABrC0TIZIXYNXQ44bWxJd5wbFL1S7SxpCuPEGIXWF5F1jcLME7kBSWIG>
- Das, S., & Rajalingham, S. (2020). Personal Protective Equipment (PPE) and Its Use in COVID-19: Important Facts. *Indian Journal of Surgery*, 82(3), 282–283. <https://doi.org/10.1007/s12262-020-02411-8>
- Eck, N. J. van, & Waltman, L. (2014). Visualizing Bibliometric Networks. *Measuring Scholarly Impact*, 285–320. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
- Erbeyoğlu, G., & Bilge, Ü. (2020). A robust disaster preparedness model for effective and fair disaster response. *European Journal of Operational Research*, 280(2), 479–494. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.029>

- Erdoğan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers and Operations Research*, 84, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>
- Espejo-Díaz, J. A., & Guerrero, W. J. (2021). A multiagent approach to solving the dynamic postdisaster relief distribution problem. *Operations Management Research*, 14(1–2), 177–193. <https://doi.org/10.1007/s12063-021-00192-1>
- Fazayeli, S., Eydi, A., & Kamalabadi, I. N. (2018). Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 119, 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.041>
- Fosso Wamba, S. (2020). Humanitarian supply chain: a bibliometric analysis and future research directions. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03594-9>
- Fu, S., Ji, X., Lu, C., & Fan, S. (2021). A visual analysis of frontiers and dynamic tendencies for humanitarian logistics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/5555058>
- Ghaffari-Nasab, N., Ahari, S. G., & Ghazanfari, M. (2013). A hybrid simulated annealing based heuristic for solving the location-routing problem with fuzzy demands. *Scientia Iranica*, 20(3), 919–930. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2013.02.006>
- Ghorashi, S. B., Hamed, M., & Sadeghian, R. (2020). Modeling and optimization of a reliable blood supply chain network in crisis considering blood compatibility using MOGWO. *Neural Computing and Applications*, 32(16), 12173–12200. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04343-1>
- Illahi, U., & Mir, M. S. (2021). Maintaining efficient logistics and supply chain management operations during and after coronavirus (COVID-19) pandemic: learning from the past experiences. *Environment, Development and Sustainability*, 23(8), 11157–11178. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01115-z>
- Instituto nacional de Salud. (2021). Coronavirus Colombia. Retrieved August 18, 2021, from Ins website: <https://www.ins.gov.co/Noticias/Paginas/Coronavirus.aspx>
- Kara, B. Y., & Savaşer, S. (2017). Humanitarian Logistics. In *The Operations Research Revolution* (pp. 272–309). <https://doi.org/10.1287/educ.2017.0174>
- Kovacs, G., & Moshtari, M. (2019). A roadmap for higher research quality in humanitarian operations: A methodological perspective. *European Journal of Operational Research*, 276(2), 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.052>

- Loske, D. (2020). The impact of COVID-19 on transport volume and freight capacity dynamics: An empirical analysis in German food retail logistics. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100165>
- Lourenço, H. R., Martin, O. C., & Stützle, T. (2010). *Iterated Local Search: Framework and Applications Handbook of Metaheuristics* (Vol. 146). Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-1665-5_12
- Martínez-Reyes, A., Quintero-Araújo, C. L., & Solano-Charris, E. L. (2021a). A Decision Support Tool for the Location Routing Problem During the COVID-19 Outbreak in Colombia. *Communications in Computer and Information Science*, 1408 CCIS, 33–46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76310-7_3
- Martínez-Reyes, A., Quintero-Araújo, C. L., & Solano-Charris, E. L. (2021b). Supplying personal protective equipment to intensive care units during the covid-19 outbreak in colombia. A simheuristic approach based on the location-routing problem. *Sustainability (Switzerland)*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/su13147822>
- Maspero, E. L., & Ittmann, H. W. (2008). The Rise of Humanitarian Logistics. *27th Southern African Transport Conference*, pp. 175–184. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10204/3054>
- Merigó, J. M., Muller, C., Modak, N. M., & Laengle, S. (2019). Research in Production and Operations Management: A University-Based Bibliometric Analysis. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s40171-018-0201-0>
- Nadizadeh, A., & Hosseini Nasab, H. (2014). Solving the dynamic capacitated location-routing problem with fuzzy demands by hybrid heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*, 238(2), 458–470. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.012>
- Nadizadeh, A., & Kafash, B. (2019). Fuzzy capacitated location-routing problem with simultaneous pickup and delivery demands. *Transportation Letters*, 11(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1270798>
- Nagy, G., & Salhi, S. (2006). Location-routing: Issues, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 177(2), 649–672. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.04.004>
- Nayeri, S., Asadi-Gangraj, E., & Emami, S. (2019). Metaheuristic algorithms to allocate and schedule of the rescue units in the natural disaster with fatigue effect. *Neural Computing and Applications*, 31(11), 7517–7537. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3599-6>
- Nedjati, A., Izbirak, G., & Arkat, J. (2017). Bi-objective covering tour location routing problem with replenishment at intermediate depots: Formulation and meta-heuristics. *Computers and Industrial Engineering*, 110, 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.004>

- Pacheco, J., & Laguna, M. (2020). Vehicle routing for the urgent delivery of face shields during the COVID-19 pandemic. *Journal of Heuristics*. <https://doi.org/10.1007/s10732-020-09456-8>
- Prins, C., Prodhon, C., & Calvo, R. W. (2006). Solving the capacitated location-routing problem by a GRASP complemented by a learning process and a path relinking. *4OR*, 4(3), 47–64. <https://doi.org/10.1007/s10288-006-0001-9>
- Prodhon, C., & Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.005>
- Quintero-Araujo, C L, Guimarans, D., & Juan, A. A. (2019). A simheuristic algorithm for the capacitated location routing problem with stochastic demands. *Journal of Simulation*. <https://doi.org/10.1080/17477778.2019.1680262>
- Quintero-Araujo, Carlos L., Caballero-Villalobos, J. P., Juan, A. A., & Montoya-Torres, J. R. (2017). A biased-randomized metaheuristic for the capacitated location routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 24(5), 1079–1098. <https://doi.org/10.1111/ITOR.12322>
- Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 945–961. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.024>
- Salhi, S., & Rand, G. K. (1989). The effect of ignoring routes when locating depots. *European Journal of Operational Research*, 39(2), 150–156. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90188-4)
- Sanci, E., & Daskin, M. S. (2019). Integrating location and network restoration decisions in relief networks under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 279(2), 335–350. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.012>
- Şatir Akpunar, Ö., & Akpinar. (2021). A hybrid adaptive large neighbourhood search algorithm for the capacitated location routing problem. *Expert Systems with Applications*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114304>
- Secretaría Distrital de Salud. (2021). Casos confirmados de COVID-19 | SALUDATA. Retrieved July 4, 2021, from <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/datos-de-salud/enfermedades-trasmisibles/covid19/>

- Sharma, B., Ramkumar, M., Subramanian, N., & Malhotra, B. (2019). Dynamic temporary blood facility location-allocation during and post-disaster periods. *Annals of Operations Research*, 283(1–2), 705–736. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2680-3>
- Shen, C. Y. (2020). Logistic growth modelling of COVID-19 proliferation in China and its international implications. *International Journal of Infectious Diseases*, 96, 582–589. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.04.085>
- Shiripour, S., & Mahdavi-Amiri, N. (2019). Optimal distribution of the injured in a multi-type transportation network with damage-dependent travel times: Two metaheuristic approaches. *Socio-Economic Planning Sciences*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2018.10.011>
- Stienen, V. F., Wagenaar, J. C., den Hertog, D., & Fleuren, H. A. (2021). Optimal depot locations for humanitarian logistics service providers using robust optimization. *Omega (United Kingdom)*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2021.102494>
- Thomas, A. S. (2008). *Humanitarian Logistics : Enabling Disaster Response* , Fritz Institute. 17.
- Tirkolaei, E. B., Abbasian, P., & Weber, G.-W. (2021). Sustainable fuzzy multi-trip location-routing problem for medical waste management during the COVID-19 outbreak. *Science of the Total Environment*, 756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143607>
- Tomasini, R., & Wassenhove, L. van. (2009). Humanitarian Logistics. *Humanitarian Logistics*. <https://doi.org/10.1057/9780230233485>
- Tordecilla, R. D., Copado-Méndez, P. J., Panadero, J., Quintero-Araujo, C. L., Montoya-Torres, J. R., & Juan, A. A. (2021). Combining heuristics with simulation and fuzzy logic to solve a flexible-size location routing problem under uncertainty. *Algorithms*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/a14020045>
- Torrealba-Rodríguez, O., Conde-Gutiérrez, R. A., & Hernández-Javier, A. L. (2020). Modeling and prediction of COVID-19 in Mexico applying mathematical and computational models. *Chaos, Solitons and Fractals*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109946>
- Turkeš, R., Sörensen, K., & Cuervo, D. P. (2021). A matheuristic for the stochastic facility location problem. *Journal of Heuristics*, 27(4), 649–694. <https://doi.org/10.1007/s10732-021-09468-y>
- Ülkü, M. A., Bell, K. M., & Wilson, S. G. (2015). Modeling the impact of donor behavior on humanitarian aid operations. *Annals of Operations Research*, 230(1), 153–168. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1623-5>

- van Wassenhove, L. N. (2006). Blackett memorial lecture humanitarian aid logistics: Supply chain management in high gear. *Journal of the Operational Research Society*, 57(5), 475–489. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602125>
- Wang, J., Cai, J., Yue, X., & Suresh, N. C. (2021). Pre-positioning and real-time disaster response operations: Optimization with mobile phone location data. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102344>
- Wang, P., Zheng, X., Li, J., & Zhu, B. (2020). Prediction of epidemic trends in COVID-19 with logistic model and machine learning technics. *Chaos, Solitons and Fractals*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110058>
- Wang, Y., Dong, Z. S., & Hu, S. (2021). A stochastic prepositioning model for distribution of disaster supplies considering lateral transshipment. *Socio-Economic Planning Sciences*, 74. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100930>
- World Health Organization. (2021). *World health statistics 2021*. Retrieved from <https://digitalcommons.fiu.edu/srhreports/health/health/29/>
- Yu, H., Sun, X., Solvang, W. D., & Zhao, X. (2020). Reverse Logistics Network Design for Effective Management of Medical Waste in Epidemic Outbreaks: Insights from the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1770. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051770>
- Yu, L., Zhang, C., Jiang, J., Yang, H., & Shang, H. (2021). Reinforcement learning approach for resource allocation in humanitarian logistics. *Expert Systems with Applications*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114663>
- Zare Mehrjerdi, Y., & Nadizadeh, A. (2013). Using greedy clustering method to solve capacitated location-routing problem with fuzzy demands. *European Journal of Operational Research*, 229(1), 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.013>
- Zhang, H., Liu, F., Ma, L., & Zhang, Z. (2020). A Hybrid Heuristic Based on a Particle Swarm Algorithm to Solve the Capacitated Location-Routing Problem with Fuzzy Demands. *IEEE Access*, 8, 153671–153691. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3018490>
- Zhang, M.-X., Yan, H.-F., Wu, J.-Y., & Zheng, Y.-J. (2020). Quarantine vehicle scheduling for transferring high-risk individuals in epidemic areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072275>
- Zhang, S., Chen, M., & Zhang, W. (2019). A novel location-routing problem in electric vehicle transportation with stochastic demands. *Journal of Cleaner Production*, 221, 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.167>

Zhu, L., Gong, Y., Xu, Y., & Gu, J. (2019). Emergency relief routing models for injured victims considering equity and priority. *Annals of Operations Research*, 283(1–2), 1573–1606. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3089-3>

ANEXOS

A. PRIMERA PÁGINA DE PUBLICACIONES INDEXADAS



Article

Supplying Personal Protective Equipment to Intensive Care Units during the COVID-19 Outbreak in Colombia. A Simheuristic Approach Based on the Location-Routing Problem

Andrés Martínez-Reyes, Carlos L. Quintero-Araújo * and Elyn L. Solano-Charris

Operations and Supply Chain Management Research Group, Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de La Sabana Km 7 Autopista Norte de Bogotá, D.C., Chia 250001, Colombia; andres.martinez9@unisabana.edu.co (A.M.-R.); elynsc@unisabana.edu.co (E.L.S.-C.)

* Correspondence: carlosqa@unisabana.edu.co

Abstract: The coronavirus disease 2019, known as COVID-19, has generated an imminent necessity for personal protective equipment (PPE) that became essential for all populations and much more for health centers, clinics, hospitals, and intensive care units (ICUs). Considering this fact, one of the main issues for cities' governments is the distribution of PPE to ICUs to ensure the protection of medical personnel and, therefore, the sustainability of the health system. Aware of this challenge, in this paper, we propose a simheuristic approach for supplying personal protective equipment to intensive care units which is based on the location-routing problem (LRP). The objective is to provide decision makers with a decision support tool that considers uncertain demands, distribution cost, and reliability in the solutions. To validate our approach, a case study in Bogotá, Colombia was analyzed. Computational results show the efficiency of the usage of alternative safety stock policies to face demand uncertainty in terms of both expected stochastic costs and reliabilities.

Keywords: COVID-19; location-routing; uncertain demands; simheuristic



Citation: Martínez-Reyes, A.; Quintero-Araújo, C.L.; Solano-Charris, E.L. Supplying Personal Protective Equipment to Intensive Care Units during the COVID-19 Outbreak in Colombia. A Simheuristic Approach Based on the Location-Routing Problem. *Sustainability* **2021**, *13*, 7822. <https://doi.org/10.3390/su13147822>

Academic Editor: Ferry Jie

Received: 20 May 2021

Accepted: 6 July 2021

Published: 13 July 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

COVID-19 has generated many challenges for governments and all economic activities. For the health sector and logistics industries, the challenge is undeniable considering variations of demands (i.e., people infected), needs of supplies, hospital capacities, among others. Therefore, the efficiency of all logistics and supply chain management activities, especially during pandemics and risk events, has a crucial role to play [1].

Considering the growing rate of confirmed cases of COVID-19, in certain countries, the occupancy of intensive care units (ICUs) has augmented. In Colombia, according to the 21 June 2021 report, the city with the highest number of confirmed cases was Bogotá, representing 29% of confirmed cases of the country and 97.43% of the occupation of the ICUs [2]. In addition, Bogotá is Colombia's biggest city with a surface of 685 mi², and a population of around 11.2 million inhabitants [3]. The health system is composed of both public and private institutions from which 53 have ICUs allocated to serve COVID-19 patients. Currently, the number of habilitated ICU beds is 2261 while the number of COVID-19 confirmed cases is up to 1.29 million [2].

Due to the high exposure of health care workers at ICUs, personal protective equipment (PPE) such as masks, face shields, and gloves are essential for preventing the spread of COVID-19 [4]. Considering this fact, the Bogotá local government is concerned with the distribution of PPE to ICUs. Therefore, in this paper, we propose an approach for the location of potential facilities to distribute PPE to ICUs and the subsequent route planning. This problem could be represented by the location-routing problem (LRP) which is an NP-hard problem [5].

The decision-making of the LRP considers two types of problems, i.e., the facility location problem (strategic decision term) and the vehicle routing problem (tactical/operational



A Decision Support Tool for the Location Routing Problem During the COVID-19 Outbreak in Colombia

Andrés Martínez-Reyes, Carlos L. Quintero-Araújo^(✉),
and Elyn L. Solano-Charris

Operations and Supply Chain Management Research Group, International School
of Economic and Administrative Sciences, Universidad de La Sabana, Chía, Colombia
{andres.martinez9, carlosqa, elynsc}@unisabana.edu.co

Abstract. During the outbreak of coronavirus disease 2019 (COVID-19) in Bogotá, Colombia, some strategies for dealing with the increasing number of infected people and the level of occupation of intensive care units include the use of Personal Protective Equipment (PPE). PPE is a crucial component for patient care and a priority for protecting health-care workers. For attending this necessity, the location of distribution centers within the city and the corresponding routes to supply the intensive care units (ICU) with PPE have an important role. Formally, this problem is defined as the Location Routing Problem (LRP). The LRP is an NP-Hard problem that combines the Facility Location Problem (FLP) and the Vehicle Routing Problem with Multiple Depots (MDVRP). This work presents a decision support tool based on a simheuristic method that hybridize an Iterated Local Search (ILS) algorithm with Monte Carlo simulation to deal with the LRP with uncertain demands. Realistic data from Bogotá (Colombia) was retrieved using Google Maps to characterize the geographical distribution of both potential facilities and ICUs, while demands were generated using the uniform probability distribution. Our preliminary results suggest the competitiveness of the algorithm in both the deterministic and the stochastic versions of the LRP.

Keywords: COVID-19 · Healthcare logistics · Location-routing · Decision support tool · ILS · Monte Carlo simulation

1 Introduction

In December 2019, a new coronavirus disease emerged characterized as a viral infection with a high level of transmission in Wuhan, China. Coronavirus 19 (COVID-19) is caused by the virus known as Severe Acute Respiratory Syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) established by the Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses (ICTV) [1]. As the cumulative numbers of confirmed cases have considerably increased worldwide,

© Springer Nature Switzerland AG 2021
D. A. Rossit et al. (Eds.): ICPR-Americas 2020, CCIS 1408, pp. 33–46, 2021.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-76310-7_3

B. Enlace archivo con Instancias MQS#

<https://cutt.ly/obASjVa>

C. Ejemplo de Código en GAMS implementado para el LRP

```
option optcr=0.000000000000001;
option reslim=14400;

sets

    n nodos
    /C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10,C11,C12,C13,C14,C15,C16,C17,C18,C19,C20,C21,C22,C23,C24,C25,C26,C
    27,C28,C29,C30,C31,C32,C33,C34,C35,C36,C37,C38,C39,C40,C41,C42,C43,C44,C45,C46,C47,C48,C49,C50,C5
    1,C52,C53,W3,W4,W12,W17,W23,W24,W28,W31,W33/

    i(n) customer
    /C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9,C10,C11,C12,C13,C14,C15,C16,C17,C18,C19,C20,C21,C22,C23,C24,C25,C26,C
    27,C28,C29,C30,C31,C32,C33,C34,C35,C36,C37,C38,C39,C40,C41,C42,C43,C44,C45,C46,C47,C48,C49,C50,C5
    1,C52,C53/

    j(n) depot /W3,W4,W12,W17,W23,W24,W28,W31,W33/

    k vehicle /1*20/
    a(n,n) /#n.#n/

ALIAS
    (i, ip)
    (n, np) ;

Parameters
d(i) demanda de clientes j

/
C1      90
C2      99
C3     423
C4     252
C5      72
C6     180
C7      81
C8      18
C9      72
C10    198
C11     18
C12    108
```

C13	90
C14	63
C15	108
C16	18
C17	135
C18	315
C19	171
C20	162
C21	207
C22	378
C23	63
C24	72
C25	234
C26	171
C27	180
C28	180
C29	261
C30	540
C31	9
C32	414
C33	126
C34	189
C35	54
C36	90
C37	81
C38	252
C39	288
C40	423
C41	351
C42	54
C43	90
C44	738
C45	9
C46	9
C47	738
C48	45
C49	360
C50	54
C51	180
C52	153
C53	459

/

FO(j) costo de apertura de cada CD

```

/
W3      3855600000
W4      4926600000
W12     8465184000
W17     7497000000
W23     5140800000
W24     5130090000
W28     4930884000
W31     4712400000
W33     4508910000

```

```

/
capacidadcd(j) capacidad de cada CD

```

```

/
W3      2840
W4      1990
W12     4457
W17     3947
W23     2707
W24     2701
W28     2596
W31     2481
W33     2374

```

```

/
factorcostofijo /1/
conversiongalon/3.7854/
autonomia/0.076/
preciogalon/9500/
vehCap capacidad de cada vehiculo /800/

```

```
;
```

```
Table c1(n,np)
```

	W3	W4	W12	W17	W23	W24	W28	W31	W33	C1	C2	C3	
C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15		
C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C27		
C28	C29	C30	C31	C32	C33	C34	C35	C36	C37	C38	C39		
C40	C41	C42	C43	C44	C45	C46	C47	C48	C49	C50	C51		
C52	C53												
W3	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	24.784	11.074	8.749
	23.877	22.536	9.05	15.093	10.416	16.32	25.367	9.744	8.902	22.171	18.971	16.347	
	15.924	8.122	2.759	23.2	5.514	17.328	13.007	22.485	14.776	16.44	11.305	22.009	
	12.478	15.501	17.904	15.652	22.981	21.837	16.786	9.482	12.261	5.177	10.818	20.099	
	16.335	22.049	25.53	27.321	3.421	15.068	7.043	25.539	27.486	24.287	24.233	7.863	
	11.654	18.247											

W4	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	23.244	12.42	15.139
	22.334	20.714	9.159	14.732	12.046	14.776	19.572	12.039	11.016	16.115	17.431	14.804			
	15.564	10.731	14.898	21.329	13.193	13.852	6.317	20.109	14.416	16.079	11.782	15.974			
	10.487	15.14	16.427	15.292	16.946	19.925	12.995	11.913	10.439	11.662	12.458	18.556			
	12.545	20.47	23.179	24.97	20.628	2.714	8.821	23.999	23.343	18.284	13.429	16.195			
	11.499	16.71													
W12	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	14.227	4.69	7.004
	9.12	8.349	8.174	2.528	4.068	2.639	18.5	4.896	6.143	12.82	5.025	2.612			
	3.36	20.014	12.983	11.372	8.197	7.917	9.187	7.703	1.431	4.136	3.227	12.713			
	5.634	2.155	6.072	3.088	14.14	7.488	5.057	4.77	3.431	14.683	4.48	6.146			
	5.345	7.699	10.773	12.564	12.459	10.903	15.421	13.707	17.85	14.442	14.974	9.063			
	2.34	4.973													
W17	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	18.12	21.017	23.285
	18.094	16.474	15.816	16.423	20.031	16.017	12.75	20.309	18.447	10.427	16.932	16.044			
	16.972	19.601	24.654	16.11	19.85	9.849	11.124	16.702	16.57	18.665	19.527	10.264			
	15.31	17.295	15.864	16.131	11.019	16.054	14.15	20.183	17.954	21.453	20.432	18.067			
	12.831	16.266	19.747	21.538	28.899	15.28	17.95	17.531	17.642	12.541	3.048	24.465			
	18.285	16.208													
W23	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	12.326	14.973	17.24
	12.351	10.731	10.553	11.565	13.987	11.159	8.94	14.264	12.199	4.683	9.763	11.186			
	8.772	21.371	19.409	10.366	14.588	5.403	8.891	10.959	10.466	9.981	13.268	4.521			
	9.592	10.891	8.557	8.89	5.493	9.629	8.421	12.522	11.91	16.189	14.388	7.929			
	7.971	10.499	13.179	15.795	20.915	12.211	17.321	11.787	11.949	6.798	6.52	17.038			
	12.24	9.039													
W24	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	20.254	17.578	19.36
	18.557	17.409	12.083	12.984	16.107	12.578	9.817	16.869	13.791	7.527	13.492	12.605			
	13.337	15.315	20.916	13.342	16.222	5.91	6.617	18.791	13.131	15.241	14.863	7.531			
	11.175	13.856	12.425	12.691	8.086	16.003	10.711	14.105	14.515	17.812	15.539	14.434			
	10.896	16.69	20.21	22.001	22.974	11.186	13.402	14.763	14.887	9.641	3.586	21.026			
	14.845	12.769													
W28	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	21.01	17.849	20.116
	18.827	17.68	12.456	13.254	16.863	12.848	14.197	17.14	14.607	9.953	13.763	12.875			
	13.608	16.444	21.283	18.396	16.48	6.678	7.746	19.062	16.253	15.496	15.687	9.778			
	11.999	14.126	12.695	12.962	11.254	16.273	10.981	17.014	14.785	18.082	17.263	14.704			
	11.151	16.96	20.48	22.271	23.342	11.902	14.531	17.044	17.156	12.067	2.682	21.296			
	15.116	13.039													
W31	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	19.084	22.151	24.724
	19.269	18.302	17.472	17.862	21.47	17.456	15.859	21.747	19.691	11.602	16.682	17.483			
	15.691	21.073	26.326	17.285	21.506	10.983	12.353	17.878	17.385	16.899	20.577	11.44			
	16.51	18.429	16.998	15.809	12.412	16.548	15.284	21.317	19.393	22.69	21.566	14.848			
	13.965	17.582	20.922	22.714	27.833	16.51	19.139	18.706	18.818	13.717	4.223	23.957			
	19.419	15.958													
W33	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	9999.99	11.067	12.082	13.369
	11.062	9.754	9.8	8.526	11.38	8.12	9.524	11.373	10.043	5.267	9.044	8.147			
	7.484	20.618	18.672	9.093	13.834	2.828	8.155	9.686	8.673	8.692	11.123	5.105			
	7.429	9.398	7.977	7.602	6.077	8.37	5.073	10.365	9.773	15.454	11.792	6.641			

	4.623	9.405	12.715	14.506	18.983	11.458	16.35	12.371	12.483	7.382	5.816	14.549
	10.834	8.321										
C1	23.572	23.669	10.341	20.576	14.212	17.211	20.621	20.447	11.722	9999.99	17.416	19.689
	2.656	4.053	20.211	9.316	16.433	11.71	12.202	16.713	17.957	9.912	6.638	11.448
	8.211	31.538	24.795	2.087	20.01	12.586	19.684	4.56	9.125	9.046	12.858	11.113
	16.086	9.55	8.842	7.969	10.191	3.778	12.563	16.584	14.359	26.396	16.833	6.581
	12.733	3.251	3.521	3.553	27.393	23.931	27.548	3.818	5.273	11.161	16.826	20.863
	11.972	7.652										
C2	8.682	10.881	6.221	19.785	16.246	16.007	16.703	19.829	12.158	16.448	9999.99	3.755
	15.548	15.949	4.877	8.415	1.653	8.009	19.007	1.318	2.089	15.812	10.641	8.036
	9.233	16.438	8.933	15.12	4.619	11.226	7.226	15.898	7.807	10.062	4.423	15.649
	4.149	7.951	9.574	9.323	16.621	12.993	8.456	1.193	4.034	11.002	0.902	11.77
	8.006	13.681	18.971	18.992	9.369	9.39	11.422	17.135	19.095	17.927	17.635	4.935
	3.941	9.918										
C3	8.501	12.201	6.821	23.057	16.832	19.278	19.975	20.416	13.832	21.001	4.76	9999.99
	18.877	17.366	4.873	8.947	5.226	11.28	21.688	4.62	4.876	19.083	13.913	11.308
	9.892	15.402	6.105	18.391	3.217	13.021	8.649	17.358	7.779	10.582	5.333	18.921
	7.42	8.551	12.845	9.619	19.244	18.737	11.727	4.494	7.305	10.619	4.204	15.041
	11.277	18.948	19.691	22.332	6.541	12.662	12.006	20.481	22.426	19.546	18.222	2.107
	5.578	13.189										
C4	22.948	22.59	9.146	23.625	12.554	18.028	18.724	18.331	11.033	2.594	16.301	18.344
	9999.99	2.157	19.457	8.034	15.315	8.154	11.801	15.592	16.839	9.037	5.35	8.181
	6.314	30.708	23.712	2.278	18.892	13.637	17.792	2.562	10.91	7.149	11.841	9.445
	14.097	8.012	7.724	6.743	9.316	3.023	10.666	15.466	13.237	25.095	15.715	5.034
	10.836	2.565	1.653	3.597	23.8	21.115	25.992	5.859	7.314	9.659	16.137	19.748
	10.954	5.774										
C5	21.193	20.834	7.391	20.051	13.093	16.272	16.969	16.872	9.573	4.398	14.545	16.317
	1.825	9999.99	17.702	6.278	14.226	6.398	11.822	13.836	15.083	9.058	3.594	6.425
	4.559	28.532	21.957	3.335	17.136	11.882	16.037	0.405	8.882	5.394	10.086	9.466
	12.341	6.257	6.635	4.987	9.337	0.99	8.911	14.378	12.149	23.351	13.96	4.44
	9.081	1.201	3.478	5.422	21.772	19.359	24.247	7.944	8.193	9.68	14.686	19.868
	9.199	4.019										
C6	8.408	7.508	7.91	14.574	12.138	10.795	11.492	15.722	10.051	18.118	5.358	6.808
	17.218	16.073	9999.99	10.085	4.714	9.679	16.137	3.773	3.189	12.681	12.311	9.706
	10.903	13.118	9.169	16.786	4.35	9.78	3.956	17.61	9.477	11.732	5.523	12.518
	5.819	10.957	11.244	10.993	13.49	14.663	8.268	3.511	5.402	7.936	4.046	13.902
	7.818	15.389	19.946	20.662	10.677	6.017	9.068	19.785	19.897	14.795	13.528	6.8
	6.463	11.588										
C7	15.287	15.291	2.577	16.252	13.709	12.473	13.17	17.027	8.786	12.013	8.64	11.031
	9.83	9.001	11.405	9999.99	7.654	0.565	13.29	7.931	9.178	10.095	4.924	0.538
	1.671	23.047	16.051	9.399	11.231	8.083	9.11	10.223	1.606	2.055	4.753	9.932
	6.301	1.926	3.857	1.399	10.904	7.617	5.112	7.805	5.577	17.614	8.054	4.455
	5.282	8.282	12.556	13.275	16.521	13.801	19.001	11.493	13.438	12.21	14.833	12.087
	3.867	4.201										
C8	10.022	11.362	4.622	20.141	16.339	16.362	17.059	19.922	12.251	16.804	1.054	4.933
	15.903	16.304	5.363	6.102	9999.99	6.213	19.363	1.888	2.44	16.881	10.997	6.186

	6.934	17.008	10.012	15.472	5.188	11.44	8.156	16.296	5.968	7.45	2.689	16.719
	4.504	7.419	9.929	6.662	16.977	13.349	8.811	1.763	3.267	11.572	1.472	12.588
	8.361	14.074	18.628	19.347	10.423	9.872	11.992	17.565	19.45	18.282	17.728	5.989
	2.885	10.273										
C9	15.14	15.144	2.752	16.104	13.562	12.325	13.022	18.084	8.638	11.865	7.901	10.884
	11.719	8.854	10.667	0.474	6.915	9999.99	13.143	7.192	8.439	9.947	4.777	0.027
	2.245	22.309	15.312	9.252	10.492	7.935	8.767	10.199	2.182	2.65	4.928	9.785
	5.959	2.165	3.709	1.972	10.757	7.469	4.964	7.066	4.838	16.875	7.316	6.368
	5.134	8.134	12.532	13.127	15.782	13.062	18.619	11.345	13.227	12.062	14.685	11.349
	4.041	3.072										
C10	26.575	19.88	15.872	13.347	8.526	9.981	14.351	13.218	8.942	12.285	19.926	22.194
	12.823	13.151	16.743	13.765	18.94	14.374	9999.99	19.217	17.654	4.324	13.462	14.401
	12.472	27.561	27.338	10.953	20.777	10.198	15.081	13.426	14.166	13.68	17.528	5.296
	15.803	14.59	12.257	12.59	3.681	12.441	12.507	19.092	16.863	22.372	19.341	12.776
	12.677	12.432	13.688	15.049	27.808	18.4	23.268	9.706	9.127	2.097	12.713	23.374
	16.642	12.739										
C11	8.234	11.537	7.196	22.279	15.304	13.427	19.777	19.09	10.965	17.46	2.463	3.609
	17.992	16.623	4.347	9.089	2.629	8.684	19.682	9999.99	2.119	16.48	11.316	8.711
	9.907	15.992	8.996	15.418	4.176	10.264	7.901	16.572	8.481	10.737	4.453	16.318
	4.823	8.926	10.248	9.997	17.29	14.358	9.13	0.61	4.708	10.444	1.145	12.261
	8.68	13.811	18.698	18.858	9.223	10.065	10.982	18.33	19.784	17.233	16.889	4.79
	4.916	10.592										
C12	10.841	10.308	4.721	21.031	15.21	14.754	18.53	18.989	10.981	16.213	2.512	4.78
	16.745	15.376	3.981	6.202	1.525	7.436	18.428	2.343	9999.99	15.233	10.069	7.463
	7.033	15.257	9.957	14.547	6.781	10.653	6.654	12.746	5.393	9.489	2.334	15.07
	3.576	8.714	9.001	6.761	16.042	13.11	7.883	2.217	3.367	10.076	1.927	11.014
	7.433	13.322	17.7	17.611	10.393	8.817	10.846	17.162	18.617	17.354	16.795	5.96
	2.883	9.345										
C13	23.109	16.412	14.195	11.571	5.409	8.205	10.886	11.442	5.477	11.7	16.461	18.729
	12.403	10.826	13.278	10.3	15.475	13.889	4.909	15.752	14.924	9999.99	9.997	13.916
	9.007	24.111	22.132	10.368	17.312	8.133	11.616	11.101	10.7	10.215	16.48	1.831
	12.316	11.125	8.791	9.125	1.545	10.117	11.151	16.443	13.398	18.932	16.978	8.151
	10.701	10.107	13.642	14.437	24.342	14.935	19.454	9.396	9.51	2.767	9.248	19.909
	15.721	9.274										
C14	18.697	18.51	5.573	20.668	11.775	15.017	18.167	15.554	11.479	6.141	12.048	14.316
	4.095	2.729	14.814	4.547	8.93	5.014	13.295	11.34	12.586	10.181	9999.99	4.987
	2.972	26.456	19.46	5.433	14.64	10.144	14.302	2.678	4.356	3.871	8.09	10.018
	10.603	4.781	3.472	3.201	10.909	3.039	7.173	11.214	8.985	18.772	9.343	1.54
	7.343	3.25	5.529	7.539	17.804	17.621	19.307	9.931	10.063	12.215	13.36	15.496
	7.203	1.752										
C15	14.542	15.117	2.683	17.896	11.75	12.259	15.394	18.056	7.412	9.346	7.874	10.141
	8.61	10.057	10.639	0.501	6.888	0.027	13.115	7.165	8.412	9.911	4.75	9999.99
	2.272	22.281	15.285	8.636	10.465	7.908	8.74	7.193	2.209	2.677	4.98	9.748
	5.932	2.192	3.682	1.999	10.72	6.399	4.937	7.039	4.811	16.734	7.289	5.057
	5.107	6.61	12.556	12.054	15.755	13.61	17.269	11.318	14.239	12.336	13.334	11.321
	4.069	3.099										

C16	16.379	17.163	3.631	18.196	13.236	12.545	15.605	14.748	9.007	7.074	9.729	11.997
	6.339	4.989	11.095	1.949	8.743	2.552	12.739	9.02	10.267	9.543	2.207	2.345
	9999.99	24.846	17.141	6.356	12.321	8.208	12.364	4.922	2.415	1.93	6.148	9.381
	8.668	2.84	2.81	0.834	10.353	4.128	5.237	8.895	6.666	19.665	7.401	2.785
	5.408	4.339	7.912	9.758	17.611	15.686	19.149	9.531	10.985	11.969	14.821	13.177
	5.262	1.612										
C17	8.037	10.292	19.802	17.843	15.3	14.064	14.761	19.15	17.874	29.166	17.593	16.029
	28.03	26.664	9.061	21.282	16.606	17.725	24.489	11.819	15.091	20.232	20.357	17.752
	22.114	9999.99	10.376	24.247	13.561	17.182	15.037	26.613	20.474	22.63	17.414	20.07
	13.865	21.199	19.29	21.842	21.042	26.219	16.314	11.557	13.448	7.058	17.008	24.874
	15.864	26.431	29.683	27.899	11.039	9.628	1.299	26.926	27.448	22.347	16.955	14.858
	17.844	19.634										
C18	1.723	16.347	13.42	29.542	22.629	22.315	26.951	26.408	18.4	23.809	9.726	6.599
	22.68	21.942	8.838	14.88	9.892	15.947	27.123	9.286	8.689	23.784	18.582	15.974
	15.712	9.698	9999.99	22.605	5.478	17.58	12.648	21.256	14.378	16.998	11.013	23.586
	12.087	15.15	17.512	15.44	24.207	20.866	16.394	9.16	11.953	5.927	8.87	19.522
	15.944	21.621	24.33	26.294	2.604	14.705	8.619	25.151	27.675	24.113	24.214	5.713
	11.442	17.858										
C19	22.249	22.252	11.634	24.951	15.296	18.808	21.814	19.075	11.776	2.197	15.148	17.868
	2.248	3.645	18.271	9.315	14.49	9.767	11.535	14.67	16.014	8.778	7.477	9.288
	8.514	29.886	22.855	9999.99	18.07	11.699	18.575	3.92	8.451	8.637	14.709	8.583
	14.146	10.448	6.899	8.632	8.869	3.897	11.446	14.641	12.413	24.336	14.891	5.912
	11.617	3.888	3.113	4.96	23.357	21.895	25.106	3.816	5.27	9.12	16.881	18.923
	13.823	8										
C20	5.191	10.69	7.957	18.617	16.722	14.838	15.534	20.494	12.493	19.311	5.748	5.091
	17.404	18.614	3.181	9.437	4.761	10.674	21.672	4.08	3.238	15.886	13.306	10.701
	10.269	13.328	5.924	17.789	9999.99	11.674	7.138	15.984	8.629	10.785	5.57	18.314
	6.814	9.354	12.239	9.997	19.286	15.59	11.121	3.818	6.602	8.147	5.163	14.248
	10.671	15.801	20.941	20.845	7.734	9.199	8.719	19.875	21.772	18.651	18.307	4.867
	5.999	12.583										
C21	15.889	12.733	7.743	10.665	8.478	6.887	7.583	10.834	4.263	13.61	10.517	11.804
	11.564	10.197	8.501	6.95	9.815	6.545	11.389	9.808	8.478	8.379	7.469	6.572
	7.314	16.721	16.607	11.514	11.818	9999.99	6.991	10.146	7.098	9.203	9.471	8.216
	5.864	7.823	6.402	6.668	10.344	10.508	3.508	8.801	8.208	15.061	10.228	8.411
	3.058	10.719	14.888	15.008	18.137	11.815	15.831	13.686	14.877	10.429	10.077	12.984
	9.269	6.745										
C22	12.238	5.63	8.828	12.236	9.8	8.457	9.153	14.849	7.746	18.813	8.324	10.592
	16.914	15.548	4.141	10.309	7.622	9.943	13.802	7.615	6.598	10.345	12.82	9.97
	11.14	10.636	14.375	16.683	8.176	7.467	9999.99	15.497	9.501	11.656	7.278	10.191
	6.063	10.225	11.752	10.868	11.152	15.873	6.814	7.489	6.016	9.778	8.035	13.762
	6.364	16.059	20.416	20.359	16.205	4.141	8.723	19.078	17.583	12.496	11.189	11.772
	7.076	12.096										
C23	21.289	21.293	7.487	21.966	13.402	16.298	19.375	17.181	9.588	4.094	14.641	16.909
	1.525	0.226	17.407	6.901	13.655	6.495	11.918	13.932	15.179	11.408	4.223	6.522
	4.655	29.049	22.089	3.41	17.215	11.978	16.087	9999.99	6.71	5.49	10.443	10.616
	12.437	6.353	6.064	5.083	11.257	1.086	9.007	13.807	11.578	23.42	14.056	3.374

	9.177	1.297	3.362	5.545	22.523	19.455	24.316	6.585	8.039	9.776	14.97	18.089
	9.556	4.115										
C24	13.321	13.46	1.299	15.529	12.597	11.75	12.447	16.376	8.389	9.994	5.757	7.954
	8.084	7.35	8.882	1.672	5.135	2.139	14.648	5.963	7.21	11.453	3.804	2.112
	2.565	21.081	14.262	9.423	9.264	7.578	9.819	6.667	9999.99	2.914	4.294	11.29
	6.8	1.384	5.215	2.292	14.934	7.028	4.718	5.837	4.588	16.363	5.547	5.087
	4.876	7.239	9.518	11.528	13.409	11.97	15.511	13.34	14.796	13.869	14.203	9.571
	3.407	4.153										
C25	14.343	14.482	2.342	17.647	14.559	13.704	14.4	18.338	10.33	10.085	6.779	8.775
	8.175	7.44	9.904	1.762	6.156	2.229	14.739	6.985	8.232	11.543	3.895	2.202
	2.882	24.818	15.083	8.789	10.286	9.531	10.798	6.758	1.79	9999.99	5.316	11.592
	7.778	1.592	5.306	2.61	12.353	7.119	6.56	6.859	5.52	21.058	6.569	5.178
	6.731	7.33	9.609	11.619	14.23	12.992	16.533	13.43	14.903	17.737	16.143	10.393
	4.676	4.244										
C26	10.303	10.976	3.769	20.671	15.32	15.026	18.08	19.098	11.09	14.318	2.057	5.709
	12.408	11.673	6.42	5.237	1.894	5.348	17.458	2.946	4.192	14.263	8.304	5.321
	6.069	18.063	10.886	12.425	6.247	10.279	9.517	10.991	4.435	8.338	9999.99	14.198
	5.987	6.307	10.936	5.797	15.072	10.197	7.523	2.82	2.516	13.877	2.529	8.854
	7.073	10.408	13.845	15.852	11.322	9.486	13.849	18.742	20.533	18.712	16.904	6.889
	1.144	7.681										
C27	21.736	15.435	11.035	10.59	4.429	7.238	8.537	10.462	5.304	11.055	15.089	17.356
	10.572	8.952	12.301	8.928	14.103	9.537	6.062	14.38	12.816	2.587	8.625	9.564
	7.634	19.959	22.534	8.95	17.68	5.36	10.618	9.18	9.328	8.843	12.936	9999.99
	10.203	9.753	7.419	7.752	3.618	8.163	7.669	14.254	12.026	17.934	14.504	6.778
	7.84	8.744	12.032	14.016	22.97	13.959	18.848	8.85	11.53	3.92	8.28	18.536
	11.804	7.901										
C28	11.685	11.689	3.551	18.231	12.652	12.585	15.64	16.41	8.423	13.465	5.037	7.305
	11.555	10.82	7.803	5.051	4.051	4.645	15.65	4.329	5.575	12.454	7.284	4.672
	5.875	19.443	12.483	11.17	7.629	7.852	5.163	10.138	4.433	6.704	4.576	12.292
	9999.99	5.158	6.216	5.965	13.264	9.568	5.082	4.203	1.974	14.83	4.452	7.613
	4.632	10.71	12.989	14.999	12.919	9.192	15.234	14.28	15.737	14.125	14.237	8.485
	3.384	6.56										
C29	13.969	14.109	1.968	19.399	14.418	13.053	16.808	18.196	10.209	9.964	6.405	8.401
	8.055	7.32	10.086	1.642	5.783	2.109	14.619	6.611	7.858	11.423	3.774	2.082
	2.535	24.455	14.71	9.228	9.913	8.946	13.537	6.638	1.42	2.412	4.942	11.261
	7.234	9999.99	5.185	2.263	12.233	6.999	6.44	6.486	6.905	16.775	6.195	5.057
	6.61	7.21	12.316	11.499	13.856	12.618	17.515	13.23	14.703	13.538	16.002	10.019
	4.303	4.123										
C30	15.83	15.834	5.279	15.538	13.131	11.759	15.514	16.91	8.923	9.265	9.183	11.45
	7.01	6.276	11.948	3.022	8.197	3.474	12.247	8.474	9.721	9.338	3.372	3.501
	2.221	23.592	16.628	6.134	11.774	7.659	12.25	5.593	4.172	3.43	8.721	9.175
	6.449	4.155	9999.99	2.339	9.862	4.545	5.153	8.348	6.12	18.426	8.598	2.669
	5.323	6.165	8.445	10.454	17.064	15.602	19.373	10.097	11.569	11.167	14.715	12.63
	7.529	1.454										
C31	16.199	16.203	3.545	18.897	13.02	12.365	15.41	18.162	8.812	7.346	9.551	11.819
	6.906	5.261	12.317	1.695	8.565	2.185	12.518	8.842	10.089	9.322	2.507	2.212

	0.272	23.959	16.996	6.628	12.142	7.548	12.139	5.489	2.329	1.843	6.062	9.16
	8.473	2.753	3.082	9999.99	10.132	4.4	5.042	8.716	6.488	19.455	8.966	3.058
	5.212	4.611	8.696	10.35	17.432	15.491	20.354	12.249	11.258	11.829	14.604	12.999
	5.175	1.885										
C32	24.086	17.229	13.384	12.548	6.386	9.182	10.494	12.419	6.455	10.012	17.438	19.706
	12.922	9.162	14.255	11.277	16.452	11.886	3.516	16.729	15.166	0.977	10.974	11.913
	9.984	21.913	24.884	7.122	20.03	7.71	12.576	11.53	11.678	11.192	15.04	2.809
	13.315	12.102	9.769	10.102	9999.99	8.452	10.019	16.604	14.375	19.892	16.853	9.128
	10.189	8.442	9.935	11.845	25.32	15.913	21.023	8.241	8.355	1.374	10.225	20.886
	14.154	10.251										
C33	20.537	20.541	7.43	16.448	12.54	13.083	20.207	16.319	8.715	4.329	13.89	16.157
	3.137	1.56	16.655	6.405	12.904	8.181	12.838	13.181	14.428	10.767	3.726	8.208
	4.83	28.297	21.335	3	16.481	9.728	16.727	1.835	6.214	5.728	9.947	9.679
	11.156	6.638	5.313	5.058	9.858	9999.99	9.86	13.055	10.827	23.307	13.305	2.387
	10.031	1.237	4.809	6.945	21.771	20.294	24.252	6.175	7.63	8.839	14.125	17.337
	9.06	4.889										
C34	15.601	12.75	5.454	14.563	8.711	8.02	11.075	12.489	4.481	13.9	8.956	11.224
	11.665	11.103	9.488	4.818	7.97	4.413	11.709	8.247	8.504	9.746	7.57	4.44
	6.11	17.146	16.401	11.405	11.547	3.67	7.809	10.421	4.966	9.304	7.11	9.563
	4.142	5.691	6.503	6.318	11.048	10.782	9999.99	8.122	5.893	15.125	8.371	8.647
	0.882	10.065	13.628	15.109	16.837	11.146	16.256	14.569	15.972	10.195	10.295	12.404
	6.223	6.847										
C35	7.622	10.227	6.23	20.464	14.694	13.811	14.523	18.473	10.465	17.259	2.224	3.871
	15.349	14.614	3.736	8.851	2.39	8.445	19.443	0.262	1.509	16.248	11.077	8.472
	9.669	15.382	9.049	14.964	3.562	9.653	6.834	13.932	8.243	10.719	3.842	16.086
	4.585	8.688	10.01	8.27	17.057	13.899	8.892	9999.99	4.47	11.252	0.924	12.206
	8.442	14.504	16.786	18.793	10.422	8.736	10.601	18.058	19.531	18.363	16.279	5.051
	4.272	10.354										
C36	10.374	9.743	3.399	18.982	13.403	13.364	16.391	17.181	9.4	13.144	3.92	6.188
	12.05	11.316	5.165	4.88	2.934	4.112	17.515	3.211	2.947	13.196	9.149	4.085
	5.711	20.663	11.366	13.036	6.512	9.734	4.969	10.928	4.563	6.227	2.418	14.157
	2.657	4.796	8.082	5.439	15.129	9.839	6.964	3.086	9999.99	12.68	3.335	8.497
	6.514	10.05	13.78	15.494	11.802	8.252	12.029	16.13	17.603	15.339	14.987	7.368
	1.532	8.426										
C37	3.338	12.56	15.103	19.245	16.507	15.451	16.163	23.537	15.529	23.463	12.894	10.024
	22.177	21.189	6.607	16.583	11.907	15.271	23.842	9.365	10.392	20.794	17.903	15.298
	17.415	6.261	5.677	21.792	7.532	14.718	9.008	20.757	15.775	17.931	12.716	19.333
	11.411	16.5	16.836	17.143	21.397	20.404	13.86	9.103	10.994	9999.99	12.309	19.032
	13.41	20.402	23.609	25.619	6.34	11.07	5.323	24.397	26.727	21.695	21.343	8.853
	13.145	17.18										
C38	7.776	10.381	6.384	20.072	14.848	13.973	17.481	18.627	10.619	16.798	2.515	4.026
	15.642	14.905	3.891	7.865	2.681	8.736	18.474	0.416	1.663	16.538	11.368	8.763
	8.696	15.536	9.203	15.254	3.716	9.808	6.988	14.049	7.057	10.789	3.997	16.376
	4.875	8.978	10.3	8.424	17.348	14.41	9.183	0.29	4.76	11.406	9999.99	11.701
	8.732	14.621	16.9	19.191	9.494	9.266	12.11	18.349	19.821	18.653	16.433	5.206
	4.426	10.644										

C39	19.045	19.049	6.417	14.9	11.494	14.974	18.825	15.059	7.455	6.414	12.398	14.665
	4.344	2.975	15.163	5.391	11.412	6.689	12.702	11.689	12.936	9.507	2.713	6.716
	3.816	26.805	19.843	5.907	14.989	8.468	15.482	2.924	5.2	4.715	8.934	9.345
	9.664	5.625	3.821	4.045	10.317	3.285	8.368	11.563	9.335	22.619	11.813	9999.99
	8.538	3.496	5.776	7.785	20.279	18.817	22.826	9.293	11.116	11.622	13.048	15.845
	8.047	2.052										
C40	15.598	12.917	5.448	14.986	9.133	11.286	11.498	12.912	4.904	12.692	8.951	11.218
	10.782	10.048	8.544	4.356	7.965	3.95	12.501	8.242	8.277	9.306	6.688	3.977
	6.128	20.729	16.396	10.943	11.542	4.093	8.231	9.365	4.504	8.421	7.104	9.143
	3.776	5.228	5.62	5.856	10.115	8.972	0.45	8.116	5.887	15.514	8.365	7.017
	9999.99	9.183	12.217	14.227	16.832	11.568	15.63	14.037	15.656	11.145	10.718	12.398
	6.218	5.964										
C41	20.637	20.641	7.882	16.298	12.64	13.045	20.275	16.169	8.814	3.614	13.989	16.256
	2.489	1.308	16.755	7.828	13.003	8.28	11.081	13.28	14.527	10.867	4.178	8.307
	5.465	28.397	21.208	2.541	16.58	9.809	16.911	1.583	6.665	6.301	10.398	10.704
	11.255	7.09	5.412	5.509	11.676	0.598	9.817	13.154	10.926	23.984	13.404	3.024
	9.988	9999.99	3.974	6.23	21.87	20.266	24.351	5.698	7.17	8.938	13.975	17.437
	9.512	4.989										
C42	23.907	23.911	10.776	22.765	16.003	19.208	22.314	19.782	12.427	3.909	17.26	19.527
	2.258	3.348	20.025	9.751	16.274	9.113	14.833	16.551	17.798	11.264	7.073	9.14
	7.273	31.667	24.937	3.593	19.851	14.596	18.953	3.006	9.328	8.109	13.061	14.272
	15.287	8.971	8.683	7.702	12.054	4.031	11.625	16.425	14.197	26.269	16.675	5.993
	11.796	4.242	9999.99	3.263	25.141	22.29	27.916	7.827	8.515	11.57	17.588	20.707
	12.175	6.733										
C43	26.063	26.067	12.268	24.928	17.933	21.153	24.245	21.727	14.372	4.483	19.422	21.689
	3.881	5.278	22.187	11.681	18.436	11.275	15.95	18.713	19.96	15.104	8.471	11.302
	9.435	33.829	26.867	4.924	22.013	16.758	20.891	5.292	11.49	10.271	15.224	14.795
	17.218	11.133	10.845	9.864	15.271	6.145	13.787	18.587	16.359	28.459	18.837	8.155
	13.958	6.356	2.769	9999.99	27.303	24.236	29.847	6.801	6.881	14.025	19.532	22.869
	14.337	8.895										
C44	4.038	18.063	16.496	28.844	23.755	25.065	28.167	27.526	19.518	25.489	10.668	5.702
	23.803	23.068	11.934	17.976	13.3	17.072	27.386	10.412	11.785	24.259	19.524	17.1
	18.808	11.005	1.791	23.807	7.385	20.049	15.218	22.385	17.168	16.285	14.108	24.097
	13.212	14.253	18.641	18.536	25.105	22.205	17.519	10.286	15.141	7.234	9.995	20.836
	17.069	22.958	25.455	27.247	9999.99	17.952	9.926	26.276	28.234	27.352	25.332	4.816
	14.657	18.985										
C45	15.035	3.632	11.031	12.096	9.553	8.317	9.014	13.402	10.636	20.556	10.527	12.794
	18.882	18.07	7.224	12.512	9.825	12.146	18.072	9.818	8.801	13.815	14.784	12.173
	13.343	11.401	17.972	18.686	13.118	10.364	4.221	17.465	11.704	13.859	9.481	13.652
	8.266	12.428	13.717	13.071	14.624	17.284	10.775	9.692	8.218	12.496	10.238	15.912
	10.324	17.862	20.316	22.326	18.408	9999.99	9.488	21.526	20.785	15.929	11.208	13.975
	9.279	14.06										
C46	6.862	10.363	14.842	17.411	14.868	13.632	14.329	17.571	16.91	25.056	12.29	12.741
	24.15	22.53	7.948	16.355	11.646	16.611	23.375	10.705	10.121	19.118	19.243	16.638
	17.154	1.66	9.206	23.369	10.283	16.057	10.431	22.758	16.409	18.664	12.487	18.956
	12.751	17.889	18.176	16.882	19.928	21.767	15.2	10.443	12.334	5.198	10.978	20.372

	14.75	22.321	25.802	27.594	9.869	9.196	9999.99	25.848	27.806	23.069	16.523	12.767
	13.427	18.557										
C47	24.326	23.759	13.774	24.778	12.542	20.999	24.016	18.582	13.516	4.599	17.678	19.945
	6.103	7.075	20.444	11.517	16.692	11.969	10.018	16.969	18.216	9.193	11.868	11.996
	10.716	32.086	25.123	3.797	20.269	16.606	18.019	7.35	12.667	11.925	17.217	8.878
	14.944	12.65	9.101	10.835	9.341	6.365	13.648	16.843	14.615	27.895	17.093	8.722
	13.819	6.355	7.137	7.936	25.559	22.839	28.04	9999.99	3.289	8.108	16.393	21.126
	16.025	9.913										
C48	26.28	22.987	15.729	18.156	11.986	14.79	16.102	18.027	12.053	7.207	19.633	21.9
	7.758	9.03	22.399	13.472	18.647	13.924	9.42	18.924	20.171	8.595	13.822	13.951
	12.671	34.041	27.201	5.752	22.224	13.593	18.183	9.304	14.622	13.88	18.989	8.323
	16.899	14.605	11.056	12.79	8.874	8.32	15.603	18.798	16.57	29.136	19.048	10.677
	15.774	8.31	8.623	6.902	27.514	21.511	26.029	2.095	9999.99	7.553	15.833	23.08
	17.98	11.868										
C49	26.096	18.872	14.534	13.697	7.536	10.332	11.644	13.569	7.6	9.617	18.588	20.855
	9.732	9.824	15.405	12.034	17.602	13.036	2.195	17.879	16.306	2.303	12.124	13.063
	11.133	26.223	26.033	7.784	21.179	8.838	13.739	10.099	12.827	12.342	16.19	3.958
	14.465	13.252	10.918	11.252	1.607	9.114	11.168	17.753	15.525	21.041	18.003	10.277
	11.339	9.104	10.597	13.437	26.324	17.085	21.581	9.09	8.512	9999.99	11.374	22.036
	15.303	11.401										
C50	22.168	17.22	16.21	3.852	4.165	3.309	2.522	3.723	6.273	16.532	19.712	21.979
	15.882	14.262	14.307	15.117	18.726	14.712	12.471	19.003	16.94	8.215	15.626	14.739
	15.471	18.308	27.157	14.878	22.303	8.553	9.638	14.385	15.265	17.36	17.933	8.052
	14.326	15.99	14.559	14.825	9.024	13.489	11.97	18.877	16.649	19.944	19.127	11.461
	11.52	14.031	21.373	23.165	27.448	12.312	16.395	15.319	15.43	10.329	9999.99	23.16
	16.979	14.902										
C51	6.394	14.962	9.428	27.718	21.922	21.522	22.234	25.701	17.693	21.736	7.323	2.607
	20.274	19.54	7.463	13.574	7.489	13.544	23.962	6.883	7.033	20.767	16.179	13.571
	14.768	13.31	4.013	20.066	4.289	16.761	11.167	18.857	10.386	13.189	9.706	20.605
	9.684	11.158	15.112	14.134	21.556	18.677	13.991	6.757	9.55	9.539	6.467	17.308
	13.541	19.078	21.708	24.513	4.303	13.228	10.719	22.918	24.63	22.882	23.475	9999.99
	8.347	15.456										
C52	10.105	10.245	2.898	20.519	14.245	14.206	17.233	18.208	10.015	13.881	2.758	5.734
	11.972	11.237	5.667	4.506	1.919	4.445	17.687	2.748	3.994	13.547	7.572	4.418
	5.338	17.865	10.912	14.581	6.049	9.562	6.227	10.554	3.57	5.853	1.288	13.289
	4.202	4.295	9.627	5.065	14.26	9.465	8.509	2.622	1.785	13.641	2.331	8.123
	8.059	9.676	13.406	15.459	11.348	8.754	13.609	17.676	19.228	15.662	15.946	6.914
	9999.99	6.95										
C53	16.255	16.395	4.712	20.704	11.817	14.21	14.907	15.401	8.532	7.833	8.691	14.376
	5.35	4.714	11.817	3.686	8.069	4.153	13.355	11.4	12.647	10.16	1.255	4.126
	2.111	24.015	17.062	5.645	12.199	9.819	13.953	4.031	3.495	3.01	7.229	9.998
	9.375	3.92	3.532	2.34	10.97	3.949	6.849	11.274	9.046	19.825	8.482	2.075
	7.019	3.628	6.882	9.411	19.99	17.297	19.97	11.434	10.275	12.275	13.877	15.556
	6.342	9999.99										

;

VARIABLES

```

z          objective function
y(j)      binary variable to represent if the depot location j is opened or not with capacity 1
x(i,j)    binary variable to represent if customer i is assigned to the facility j or not
f(n,np,k) binary variable to indicate if arc a is used in the route performed by vehicle k or
not
u(i,k)    accumulated deliveries by vehicle k until the customer i
;

BINARY VARIABLES
f, y, x ;

POSITIVE VARIABLE
u ;

EQUATIONS
costo_total
entrantes(i)
cap_vehicle(k)
equilibrio1(k,n)
equilibrio2(k)
subtours(i,ip,k)
relacion(i,j,k)
cap_depots(j)
asignacion(i)
;

costo_total..      z =e= sum((j), (FO(j))*factorcostofijo*y(j)) + sum((a(n,np),k)$ (ord(n) ne
ord(np)), C1(n,np)*f(a,k))*autonomia*1/conversiongalon*preciogalon ;
entrantes(i)..    sum((k,a(n,i))$ (ord(i) ne ord(n)), f(a,k)) =e= 1 ;
cap_vehicle(k)..  sum((a(n,i))$ (ord(i) ne ord(n)), d(i)*f(a,k)) =l= vehcap ;
equilibrio1(k,n).. sum(a(n,np)$ (ord(n) ne ord(np)), f(a,k)) - sum(a(np,n)$ (ord(n) ne
ord(np)), f(a,k)) =e= 0 ;
equilibrio2(k)..  sum(a(j,i), f(a,k)) =l= 1 ;
subtours(a(i,ip),k)$ (ord(i) ne ord(ip)).. u(i,k) + d(ip) =l= u(ip,k) + 99999*(1-f(a,k)) ;
relacion(i,j,k).. sum(a(j,ip), f(a,k)) + sum(a(n,i)$ (ord(i) ne ord(n)), f(a,k)) =l= 1+x(i,j) ;
cap_depots(j)..  sum(i,d(i)*x(i,j)) =l= capacidadcd(j)*y(j) ;
asignacion(i)..  sum(j,x(i,j)) =e= 1 ;

MODEL LRP /all/      ;
SOLVE LRP USING MIP Minimizing z      ;
display x.l, y.l, f.l;

```