

2022



IBERO

De:
Planeta Formación y Universidades

Optimización de una Red Logística Terrestre para el Transporte de Cargas Empresariales desde la Óptica de la Programación Lineal: Un Caso de Estudio Real Intermunicipal en el Contexto del COVID-19

Lina Clemencia Bustamante
Gutiérrez

Martha Yaneth Mancera Camacho
Facultad de Ingeniería
Corporación Universitaria
Iberoamericana
Facultad de Ingeniería

Paola Marcela Alzate Montoya
Facultad de Ingeniería
Universidad Católica Luis Amigó



Optimización de una Red Logística Terrestre para el Transporte de Cargas Empresariales desde la Óptica de la Programación Lineal: Un Caso de Estudio Real Intermunicipal en el Contexto del COVID-19

Optimization of an Overland Logistics Network for Business Freight Transportation from a Linear Programming Perspective: A Real Intermunicipal Case Study in the Context of COVID-19

Nombre Autor/es

Lina Clemencia Bustamante Gutiérrez

Facultad de Ingeniería

Corporación Universitaria Iberoamericana

Nombre Coautores

Martha Yaneth Mancera Camacho

Facultad de Ingeniería

Corporación Universitaria Iberoamericana

Paola Marcela Alzate Montoya Facultad de Ingeniería

Universidad Católica Luis Amigó

09/11/2022



Agradecimientos

Agradecimientos a la empresa E-container por la apertura al conocimiento y a la investigación suministrando la información de entrada para el desarrollo de esta.

Agradecimientos a las IES Corporación Universitaria Iberoamericana y Universidad Católica Luis Amigó, por el apoyo económico para el desarrollo de la presente investigación, la participación en eventos científicos y la divulgación del conocimiento.



Resumen

Como consecuencia del COVID-19, la logística terrestre se vio obligada a cambiar su diseño de rutas y considerar un alto número de variables, entre ellas, la demanda, la oferta de productos específicos y los costos relacionados con ellas; como consecuencia, los modelos de optimización cobran una gran importancia en la toma de decisiones. El objetivo de este trabajo de investigación es analizar los efectos mencionados en la logística terrestre, antes y durante la pandemia, a partir de los datos suministrados por una empresa colombiana y considerar los modelos de la programación lineal, para tomar decisiones acertadas y pertinentes a la nueva realidad. Para ello, se consideran 2 etapas: Un análisis estadístico de los datos suministrados, considerando variables como Frecuencia de operaciones y costos implicados. En una segunda etapa, se propone un modelo matemático que relaciona las rutas del transporte de carga, el cual se valida mediante la aplicación de un software de optimización. A través del análisis estadístico pueden evidenciarse unas conclusiones iniciales, donde se ratifica que Bogotá es la ciudad mercantil de Colombia por excelencia con el mayor porcentaje de salida y entrada de mercancía; también se evidencia que las operaciones logísticas en el 2020 decayeron por efectos de la pandemia, mientras que en el 2019 se tuvo la mayor frecuencia de estas. En cuanto al modelo matemático desarrollado bajo la ejecución del Software Lingo, identifica la forma eficiente en que las rutas de la empresa en estudio se deben diseñar, con base en la optimización de costos.

Palabras Clave: COVID-19, Análisis Estadístico, Ruteo

Abstract

Because of COVID-19, land logistics was forced to change its route design and consider a high number of variables, among them, demand, supply of specific products and related costs; as a consequence, optimization models become very important in decision making. The objective of this research work is to analyze the effects on land logistics, before and during the pandemic, based on data provided by a Colombian company and to consider linear programming models, in order to make accurate and relevant decisions to the new reality. For this, 2 stages are considered: A statistical analysis of the data provided, considering variables such as frequency of operations and costs involved. In a second stage, a mathematical model is proposed that relates the routes of cargo transportation, which is validated through the application of an optimization software. Through the statistical analysis, some initial conclusions can be evidenced, where it is ratified, that Bogota is the merchant city of Colombia par excellence with the highest percentage of outgoing and incoming goods; it is also evidenced that logistics operations in 2020 declined due to the effects of the pandemic, while in 2019 there was the highest frequency of these. As for the mathematical model developed under the execution of Lingo Software, it identifies the efficient way in which the routes of the company under study should be designed, based on cost optimization.

Keywords: COVID-19, Statistical Analysis, Routing



Tabla de Contenido

Introducción	pg. 11
Capítulo 1 - Fundamentación conceptual y teórica	pg. 13
Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo	pg. 15
2.1 Tipo y Diseño de Investigación	
2.2 Población o entidades participantes	
2.3 Definición de Variables o Categorías	
2.4 Procedimiento e Instrumentos	
2.5 Alcances y limitaciones	
Capítulo 3 - Resultados	pg. 17
Capítulo 4 - Discusión	pg. 25
Capítulo 5 - Conclusiones	pg. 27
5.1 Cumplimiento de objetivos y aportes	
5.2 Producción asociada al proyecto	
5.3 Líneas de trabajo futuras	
Anexos	pg. 30
Referencias	pg. 33



Índice de Tablas

Tabla 1. (Tabla i-ciudad) ----- **pg. 21**

Tabla 2. (Tabla j-ciudad) ----- **pg. 21**

Tabla 3. Cantidad de contenedores a enviar----- **pg. 24**

Tabla 4. Futuras líneas de estudio ----- **pg. 32**



Índice de Figuras

Figura 1 Ciudades de origen -----	pg. 17
Figura 2. Ciudades de destino-----	pg. 18
Figura 3. Resumen de las operaciones realizadas por año -----	pg. 18
Figura 4. Costo promedio en las operaciones anuales -----	pg. 19
Figura 6. Relacionamiento entre ciudades -----	pg. 22
Figura 7. Resumen de las operaciones realizadas-----	pg. 26
Figura 8. Tipo de contenedor -----	pg. 26
Figura 9. Red de transporte -----	pg. 30
Figura 10. Ciudades de origen -----	pg. 30
Figura 11. Ciudades de destino -----	pg. 31
Figura 12. Registro de operaciones realizadas por mes -----	pg. 32



Índice de Anexos

**6.1 Modelo Matemático ----- pg.
30**

6.2 Extensión del análisis estadístico realizado ----- pg. 30

1. Introducción

La logística de transporte ha sido el mecanismo por el cual se garantiza el abastecimiento, la distribución y el acceso a diversos productos y servicios; su complejidad ha provocado el creciente interés de estudio con la implementación de técnicas y metodologías adaptadas a cada una de las necesidades empresariales particulares, siendo el objetivo general, el optimizar los procesos inherentes al mismo. Algunos estudios se han centrado en la búsqueda de soluciones específicas como es el caso de [1], cuyos autores se concentraron en el análisis de aplicaciones en el transporte terrestre que usan sensores de posicionamiento de bajo costo con la misma efectividad de un equipo de alta gama y de costo superior. El uso de modelos matemáticos y algoritmos que integran los elementos estrechamente hace pensar en posibles futuros desarrollos y aplicaciones de bajo costo y alta eficacia. Por su parte, [2] propone un modelo de programación dinámica mediante programación de objetivos para grúas; que apoyan la programación efectiva de la carga de trabajo en los terminales de contenedores. Así mismo [3], propone un modelo de sistema de gestión de programación de terminales de contenedores, con base en la cooperación multiagentes.

El estudio de la operación logística de los contenedores ha sido materia de estudio durante décadas; cada uno de los elementos que forman parte de su sistema, han sido analizados a través de modelos matemáticos que optimizan su uso y reúso y los convierten en elementos clave para la Cadena de suministros de los productos y servicios a nivel mundial. Es tal su importancia, que se han destinado terminales completos para su movilización y se ha considerado la incertidumbre que originan un gran número de traslados improductivos [4]. Una gran parte de los autores, se ha centrado en modelos que optimizan su costo, teniendo en cuenta situaciones que afectan su construcción, por ejemplo, algunos han incursionado en el campo matemático que integra la logística con el cuidado del medio ambiente, otros dan tratamiento a la dependencia del nivel de restricción política que rige las actividades transfronterizas, como [5], quien realiza todo un tratado, de las integraciones a nivel latinoamericano y quien identifica diferentes fuerzas que intervienen en las mismas, para el éxito de las negociaciones; y del nivel de información disponible para la toma de decisiones, entre otras [6].

Como factor adicional, el surgimiento de la COVID-19 ha afectado diversos sectores económicos llevando a otro nivel a los procesos industriales. La logística ha sido una de las áreas con aspectos positivos durante la crisis sanitaria mundial, debido a que la adquisición de bienes dio un giro de potencialización del transporte de mercancías a nivel nacional e internacional. Con lo cual, la pandemia ha incrementado la oferta y demanda de productos y con ello el número de rutas; potenciando la presente investigación que articula la optimización de la logística de transporte con los efectos provocados en la misma por la COVID-19 a través del análisis de un caso real en una empresa de transporte intermunicipal de Colombia.

2. Capítulo 1 – Fundamentación conceptual y teórica

Las investigaciones de transporte de contenedores tienen como base, el significado del contenedor como concepto esencial de carga unitaria. Es por eso, que los autores analizan la inmensa problemática de conectar innumerables terminales (puertos) dado el alto incremento a diario de los flujos de mercancía, a través de modelos matemáticos que apoyen la planificación y ejecución eficiente de las operaciones [7]. Así es que, un barrido general por los autores, deja ver claramente, cómo sus artículos abordan el problema del diseño de redes de servicios para el transporte teniendo en cuenta explícitamente el reposicionamiento de los contenedores vacíos. [8]. El sector del transporte intermodal ha experimentado un crecimiento y una prosperidad abrumadores en los últimos años, debido principalmente al auge económico de China y para hacer frente a la creciente demanda de tráfico de contenedores, los investigadores han estudiado diferentes modelos matemáticos, para equilibrar los flujos direccionales entre dos o varios puntos concretos [9].

Es obvio que el propósito, es la optimización de los flujos que conectan los nodos definidos y el mayor énfasis que realizan, es en el ahorro de costos implicados. [10], [11], [12]; algunos de los autores, describen el problema del reposicionamiento de los contenedores vacíos e identifican su estructura básica y sus principales características. Luego introducen la formulación matemática de una y varias mercancías, que ofrecen un marco de modelización general para esta clase de problemas y que tienen en cuenta sus especificidades: la dependencia espacial y temporal de los eventos, las sustituciones entre los productos y los servicios [13].

Algunos autores se centran en el análisis del significado de puerto seco y cómo éstos, pueden desplazar grandes volúmenes de carga a modos de tráfico más eficientes desde el punto de vista energético y menos perjudiciales para el medio ambiente, aliviar ciudades portuarias de cierta congestión y facilitar soluciones logísticas mejoradas para los cargadores en el interior del puerto. Desde su aparición a gran escala en los años 60, el sector del transporte de contenedores ha mejorado su rendimiento a un ritmo impresionante, sin embargo, han estado centrados más en la variable costo que en la variable eficiencia. [14]. Otros en cambio, analizan cómo la investigación operativa se ha centrado sobre todo en problemas de transporte uni-modal y en la obvia necesidad de dar el paso al análisis de la problemática en el transporte intermodal de mercancías, que requiere una aplicación de un tipo de modelos diferentes [11].

[11], además de analizar el concepto de contenedor y su gran importancia en la eficiencia de las redes de transporte intermodal, examinan cuestiones relacionadas con otros sistemas o componentes intermodales, como los servicios postales, el transporte ferroviario intermodal y las terminales de contenedores de los puertos marítimos, y resaltan la juventud de la aplicación de la Investigación de Operaciones, en el transporte intermodal de mercancías.

En la actualidad se cuenta con dos tamaños principales de contenedores, uno de ellos es equivalente a veinte pies, conocido como TEU y el otro es de cuarenta pies al cual se hace referencia como FEU, lo que quiere decir que dos TEU son un FEU. El tamaño de los contenedores es fundamental para el transporte, ya sea por vía terrestre, por tren o por medio del chasis de un camión, también es conocida la preferencia que se tiene en el transporte de los contenedores por vía marítima por lo cual desde 1995 se ha trabajado en el aumento de los



portacontenedores, los cuales pasaron de transportar cientos a miles de contenedores, con el fin de optimizar las rutas de transporte. [15]

En la literatura conocida a la fecha, los métodos de optimización empleados proporcionan resultados limitados en el momento de llevarlos a cabo en la práctica debido a que la estructura del producto de transporte limita la optimización de la red logística, por lo tanto la sincro modalidad pretende superar esta limitación por medio de una nueva estructura, la cual tiene como base la diferenciación entre el precio y el plazo en la entrega de la mercancía, a cada producto se le proporciona una clasificación con tarifa fija y servicios relacionados, lo que permite dirigirse a más clientes y con ello maximizar ingresos obtenidos. [16]

3. Capítulo 2 - Aplicación y Desarrollo

2.1 Tipo y Diseño de Investigación

La presente investigación es de tipo mixto, donde se tienen en cuenta variables tanto cualitativas, por ejemplo, las ciudades que forman parte de las rutas de la compañía, como cuantitativas entre las que se encuentran la frecuencia de envíos y los costos promedio de operación. Los datos suministrados por la empresa E-containers, dedicada al transporte de contenedores, son registros de los años 2019, 2020 y 2021; lo cual proporciona un panorama de la situación antes y durante el COVID-19.

2.2 Población o entidades participantes

Población: Todas las rutas de la empresa E-container durante 3 años de estudio

Entidades: Empresa E-container, Corporación Universitaria Iberoamericana, Universidad Católica de Manizales

2.3 Definición de Variables o Categorías

Las variables X_{ij} y recursos que identifican la conexión entre las fuentes (i) a los destinos (j) se definen de la siguiente forma:

nodos fuente $i = 1, 2, \dots, n$

nodos destino $j = 1, 2, \dots, m$

$x_{ij} =$ unidades a enviar desde la fuente i – ésima al destino j – ésimo



La relación de fuentes y destinos de acuerdo con las particularidades de la empresa en estudio se representan en el siguiente modelo matemático de tal forma que se minimicen los costos de las rutas garantizando que los envíos satisfagan la oferta y las recepciones la demanda.

$$\text{Min } Z(x) = C_{ij}x_{ij}$$

Sujeto a

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i, \forall i$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j, \forall j$$

$$x_{ij} \geq 0$$

2.4 Procedimiento e Instrumentos:

La metodología considerada en el presente trabajo de investigación consideró dos etapas: el análisis de los datos suministrados por la empresa en estudio bajo la óptica pre y durante la COVID-19 con base en las variables de rutas y costos a fin de identificar las implicaciones de la pandemia en el transporte de contenedores; y una segunda etapa, con la propuesta de un modelo matemático que propone rutas óptimas, que giran en torno al componente de costos del transporte de los contenedores. La optimización se llevó a cabo a partir de la implementación del software de optimización matemática Lingo.

2.5 Alcances y limitaciones

Alcances:

- Corroboración de la variabilidad existente en la frecuencia de las operaciones mercantiles a nivel nacional en el periodo de pandemia.
- Optimización del costo del transporte de mercancías de la empresa E-container.

Limitaciones:

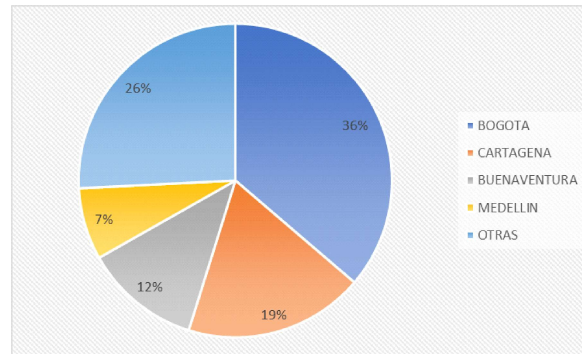
- La base de datos proporcionada por la empresa E-container abarca los años 2019, 2020 y 2021, por tal motivo los análisis realizados son restringidos a este periodo de tiempo y no consideran los posibles cambios en la demanda de las operaciones en años posteriores.

- El estudio se basa en el análisis del comportamiento del transporte terrestre únicamente a nivel nacional, no se contemplan las operaciones de la empresa por medio no terrestre y a nivel internacional.
- El estudio se inicia un año antes de la pandemia del Covid-19 y culmina un año después, esto implica que la frecuencia de las operaciones puede presentar un comportamiento variante en los años posteriores como consecuencia de la pandemia.

4. Capítulo 3 - Resultados

En la Figura No.1, se presentan las principales ciudades de origen de las operaciones analizadas, con el mayor porcentaje se encuentra la ciudad de Bogotá, y con el menor porcentaje la ciudad de Medellín.

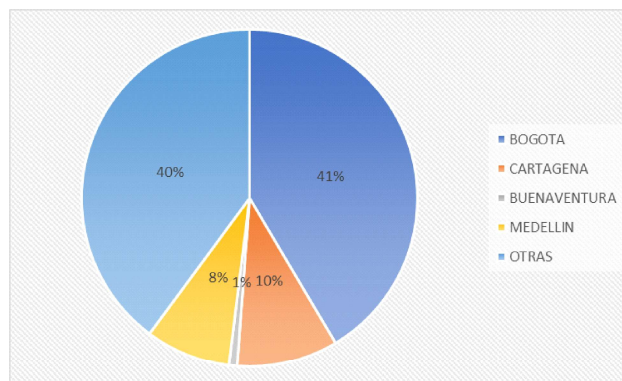
Figura No.1 Ciudades de origen



En el conjunto de regiones de origen, denotado como OTRAS se encuentran Cali, Manizales, Barranquilla, distintos municipios de Cundinamarca, Antioquia, entre otros, sectores que abarcan una cantidad significativa en la totalidad de traslados realizados.

De manera análoga la Figura No.2 muestra las ciudades de destino abarcadas.

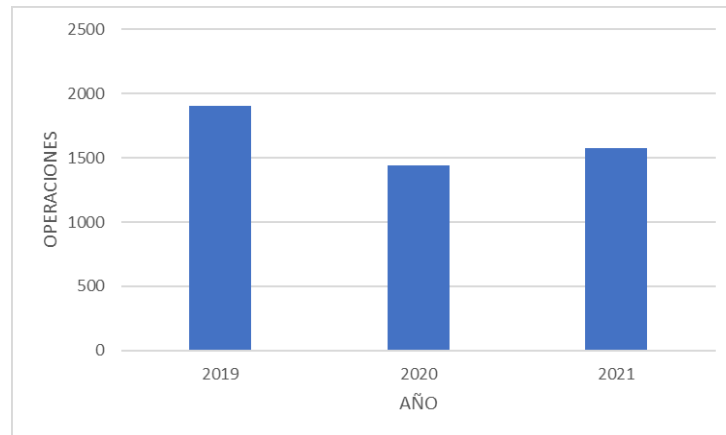
Figura No.2. Ciudades de destino



Bogotá cuenta con la mayor cantidad de mercancía entrante, siendo la ciudad con mayor flujo mercantil a nivel nacional.

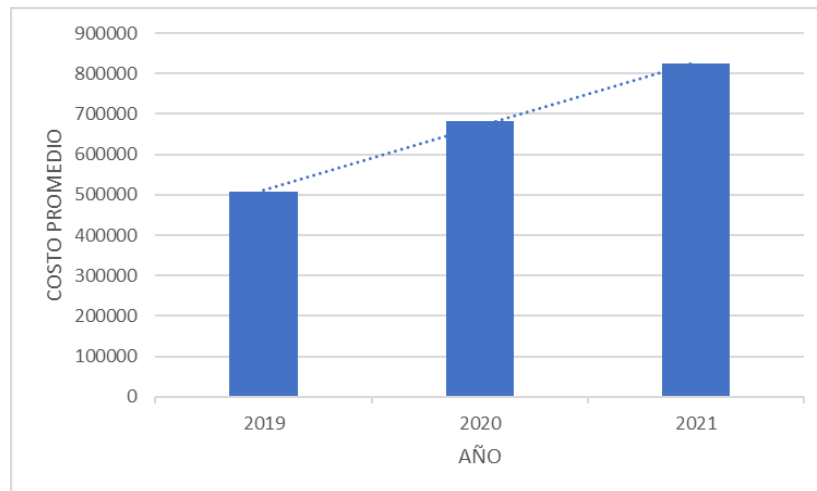
La totalidad de las operaciones por año se presentan en la Figura No.3, este resumen muestra un panorama general del comportamiento del transporte terrestre de mercancías a nivel nacional durante los tres años analizados, evidenciando la afectación generada por la pandemia del Covid-19 durante los años 2020 y 2021.

Figura No.3. Resumen de las operaciones realizadas por año



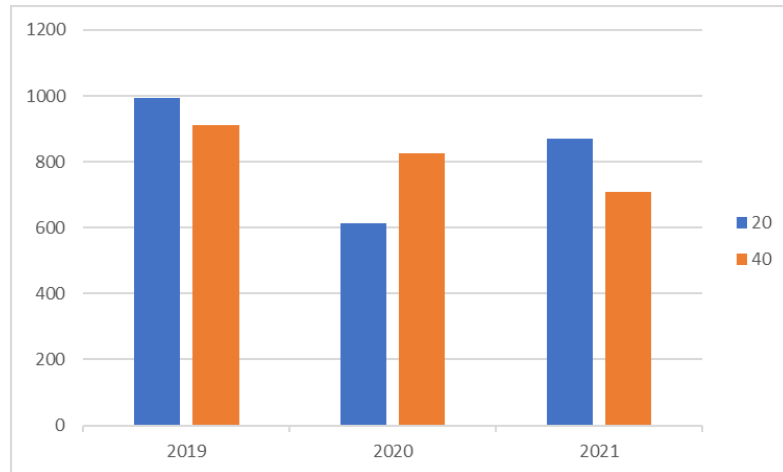
En la Figura No.4, se presenta el promedio de costos en las operaciones por año, el cual presenta una tendencia creciente, caso contrario a la cantidad de operaciones registradas.

Figura No.4. Costo promedio en las operaciones anuales



En la gráfica se identifica un comportamiento creciente en el promedio de costo por año, situación que es de esperarse a causa de la inflación a nivel nacional presentada en los últimos años.

Figura No.5. Tipo de contenedor



Del análisis realizado se concluye que el año 2020 es el punto de inflexión en el comportamiento del transporte mercantil a nivel nacional, motivo asociado directamente a las restricciones nacionales durante el periodo de confinamiento.

Modelamiento matemático

El modelo de redes propuesto se realizó basado en la metodología propuesta por [17], donde las fuentes corresponden a las ciudades de despacho de los contenedores y los destinos las ciudades de llegada. **La Figura No. 9 del anexo 6.1**, presenta la red de transporte que conecta las fuentes con los destinos, donde los valores C_{ij} corresponden a los costos medios de las rutas durante los años 2019, 2020 y 2021. La oferta a_i y la demanda b_j se definen como la cantidad de contenedores en TEUs disponibles en las fuentes y requeridos en los destinos.

Las variables X_{ij} y recursos que identifican la conexión entre las fuentes (i) a los destinos (j) se definen de la siguiente forma:

$$\text{nodos fuente } i = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{nodos destino } j = 1, 2, \dots, m$$

$$x_{ij} = \text{unidades a enviar desde la fuente } i - \text{ésima al destino } j - \text{ésimo}$$

La relación de fuentes y destinos de acuerdo con las particularidades de la empresa en estudio se representan en el siguiente modelo matemático de tal forma que se minimicen los costos de las rutas garantizando que los envíos satisfagan la oferta y las recepciones la demanda.

$$\text{Min } Z(x) = C_{ij}x_{ij}$$

Sujeto a



$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = a_i, \forall i$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = b_j, \forall j$$

$$x_{ij} \geq 0$$

Las Tablas 1 y 2 presentan las características de las fuentes y los destinos con las cantidades de oferta y demanda, respectivamente. En las características se encuentran 7 nodos de despacho y 10 de destino, resaltando que las ciudades fuente son las principales del país en términos de participación en el comercio interior y exterior.

Tabla 1. (Tabla i-ciudad)

<i>i</i>	Ciudad	<i>a_i</i>
1	Barranquilla	119
2	Bogotá	1245
3	Buenaventura	558
4	Cali	20
5	Cartagena	123
6	Manizales	879
7	Medellín	27

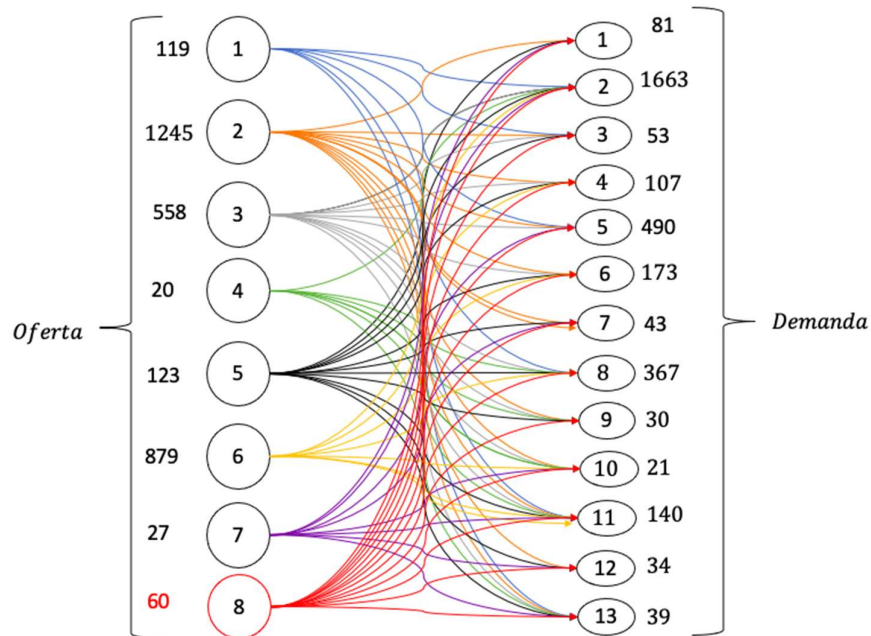
Tabla 2. (Tabla j-ciudad)

<i>j</i>	Ciudad	<i>b_j</i>
1	Barranquilla	81
2	Bogotá	1663
3	Bucaramanga	53
4	Cali	107
5	Cartagena	490
6	Funza	173

7	La Jagua	43
8	Medellín	367
9	Palmira	30
10	Pereira	21
11	Siberia	140
12	Buenaventura	34
13	Manizales	39

La relación de las rutas de estudio se presenta en la Figura 6. El nodo 8 de las fuentes es un punto ficticio que busca igualar la oferta a la demanda con un valor de 60 a fin de obtener soluciones óptimas y factibles posteriormente al introducir los datos al modelo matemático y al software Lingo.

Figura 6. Relacionamiento entre ciudades



Considerando las rutas que la empresa en estudio realiza, el modelo matemático se describe a continuación:

Función objetivo:



$$\begin{aligned} \min = & 700000 * x_{12} + 2500000 * x_{13} + 387931 * x_{15} + 600000 * x_{18} + 575000 * x_{111} \\ & + 1200000 * x_{113} + 1430973 * x_{21} + 1533333 * x_{23} + 716552 * x_{24} \\ & + 2449277 * x_{25} + 289331 * x_{26} + 1344444 * x_{27} + 665775 * x_{28} \\ & + 989412 * x_{29} + 792308 * x_{210} + 179474 * x_{211} + 956250 * x_{212} \\ & + 809931 * x_{213} + 651214 * x_{32} + 993333 * x_{33} + 605263 * x_{34} \\ & + 900000 * x_{35} + 530000 * x_{36} + 483932 * x_{38} + 575000 * x_{39} + 533333 \\ & * x_{310} + 320000 * x_{311} + 300000 * x_{313} + 722000 * x_{42} + 1485000 * x_{48} \\ & + 531250 * x_{49} + 900000 * x_{410} + 555538 * x_{411} + 400000 * x_{413} \\ & + 682727 * x_{51} + 463827 * x_{52} + 4450000 * x_{53} + 1042857 * x_{54} \\ & + 366667 * x_{56} + 412250 * x_{58} + 1916667 * x_{59} + 276094 * x_{511} \\ & + 300000 * x_{512} + 2387500 * x_{513} + 752727 * x_{62} + 500000 * x_{64} \\ & + 450000 * x_{66} + 400000 * x_{68} + 350000 * x_{610} + 650000 * x_{611} \\ & + 1420000 * x_{612} + 1375000 * x_{71} + 543043 * x_{72} + 1000000 * x_{75} \\ & + 1287500 * x_{77} + 566667 * x_{710} + 469000 * x_{711} + 1715000 * x_{712} \\ & + 700000 * x_{713} + 0 * x_{81} + 0 * x_{82} + 0 * x_{83} + 0 * x_{84} + 0 * x_{85} + 0 * x_{86} \\ & + 0 * x_{87} + 0 * x_{88} + 0 * x_{89} + 0 * x_{810} + 0 * x_{811} + 0 * x_{812} + 0 * x_{813} \end{aligned}$$

Restricciones de oferta:

$$x_{12} + x_{13} + x_{15} + x_{18} + x_{111} + x_{113} = 119$$

$$x_{21} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} + x_{28} + x_{29} + x_{210} + x_{211} + x_{212} + x_{213} = 1245$$

$$x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{38} + x_{39} + x_{310} + x_{311} + x_{313} = 558$$

$$x_{42} + x_{48} + x_{49} + x_{410} + x_{411} + x_{413} = 123$$

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{56} + x_{58} + x_{59} + x_{511} + x_{512} + x_{513} = 879$$

$$x_{62} + x_{64} + x_{66} + x_{68} + x_{610} + x_{611} + x_{612} = 27$$

$$x_{71} + x_{72} + x_{75} + x_{77} + x_{710} + x_{711} + x_{712} + x_{713} = 230$$

$$x_{81} + x_{82} + x_{83} + x_{84} + x_{85} + x_{86} + x_{87} + x_{88} + x_{89} + x_{810} + x_{811} + x_{812} + x_{813} = 60$$

Restricciones de demanda:

$$x_{21} + x_{51} + x_{71} + x_{81} = 81$$

$$x_{12} + x_{32} + x_{42} + x_{52} + x_{62} + x_{72} + x_{82} = 1663$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{53} + x_{83} = 53$$

$$x_{24} + x_{34} + x_{54} + x_{64} + x_{84} = 107$$



$$x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{75} + x_{85} = 490$$

$$x_{26} + x_{36} + x_{56} + x_{66} + x_{86} = 173$$

$$x_{27} + x_{77} + x_{87} = 43$$

$$x_{18} + x_{28} + x_{38} + x_{48} + x_{58} + x_{68} + x_{88} = 367$$

$$x_{29} + x_{39} + x_{49} + x_{59} + x_{89} = 30$$

$$x_{210} + x_{310} + x_{410} + x_{610} + x_{710} + x_{810} = 21$$

$$x_{111} + x_{211} + x_{311} + x_{411} + x_{511} + x_{611} + x_{711} + x_{811} = 140$$

$$x_{212} + x_{512} + x_{612} + x_{712} + x_{812} = 34$$

$$x_{113} + x_{213} + x_{313} + x_{413} + x_{513} + x_{713} + x_{813} = 39$$

Condición de no negatividad

$$x_{ij} \geq 0$$

La cantidad de contenedores a enviar desde las 8 fuentes se presentan en la Tabla 3. Los resultados sugieren que, de las 72 variables estudiadas, 20 se deberán realizar de la siguiente forma:

- Barranquilla deberá enviar el total de contenedores a Cartagena.
- Cali, Cartagena, Manizales y Medellín deberán enviar toda su oferta hacia la ciudad de Bogotá.
- Buenaventura realizará sus rutas hacia Bogotá y Cartagena con 404 y 154 unidades, respectivamente.
- Bogotá enviará a los 12 destinos.

Tabla 3. Cantidad de contenedores a enviar

Variables	Cantidad
X15	119
X21	81
X23	53
X24	107
X25	157
X26	173



X27	43
X28	367
X29	30
X210	21
X211	140
X212	34
X213	39
X32	404
X35	154
X42	123
X52	879
X62	27
X72	230
X85	60

El destino 5 correspondiente a la ciudad de Cartagena tendrá una demanda insatisfecha de 60 unidades provenientes de la fuente ficticia. En general, el desarrollo de las rutas sugeridas minimizará los costos de transporte hasta en $2,23 \times 10^{10}$ millones de pesos.

5. Capítulo 4 - Discusión

¿Cuál es el modelo matemático más eficiente en la optimización de la red logística terrestre del transporte de carga para la industria manufacturera, mediante la programación lineal en el contexto del COVID-19?

Con el propósito de dar respuesta a la anterior pregunta, surge el presente proyecto de investigación. Con base en los datos proporcionados por la empresa E-container, se realizó el estudio correspondiente a la variabilidad del transporte de mercancías en el periodo en donde la pandemia de la COVID-19 se encontraba en auge a nivel nacional.

¿La pandemia de la COVID-19 afecto la frecuencia de las operaciones a nivel nacional?

Se identifica que en efecto esta emergencia sanitaria influyo de manera significativa, no solo en la frecuencia de operaciones sino en el uso del tipo de container. Se evidencia que la necesidad disminuir la cantidad de operaciones, esto con el fin de cumplir con las medidas tomadas por el gobierno nacional, el tamaño de container debe ser mayor para abarcar la mercancía suficiente para cubrir la demanda mercantil a nivel nacional. **(ver anexo 6.2)**

Figura 7. Resumen de las operaciones realizadas

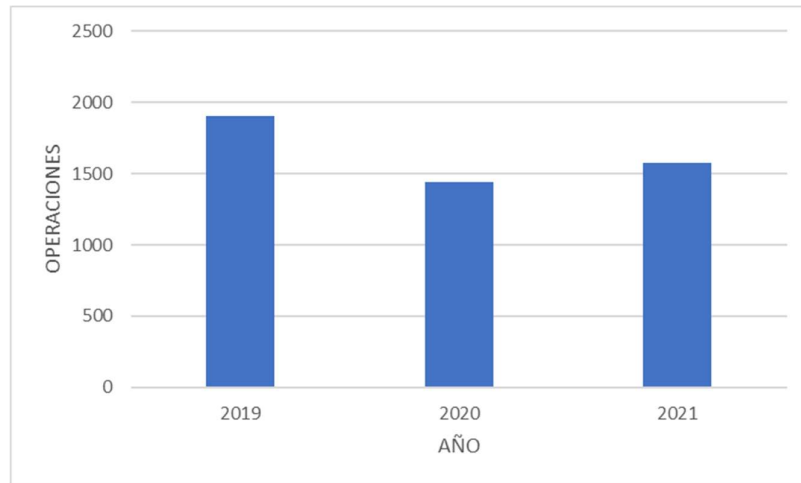
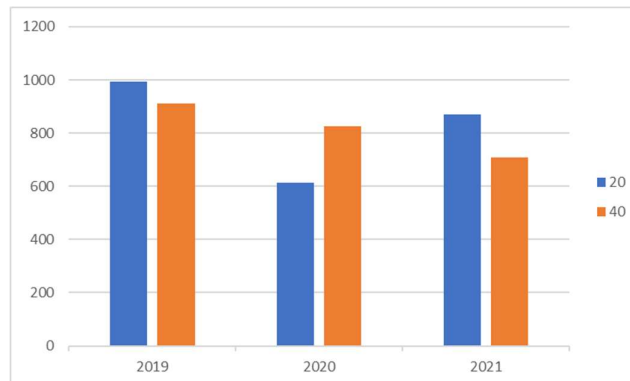


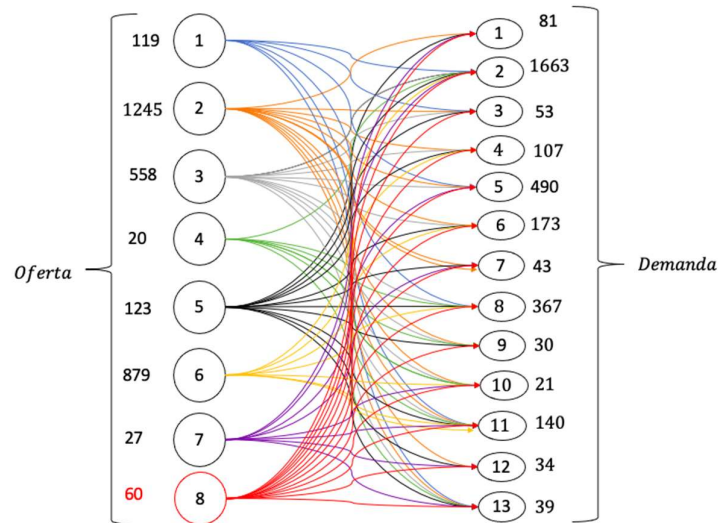
Figura 8. Tipo de contenedor



¿Con la base de datos proporcionada por la empresa E-container es posible dar solución a la pregunta base del proyecto de investigación?

A partir del análisis estadístico realizado en los datos correspondientes a las operaciones en los años 2019, 2020 y 2021 se logra establecer el modelo matemático que permite optimizar los costos en el transporte de mercancías y con ello dar respuesta favorable a la pregunta.

Figura 6. Relacionamiento entre ciudades



El modelo matemático obtenido resulta ser entonces un primer paso a la generalización del comportamiento mercantil total del transporte de mercancías a nivel nacional, lo que abre la puerta a estudios posteriores en búsqueda de una respuesta a mayor escala de la pregunta inicial.

6. Capítulo 5 - Conclusiones

5.1 Cumplimiento de objetivos y aportes a líneas de investigación de grupo

Se cumplieron cada uno de los objetivos propuestos en la formulación del presente proyecto de investigación.

5.2 Producción asociada al proyecto

Con base en el análisis de la muestra de datos proporcionada se identifica que la ciudad de Bogotá cuenta con el mayor flujo mercantil a nivel nacional. El total de operaciones registradas en los tres años estudiados presenta la menor frecuencia en el 2020, año en el que se implementaron las medidas sanitarias a causa de la pandemia del Covid-19. En contraste a la disminución en la cantidad de operaciones en el 2020 se presenta mayor uso en los contenedores de 40 FEU, lo que permite concluir que el uso de este tipo de contenedores disminuye la frecuencia de transporte y aumenta la cantidad de mercancía. Con relación a los costos se evidencia una tendencia creciente, esto asociado a la



recuperación económica a nivel mundial y a la inflación nacional presentada en los últimos.

El modelo matemático desarrollado representa de forma eficiente las rutas que la empresa en estudio desarrolla. La aplicación del software Lingo permitió identificar las mejores rutas a llevar a cabo minimizando los costos asociados al transporte de contenedores; sin embargo, la ciudad de Cartagena queda con una demanda insatisfecha de 60 unidades, siendo necesario aumentar la oferta de contenedores en una nueva ciudad que cumpla las condiciones sugeridas.

5.3 Líneas de trabajo futuras

La Tabla 4 presenta las futuras líneas de estudio identificadas en las tendencias de investigación analizadas.

Tabla 4. Futuras líneas de estudio

Perspectiva	Líneas de investigación	Referencia
Red de distribución logística y optimización	<p>La incertidumbre y los problemas de seguridad en las operaciones de transporte.</p> <p>Innovación de actividades con los actores involucrados en el transporte de contenedores.</p> <p>Problema de ruteo de vehículo con diseño de flota y agendamiento de envíos a partir de la demanda entre regiones.</p>	<p>(Liu et al., 2014)</p> <p>(Styliadis & Chlomoudis, 2021)</p> <p>(Mulder & Dekker, 2014)</p>
Planeación del transporte intermodal considerando modelos matemáticos	<p>Tiempos de transporte de acuerdo a las cargas en las redes fluviales y ferroviarias.</p> <p>Problema de reposicionamiento global desde una visión estratégica y táctica.</p> <p>Introducir un proceso de aprendizaje guiado al árbol de decisión para el traslado de mercancías.</p> <p>Análisis de sensibilidad en el diseño de la red de servicios para los costes de transferencia y la penalización por retraso en la entrega.</p> <p>Efecto de la economía de escala en el transporte ferroviario y fluvial en la asignación de flujos de contenedores intermodales.</p> <p>Considerar el número de personas y la flexibilidad de los recursos en las terminales ferroviarias de los puertos marítimos.</p>	<p>(Li et al., 2013)</p> <p>(Braekers et al., 2011)</p> <p>(van Riessen et al., 2016)</p> <p>(Li et al., 2013)</p> <p>(Li et al., 2014)</p> <p>(Xie et al., 2017)</p>
Selección modal para la optimización de rutas con enfoque en el continente Europeo	<p>Relacionamiento estadístico entre el tiempo de transporte por carretera, ferrocarril y el almacenamiento de la mercancía.</p> <p>Analizar el transporte intermodal en términos de servicio, tiempo de transporte y costes.</p> <p>Incorporar elementos de la teoría de la prospectiva al</p>	<p>(Zhang et al., 2019)</p> <p>(Macharis et al., 2010)</p>

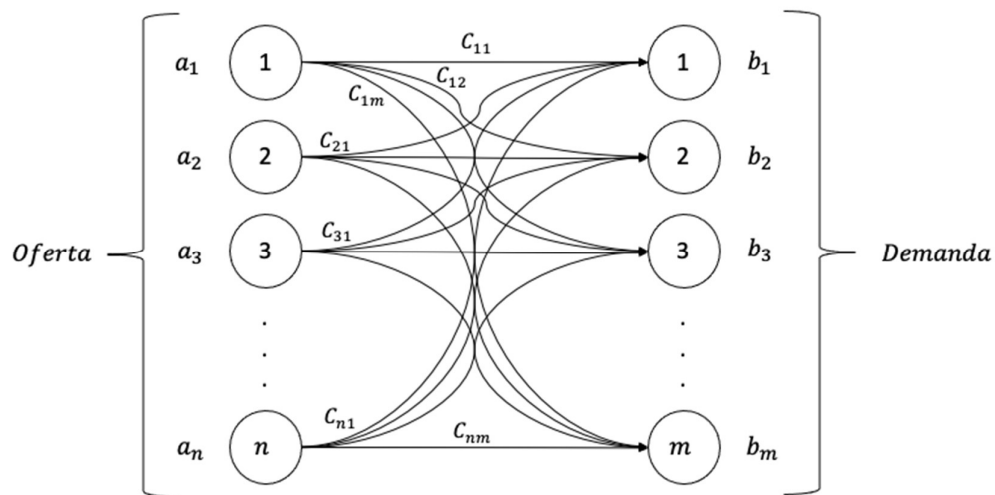
	transporte de mercancías.	(Arencibia et al, 2015)
--	---------------------------	-------------------------

Fuente: elaboración propia

6. Anexos

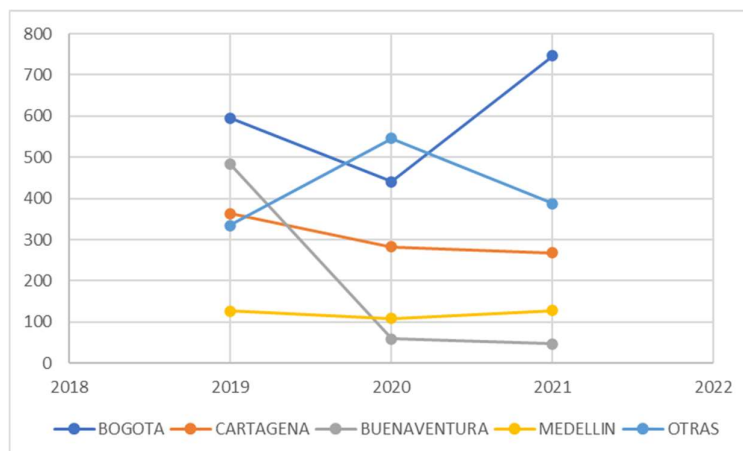
6.1 Modelo Matemático

Figura 9. Red de transporte que conecta las fuentes con los destinos,



6.2 Extensión del análisis estadístico realizado

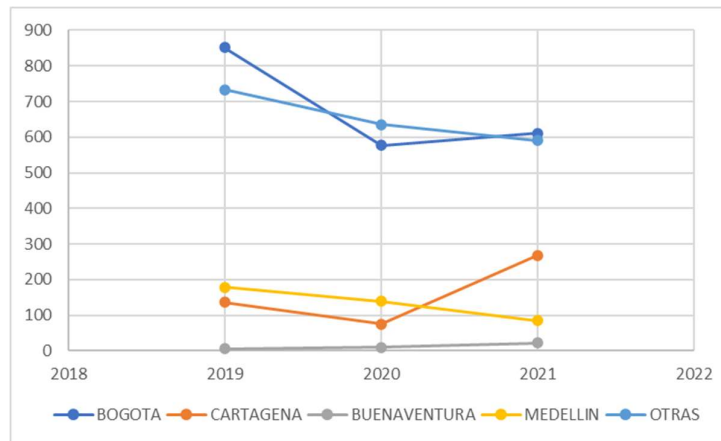
Figura 10. Ciudades de origen



En el conjunto de regiones de origen, denotado como OTRAS se encuentran Cali, Manizales, Barranquilla, distintos municipios de Cundinamarca, Antioquia, entre otros, sectores que abarcan una cantidad significativa en la totalidad de traslados realizados.

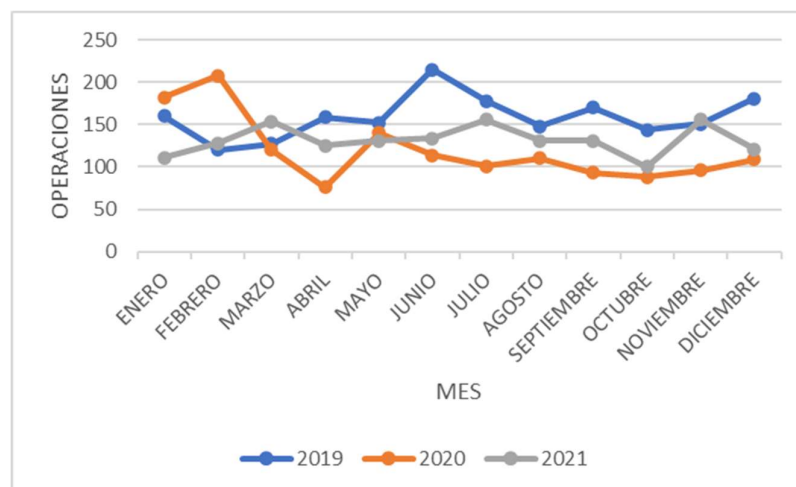
Al igual que en las regiones de origen, se hace necesario identificar el comportamiento de los lugares de destino, encabezados una vez más por la ciudad de Bogotá, la cual no solo es el centro de distribución mercantil, sino también el principal centro de consumo del país.

Figura 11. Ciudades de destino



Realizando el análisis general de las operaciones, en la Figura 12 se evidencia como en el año 2020, año en el que se encontró presente a nivel nacional la pandemia del Covid-19 hubo variación significativa en el transporte de mercancías con relación a los años 2019 y 2021. Particularmente en el mes de abril se evidencia cómo decae drásticamente la cantidad de operaciones realizadas, manteniéndose así durante el resto del año 2020 la frecuencia más baja con respecto a los años 2019 y 2021.

Figura 12. Registro de operaciones realizadas por mes.





Es de anotar que el comportamiento de la frecuencia en el transporte de mercancías del año 2020 se extiende a los primeros dos meses del 2021 y es a partir de marzo en donde se presenta un leve incremento en la cantidad de operaciones realizadas, con una variación menor a las de los demás años lo que es posible asociar a un proceso de recuperación económica y con ello en el transporte de mercancías vía terrestre.

7. Referencias

- [1] G. Falco, M. Nicola, and M. Pini, "Positioning Based on Tightly Coupled Multiple Sensors: A Practical Implementation and Experimental Assessment," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13101–13116, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2813000.
- [2] J. He, D. Chang, W. Mi, and W. Yan, "A Strategy for Yard Crane Scheduling Based on Hybrid Parallel Genetic Algorithm," in 2008 International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling, Dec. 2008, pp. 678–683. doi: 10.1109/KAM.2008.81.
- [3] Chinese Control Conference. IEEE, 2011. [Online]. Available: <https://play.google.com/store/books/details?id=gmIStAEACAAJ>
- [4] S.-C. Ting, J.-S. Wang, S.-L. Kao, and F. M. Pitty, "Categorized stacking models for import containers in port container terminals," *Maritime Economics & Logistics*, vol. 12, no. 2, pp. 162–177, Jun. 2010, doi: 10.1057/mel.2010.4.
- [5] Gerber, "cruzando fronteras: políticas nacionales y los límites de la integración internacional," *Inserción Económica Internacional de América*, [Online]. Available: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/43806.pdf#page=28>
- [6] R. K. Cheung, "Models for Cross-Border Land Transportation of Ocean Containers," *Intelligent Freight Transportation*. pp. 71–86, 2008. doi: 10.1201/9780849307744-5.
- [7] Vo, S., Stahlbock, R., & Steenken, D. (2004). Container terminal operation and operations research - a classification and literature review. In *OR Spectrum* (Vol. 26, Issue 1, pp. 3–49). <https://doi.org/10.1007/s00291-003-0157-z>.
- [8] Cheung, R. K., & Chen, C.-Y. (1998). A Two-Stage Stochastic Network Model and Solution Methods for the Dynamic Empty Container Allocation Problem. In *Transportation Science* (Vol. 32, Issue 2, pp. 142–162). <https://doi.org/10.1287/trsc.32.2.142>.
- [9] Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2007). The container shipping network design problem with empty container repositioning. In *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (Vol. 43, Issue 1, pp. 39–59). <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.05.003>.
- [10] Meng, Q., & Wang, S. (2011). Liner shipping service network design with empty container repositioning. In *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* (Vol. 47, Issue 5, pp. 695–708). <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.02.004>.
- [11] Macharis, C., & Bontekoning, Y. M. (2004). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 153, Issue 2, pp. 400–416). [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00161-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00161-9).
- [12] Choong, S. T., Cole, M. H., & Kutanoglu, E. (2002). Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 38(6), 423–438.
- [13] Crainic, T. G., Gendreau, M., & Dejax, P. (1993). Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers. In *Operations Research* (Vol. 41, Issue 1, pp. 102–126). <https://doi.org/10.1287/opre.41.1.102>.



- [14] Roso, V., Woxenius, J., & Lumsden, K. (2009). The dry port concept: connecting container seaports with the hinterland. In *Journal of Transport Geography* (Vol. 17, Issue 5, pp. 338–345). <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.10.008>.
- [15] Carlo, H. J., Vis, I. F. A., & Roodbergen, K. J. (2014). Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*.
- [16] Van Riessen, B., Negenborn, R. R., & Dekker, R. (2017). The Cargo Fare Class Mix problem for an intermodal corridor: revenue management in synchromodal container transportation. *Flexible Services and*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10696-017-9285-7>.
- [17] P. Alzate, *Investigación de operaciones. Conceptos fundamentales 2ª Edición*. Ediciones de la U, 2022. Accessed: Aug. 13, 2022. [Online]. Available: <https://edicionesdelau.com/producto/investigacion-de-operaciones-conceptos-fundamentales-2a-edicion/>.