

Modelo de Programación Entera Mixta para localizar plataformas logísticas en el corredor férreo del Atlántico en Colombia

Mixed Integer Model Programming for locate logistics platforms in the Atlantic railway on Colombia.

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.19.1.2023.06>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 03/09/2021. Fecha de Aceptación: 15/05/2021.

Julian Andrés Arango López 

Universidad de La Salle. Bogotá, D.C. (Colombia)
jarango50@unisalle.edu.co

Jair Eduardo Rocha González 

Universidad de La Salle. Bogotá, D.C. (Colombia)
jerocha@unisalle.edu.co

Carlos Andrés Páez-Sánchez 

Universidad de La Salle. Bogotá, D.C. (Colombia)
pcarlos54@unisalle.edu.co

Para citar este artículo

J. Arango López, J. Rocha González y C. Páez-Sánchez, “Modelo de Programación Entera Mixta para localizar plataformas logísticas en el corredor férreo del Atlántico en Colombia”, *INGECUC*, vol. 18, no. 2, pp. 61–70, 2023. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.19.1.2023.06>

Resumen

Introducción y Objetivo— El proyecto de investigación tiene como fin identificar una propuesta de solución al problema de ubicación de plataformas logísticas a través del corredor férreo del atlántico utilizando el modelamiento matemático Facility Location Problem (FLP) identificando como caso de solución la instalación de plataformas logísticas o hubs con el uso del método Hub Location Problem.

Metodología y Resultados— En el desarrollo de la investigación se formula un modelo matemático de programación entera mixta el cual se basa en la metodología Hub location problem, la cual busca generar la ubicación de plataformas logísticas evaluando puntos estratégicos en el corredor férreo del Atlántico y asignado estos como hubs de tal manera que con la articulación multimodal del país se minimicen los tiempos de transporte y maximizando las utilidades generadas por el transporte de carga, esto se logra siguiendo la metodología del trabajo, y articulando los diferentes modos de transporte de carga apoyando a la multimodalidad a la que el país apuesta en el Consejo nacional de Política económica y social (CONPES) 3547 para el año 2020.

Conclusiones— Por último, se presenta una comparación donde se contrasta la situación actual de transporte de carga del país con la situación propuesta implementando la estrategia del multimodalismo y así identificar cuál de las dos estrategias permite un avance en el transporte de carga del país.

Palabras clave— Plataformas logísticas; transporte de carga; multimodalismo; facility location problem; hub location problem; corredor férreo del atlántico

Abstract

Introduction and Objective— The research project aims to identify a proposed solution to the problem of location of logistics platforms through the Atlantic railway corridor using the mathematical modelling Facility Location problem (FLP) identifying as a solution case the installation of logistics platforms or hubs with the use of the Hub Location problem method.

Methodology and Results— In the development of research is formulated a mathematical model of whole mixed programming integrated in the Hub location problem methodology, which seeks to generate the location of logistics platforms by evaluating strategic points on the railroad corridor of the Atlantic and assigning these as hubs in such a way that with the multimodal articulation of the country transport times are minimized and maximizing profits generated by the freight transport, this is achieved by following the methodology of the work, and articulating the different modes of freight transport supporting the multimodality to which the country bets in the National Economic and Social Policy Council (CONPES) 3547 for the year 2020.

Conclusions— Finally, a comparison is presented where the current situation of freight transport of the country is contrasted with the proposed situation implementing the strategy of multimodalism and thus to identify which of the two strategies allows a advance in the country's freight transport.

Keywords— Logistics platforms; freight transportation; multimodality; facility location problem; hub location problem; railway of the atlantic

I. INTRODUCCIÓN

Colombia dentro de su desarrollo logístico ha estipulado en el Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) mediante el Documento Conpes 3547 del 2008 [L1], el cual ha diseñado una estrategia de modernización de infraestructura con una inversión de cerca de 3.2% del PIB con el objetivo de mejorar su desempeño logístico permitiendo a Colombia competir con países latinoamericanos y obtener una disminución en los costos logísticos los cuales se ven reflejados en el precio final del producto [1].

Según la ANIF la gran concentración de envíos de carga a través del modo vial ha generado que en términos logísticos Colombia sea un país con un bajo nivel. Colombia es un país con un alto relieve lo que hace que los trayectos sean bastante largos aumentando los costos de transporte, además de ser uno de los países de Latinoamérica con el costo de gasolina más alto del sector [1].

Teniendo en cuenta el Índice de Competitividad Global (ICG) del año 2016, Colombia se encuentra en el puesto sesenta y uno por debajo de países latinoamericanos como Ecuador, Chile y Panamá, identificando como factor principal los elevados costos promedio de un contenedor de carga los cuales al compararlos con países latinoamericanos del mismo nivel como Chile o Perú presenta una diferencia de más del 100% en costos de transporte lo que deriva una disminución en la competitividad logística del país [1].

Dentro del Plan Maestro de Transporte Multimodal (PMTI), elaborado por el Ministerio de Transporte de Colombia y el BID, se propone a través de una red de infraestructura conectar a todas las ciudades del país, aumentando la competitividad del país aprovechando al máximo todos los medios de transporte presentes en Colombia, implementando los tres objetivos: 1) impulsar el comercio, 2) reducir distancias, costos de transporte y generados, 3) además de impulsar el desarrollo regional e integrar el territorio acercando a todas los colombianos a los principales mercados [1].

Es por esto que este proyecto a desarrollar busca establecer una propuesta de macro localización de plataformas logísticas en la cercanía del corredor férreo del Atlántico, teniendo en cuenta otras investigaciones del mismo ámbito como la localización de plataformas logísticas para recuperar la navegabilidad sobre el río Magdalena aplicando técnicas como *Facility Location Problem* la cual permite hacer una ubicación estratégica de las plataformas logísticas o *Hubs* disminuyendo costos y tiempos en el transporte de carga del país.

II. REVISIÓN LITERARIA

Actualmente, Colombia cuenta con cuatro redes férreas en las cuales resaltan dos corredores, el corredor férreo del Atlántico, el cual tiene una extensión de mil cuatrocientos noventa y tres kilómetros y cubre los departamentos de Cesar, Magdalena, Santander, Boyacá, Antioquia, Cundinamarca y Caldas, haciendo de este un corredor férreo de gran importancia para la prestación del servicio de cargas del país, además de contar con 1 107 km de vía férrea reconstruidas y totalmente concesionadas por ferrovías para la prestación del servicio de carga, con una duración de la concesión de treinta años a partir del año 2000, mientras el otro corredor férreo es el del Pacífico, el cual tiene una extensión de 498 km y cubre los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda y Valle, entre los cuales se encuentra el puerto de Buenaventura en el Valle del Cauca [2].

Al realizar la respectiva revisión de literatura se pudieron encontrar diferentes investigaciones e informes los cuales apoyan el desarrollo de implementación de plataformas logísticas sobre la red férrea del país para la mejora de la competitividad del país en términos logísticos [1], [3].

En investigaciones realizadas por el LSU (USA), la KUL, el RSU (UK) [3], la AUT (IR), el MU (USA) [4], OU (USA) [5], WSU (USA) y la KUL (UK) [6] se encontraron amplias revisiones de las ubicaciones de las instalaciones identificando de manera general los diferentes modelos de localización y la Dinámica de los Problemas de Localización de las Instalaciones (FLPs), para tratar de forma eficiente los cambios de parámetros factores internos, externos y poblaciones que intervienen en la localización de instalaciones.

También se encontró en las investigaciones casos en los cuales se evidencia la aplicabilidad de la metodología *Facility Location* [4], [7], donde se abordan posibles escenarios que tienen como objetivo satisfacer la demanda con el menor costo total de transporte de un solo producto, y donde a su vez se analiza en la extensión multiproducto considerando la situación en la que N productos distintos son enviados a los clientes, sujetos a restricciones de capacidad y demanda, asociados con el problema de Weber [7]. Estudios realizados por el GSU y el BOUN de Turquía investigan la localización de una sola instalación con múltiples oportunidades de reubicación [8].

De esta manera, el objetivo de este estudio es determinar las ubicaciones óptimas de las plataformas logísticas en el corredor férreo del Atlántico (Colombia), de tal manera que, se puedan minimizar los costos totales del transporte, asimismo, los tiempos de reubicación y el costo total, para los tres tipos de medidas de distancia y varias funciones de peso por medio del algoritmo planteado [8].

Teniendo en cuenta que en el objetivo de esta investigación se identificaron dos artículos que apoyan a la investigación, el primero de estos es el desarrollado por la KUL (UK), el AUT (IR), el WSU (USA) y el TMU (IR) [9], el cual analiza los avances más recientes en torno a *Hub Location Problem (HLP)* a partir del año 2007 hasta la fecha actual, haciendo un análisis de las diferentes técnicas de solución sus restricciones y factores que pueden intervenir en la ubicación de *Hubs*. Los *hubs* o plataformas logísticas son instalaciones las cuales funcionan como puntos de consolidación, conexión, y conmutación para flujos entre los orígenes y destinos estipulados.

El segundo artículo pertinente es el planteado por la UNAL (CO) [10], presentado en el VI Congreso Internacional de Diseño e ingeniería Naval, donde se evidencia la importancia de la implementación de plataformas logísticas sobre la cuenca del río Magdalena con la utilización de *Hub location problem (HLP)* apoyando al intermodalismo aplicado a dos tipos de transporte fluvial y carretero, teniendo como objetivo de mejorar en términos logísticos la competitividad del país.

Estos casos de problema tienen en común la optimización de la ubicación de instalaciones, identificando las funciones y restricciones relacionadas con el análisis de costo y tiempo, con el objetivo de minimizar la distancia entre los diferentes puntos de la red logística, la satisfacción de la demanda y la obtención de un número adecuado de nuevas instalaciones para así poder cumplir las restricciones de generación, transferencia y demanda de carga, ya que los costos asociados al transporte de carga son dependientes de las distancias recorridas [6], [11].

Para la solución de este tipo de problemas se encuentran diferentes tipos de técnicas como las heurísticas, los algoritmos específicos y métodos generales de solución, teniendo como función objetivo la minimización de costos, distancia, tiempo y maximizar las ganancias obtenidas aumentando la efectividad y eficiencia de los recursos utilizados [6], [12].

Dentro de las técnicas mencionadas en los estudios realizados por la GSU (TR) y el BU (TR) [7], los autores hacen referencia a las condiciones necesarias para la utilización de cada uno de los modelos, ya que la aplicación y éxito de cada uno de los modelos está sujeto a las condiciones propuestas. Sin embargo, cada zona de ubicación también está sujeto a condiciones, es por esto que los autores mencionan que las condiciones presentadas por las zonas de instalación deben ser contempladas en el momento de la elección del modelo de localización de plataformas logísticas.

Teniendo en cuenta la revisión literaria se encuentra que el problema de ubicación de las instalaciones es aplicable a diferentes sectores económicos tales como industrias químicas y electrónicas, transporte, servicios médicos, atención y prevención de desastres, industria petroquímica y de telecomunicaciones, además de servicios policiales y militares, entre otros, teniendo en cuenta que la ubicación óptima de plataformas logísticas permite a cada una de las industrias disminuir los costos de transporte, siendo este uno de los factores de mayor incidencia en el precio final de sus productos.

En la Fig. 1 se identifican los diferentes problemas de estudio de ubicación de instalaciones, identificando sus características, subproblemas y sus posibles soluciones.

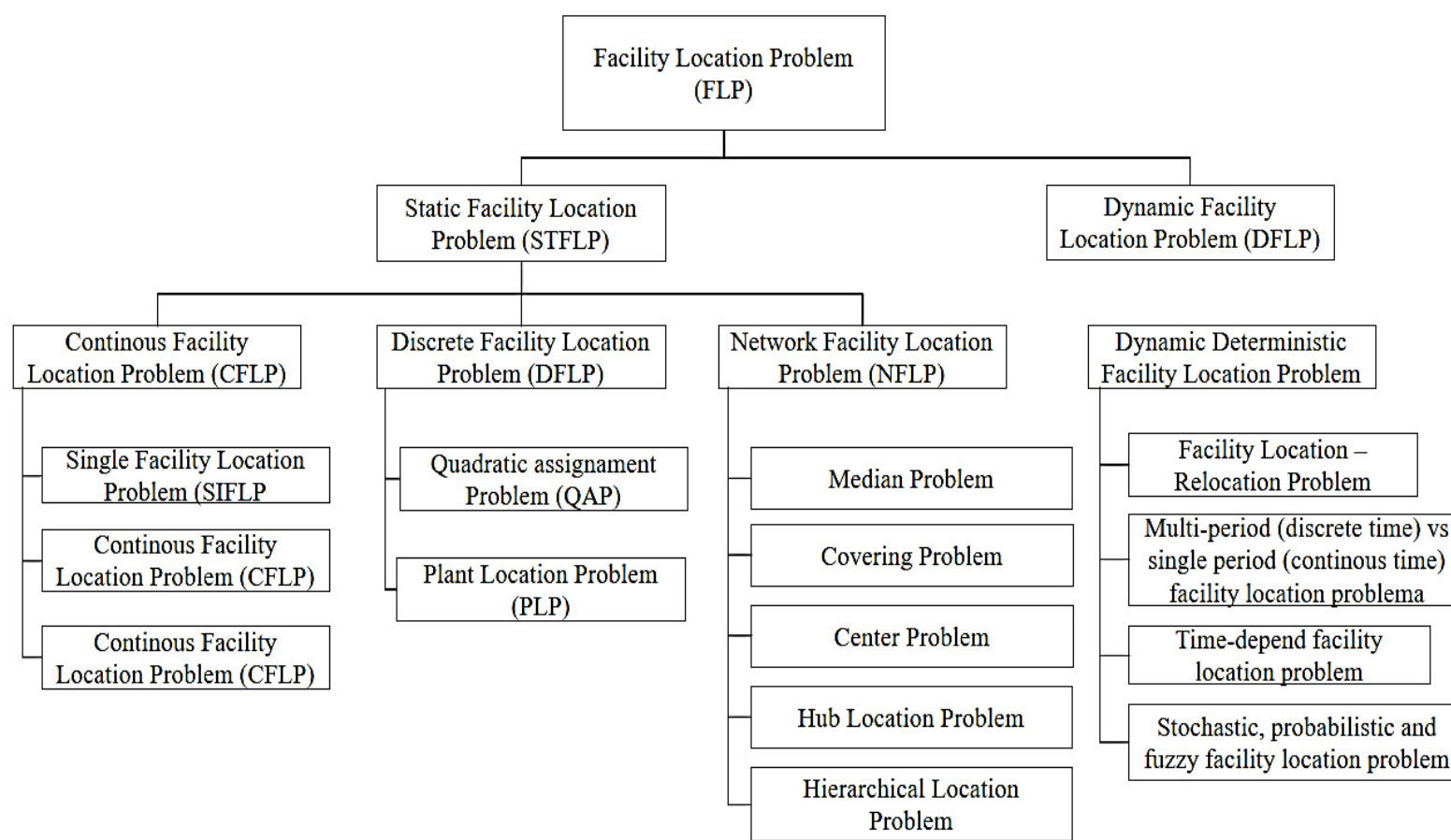


Fig. 1. Árbol de Problemas Facility Location Problem (FLP).
Fuente: [10].

III. METODOLOGIA

A. Selección del modelo a formular y estimación de parámetros

A través de una amplia revisión bibliográfica se identificó que la localización de plataformas logísticas tiene una amplia variación en sus métodos; estos métodos están agrupados en dos tipos: estáticos y dinámicos, en donde la selección del método de solución se da por cómo se ajuste a las condiciones, características o restricciones establecidas.

Para este artículo el tipo de método escogido es un método estático, ya que es el que mejor se ajusta a las condiciones, características o restricciones establecidas. Para abordar este caso se abordaran aspectos tales como, tiempo, espacio, número de instalaciones, los cuales son problemas asociados a Problemas de Localización Discreta (DFLP), Problemas de Localización en Red (NFLP) y Problemas de Localización Continua (CFLP) [13]; para el CFLP se analizaron problemas de macro localización donde el factor que tiene mayor influencia en la localización de las instalaciones es la distancia con los clientes, dando prioridad así a la cercanía entre los clientes y las plataformas a instalar [8].

El CFLP permite la ubicación de una o varias instalaciones de acuerdo con lo establecido en las condiciones iniciales del modelo teniendo en cuenta las distancias euclidianas establecidas entre cliente e instalación(es) ubicada(s) [6], las cuales deben ser minimizadas a través del modelo seleccionado y así como consecuencia minimizar los costos de transporte totales de carga de Colombia.

Para el desarrollo de este artículo se tiene en cuenta la información suministrada por el Ministerio de Transporte de Colombia a través del Registro Nacional de Carga (RNDC) [14], donde se registra el movimiento de carga de Colombia desde el año 2013 hasta la actualidad, y la información de la situación actual de las vías férreas del país.

Para este artículo el método de solución evaluado es Hub Location Problem (HLP), ya que para las condiciones del proyecto tiene el mejor ajuste para las circunstancias dadas [9]. *HLP* permite a través de un modelamiento matemático hacer una localización estática y continua de instalaciones, lo que se ajusta a la necesidad del artículo. Para establecer el modelo se identificaron tres elementos principales: Nodos generadores de carga, Nodos para plataformas logísticas y Nodos de suministro [L1].

Para la identificación de los nodos de origen a evaluar se identificaron a través de un diagrama de Pareto, donde se hace la selección de los nodos de origen que contengan el 80% de la carga generada del país hacia los puertos de Barranquilla, Santa Martha y Cartagena los cuales son identificados como los nodos destino; los departamentos elegidos como nodos de origen son Antioquia, Arauca, Bogotá, Boyacá, Caldas, Caquetá, Casanare, Cauca, Cesar, Choco, Córdoba, Cundinamarca, Guainía, Guaviare, Guajira, Huila, Meta, Nariño, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda, Santander, Sucre, Tolima, Valle del Cauca y Vichada.

Para identificar los nodos de las plataformas logísticas se realiza el modelamiento matemático por medio del método de *HLP*, el cual permite seleccionar entre Bogotá DC, Chiriguana, Belencito, La Dorada, La Vizcaína y Puerto Berrio cuales y cuantas serán las instalaciones a ubicar como centro de almacenamiento y despacho de mercaderías en el corredor férreo del atlántico, con el fin de hacer uso del multimodalismo propuesto en el CONPES 3547 [L1].

B. Modelo y supuestos

Para el desarrollo del modelo propuesto como alternativa de solución al problema descrito en la investigación fue necesario considerar los siguientes supuestos: la carga transportada fue establecida de forma general y no específica en los diferentes tipos de clasificación de ella y el movimiento de mercancía se realiza bajo la configuración de camiones tipo C3 que hace referencia a un camión de 3 ejes de acuerdo a la normativa del Ministerio de Transporte colombiano [L2].

El transporte de carga se realiza en un solo sentido de las ciudades generadoras a los puertos de la costa Atlántica, dado que se requiere la mejora en los costos de desplazamiento para hacer los productos exportados competitivos frente a los elaborados por otros países.

No se contempla la operación de carga y descarga entre los diferentes nodos; la carga que ingresa a las plataformas logísticas es igual a la que sale de ellas; las plataformas logísticas intermedias tienen una capacidad limitada.

El costo de operación se considera para un total de cinco años, entre 2013 y 2018, periodo para el cual es posible calcular los costos de operación del transporte de carga en el país, de acuerdo con el RNDC, a través de la herramienta del Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga del Ministerio de Transporte [L1]; esto como forma de comparar los resultados de la propuesta y el desempeño histórico de estas operaciones logísticas en el país.

A continuación, el modelo realizado para dar solución a la problemática presentada muestra la estructura en detalle descrita de la siguiente manera:

1) Objetivo

Determinar la ubicación de las instalaciones intermedias o plataformas logísticas tipo j que permitan el intercambio modal en el transporte de carga entre los generadores de carga tipo i y los puertos de destino en el caribe tipo k con mínimo costo de gestión.

2) Función objetivo

Costo total mínimo de transporte de carga entre los generadores de carga, las plataformas logísticas y los puertos de destino.

3) Variables de decisión

CF = Costo total de transporte y operación del sistema logístico.

X_{ij} = Cantidad de carga a transportar entre el departamento de origen tipo i y la plataforma logística tipo j [Ton/5años].

Y_{jk} = Cantidad de carga a transportar entre la plataforma tipo j y el departamento o puerto de destino tipo k [Ton/5 años].

Z_j = Decisión de apertura y puesta en funcionamiento de la plataforma logística tipo j , con variable de activación 1: si la plataforma j entra en funcionamiento; 0: en otro caso.

4) Parámetros

- $CPT1_{ij}$ = Costo de transporte por tonelada de carga entre los departamentos de origen tipo i y la posible ubicación de la plataforma logística dado en j [\$/ton].
- $CPT2_{jk}$ = Costo de transporte por tonelada de carga entre las posibles plataformas logísticas tipo j y los departamentos o puertos de destino tipo k [\$/ton].
- COP_j = Costo de operación por 5 años en la plataforma logística tipo j [\$/5 años].
- $CAAP_j$ = Capacidad de almacenamiento en las plataformas logísticas tipo j [Ton/5 años].
- CGT_i = Cantidad de carga generada en el departamento de origen tipo i [Ton/5años].
- CMP_k = Cantidad de carga a manejar en el departamento destino tipo k [Ton/5años].
- N = Número máximo de plataformas logísticas a instalar.

Teniendo en cuenta las variables y parámetros es posible formular un modelo de programación entera mixta como se evidencia a continuación. Sujeto a:

$$\begin{aligned} \text{Min } CF = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} CPT1_{ij} \times X_{ij} & (1) \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} CPT2_{jk} \times Y_{jk} + \sum_{j \in J} COP_j \times Z_j \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} \leq CAAP_j \times Z_j; \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \geq CGT_i; \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} - \sum_{k \in K} Y_{jk} = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} Y_{jk} \geq CMP_k; \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} Z_j \leq N \quad (6)$$

$$Z_j \in [0,1] \quad (7)$$

$$X_{ij} \geq 0; (i \in I; j \in J) \quad (8)$$

$$Y_{jk} \geq 0; (j \in J; k \in K) \quad (9)$$

La ecuación (1) hace referencia a una ecuación de costo total de la gestión de movilización de carga, la cual estima el costo de transporte de la carga proyectada entre los nodos de origen, intermedios y destino, así como los costos de operación de los puntos intermedios.

La ecuación (2) es una expresión matemática que representa la capacidad máxima de almacenamiento disponible en las posibles plataformas logísticas a localizar.

La ecuación (3) es una expresión matemática que establece la generación de carga del nodo de origen tipo i , que requiere ser transportada a través de las plataformas logísticas tipo j posible de instalar.

La ecuación (4) es una expresión que relaciona que la carga que ingresa a la plataforma logística tipo j a instalar sea enviada en su totalidad a los puertos de destino tipo k garantizando la ausencia de almacenaje en las plataformas logísticas.

La ecuación (5) es una expresión de manejo de carga por los puertos en los cuales se fija como cota mínima la carga que se genera en los generadores de carga distribuidos en el país.

La ecuación (6) es una expresión matemática que limita el número de instalaciones intermedias a instalar a un número finito y conocido que puede ser planteado de acuerdo con las políticas nacionales de desarrollo de infraestructura logística.

La ecuación (7) presenta la naturaleza de la variable entera de apertura de cada una de las plataformas logísticas, limitándola a un comportamiento binario, con valores de 0 o 1.

Por último, la ecuación (8) y ecuación (9) representan las ecuaciones de no-negatividad, permitiendo así tomar a las variables y estimar la cantidad de carga a transportar entre los diferentes elementos de la cadena logística del modelo.

IV. RESULTADOS

El modelo planteado se resuelve a través de GAMS® (v. 23.9.1) utilizando el algoritmo CPLEX [15], con un procedimiento que limita el número de instalaciones intermedias a instalar a un número de uno e incrementando en una más hasta incluir el total de municipios intermedios posibles con el cual fue posible determinar el total de plataformas a instalar al menor costo de transporte posible.

Para ello, la selección de municipios intermedios corresponde a cinco (5) puntos posibles ubicados en el corredor férreo del Atlántico, identificados históricamente como paradas en el corredor férreo del Atlántico, siendo estas: Bogotá DC (BOG), Chiriguaná (CES), La Dorada (CAL), Belencito (BOY), La Vizcaína (SAN) y Puerto Berrio (ANT).

Como resultado de este proceso, se encontró que, con un número de tres (3) plataformas logísticas, el modelo cumple con las restricciones de transporte del total de carga generada, flujo de carga en las plataformas y direccionamiento a los lugares de destino con el mínimo costo de transporte; estas instalaciones intermedias de acuerdo a los resultados obtenidos pueden ser ubicadas en los municipios de Bogotá DC, Chiriguaná (CES), y La Dorada (CAL), tal como se espera de la implementación de un modelo *Hub Location Problem*.

Luego, estas tres (3) plataformas logísticas si se hubiesen ubicado en los municipios de Bogotá DC, La Dorada y Chiriguana podrían haber manejado una carga esperada de 59 560 507 Tn, 61 285 621 Tn y 25 505 155 Tn respectivamente de acuerdo con la información base recopilada entre los años 2013 y 2018 (Tabla 1).

En este aspecto, la red de transporte terrestre de carga por camión muestra que los once (11) departamentos ubicados en el sur y oriente del país tendrían conexión con la plataforma logística ubicada en Bogotá DC, mientras los departamentos centrales como Antioquia, Santander, Choco y del eje cafetero conducen su carga a la plataforma logística de La Dorada, Caldas, mientras los departamentos del norte del país tendrán comunicación con la plataforma logística a ubicar en Chiriguana, Cesar.

En términos de los mayores emisores de carga para cada una de las plataformas logísticas, en Chiriguaná, Cesar, la región que mayor generación y envío de carga hacia esta locación es el departamento de Norte de Santander con 72.82%. Para el caso de La Dorada, Caldas, el departamento que mayor cantidad de carga envía es el departamento de Antioquia, con el 79.61% de la carga que recibe el *hub* ubicado en esta ciudad, mientras en la plataforma logística de Bogotá DC, será esta misma ciudad con un 43.15%.

Una vez se conocen las ubicaciones de las plataformas logísticas se procede a determinar los flujos de carga desde las plataformas tipo j a los departamentos de Origen tipo k , como se presenta en la Tabla 2. Esta distribución cumple con los supuestos de satisfacer todas las demandas de los puertos destino.

El departamento que recibe la mayor cantidad de carga es el departamento de Magdalena, en especial la ciudad de Santa Marta, que recibe un total de 85 065 662 Tn, siendo el *Hub* ubicado en Bogotá el que mayor generación de carga hace a este puerto, aportando 59 560 507 Tn, que equivalen al 70.0% de la carga recibida.

Por otra parte, los puertos ubicados en Atlántico y Bolívar reciben su carga principalmente del *Hub* ubicado en La Dorada. Este *hub* genera como carga 61 285 621 Tn, siendo el departamento destino del Atlántico, con 34 319 948 Tn, equivalentes al 56%, el mayor receptor de la carga enviada por el *Hub* ubicado en La Dorada.

TABLA 1.
CARGA MOVILIZADA ENTRE LOS NODOS ORIGEN Y LAS PLATAFORMAS LOGÍSTICAS SELECCIONADAS EN TONELADAS (Tn).

	Bogotá	La Dorada	Chiriguana
Antioquia	0	48 789 652	0
Arauca	85 789	0	0
Bogotá	25 702.415	0	0
Boyacá	1 154.547	1 054 879	0
Caldas	0	3 459 687	0
Caquetá	57 489	0	0
Casanare	796 324	0	0
Cauca	6 987 456	0	0
Cesar	0	0	5 231 685
Choco	0	37 548	0
Huila	4 789 652	0	0
Guajira	0	0	1 698 574
Meta	8 254 781	0	0
Nariño	2 369 857	0	0
N Santander	0	0	18 574 896
Putumayo	107 458	0	0
Quindío	0	1 158 974	0
Risaralda	0	5 236 985	0
Santander	0	1 547 896	0
Valle del Cauca	9 254 739	0	0

Fuente: Autores.

TABLA 2.
CARGA ENVIADA DE LAS PLATAFORMAS LOGÍSTICAS A LOS PUERTOS DESTINO EN TONELADAS (Tn).

	ATL	BOL	MAG
BOG			59 560 507
DOR	34 319 948	26 965 673	
CHI			25 505 155

Fuente: Autores.

En términos de costo total de la gestión, si se hubiese instalado las plataformas logísticas propuestas con el uso mixto de sistemas de transporte por carretera y ferrocarril para el transporte de carga entre los nodos de generación de carga, las plataformas logísticas y los puertos de destino serian de COP \$50 055 120 billones durante los cinco años de demanda analizados.

De esta manera, y comparado con el pago realizado en la situación actual de envío de carga de transporte entre los generadores de carga y los puertos de destino sin tener plataformas logísticas de COP \$62 701 957 billones por conceptos de transporte de carga se obtiene con una reducción del costo de transporte del 20.16%, el cual puede ser dedicado a la instalación de estas plataformas de forma inicial, tal como se muestra en la [Fig. 2](#).

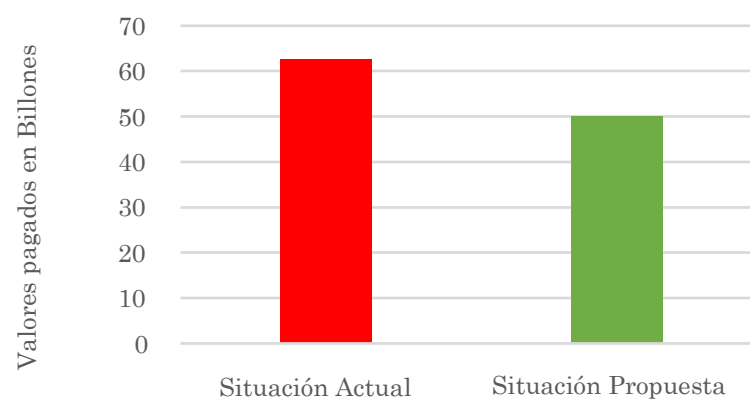


Fig. 2. Comparación valores pagados en el transporte de carga por medio carretero vs transporte de carga intermodal modo carretero-ferroviario.
Fuente: Autores.

De acuerdo con lo evidenciado en el estudio durante los últimos cinco años el transporte de carga ha sido un problema en términos logísticos para Colombia, asimismo, diferentes estudios realizados evidencian el bajo nivel logístico Colombia, esto como consecuencia a la manera en que se ha realizado el transporte de carga en el país.

El estudio permitió analizar como el único medio de transporte de carga utilizado ha sido el modo de transporte en camiones por carretera el cual presenta diferentes inconvenientes, como la topografía del país, que de acuerdo con algunos estudios presentan cambios, y el consumo de combustible, aspecto que tiene impacto en los precios finales al consumidor de los productos.

En la Fig. 2 se puede observar que en la propuesta generada para la utilización de un modelo mixto en los medios de transporte de carga del país hay una reducción de COP 12 646 837 140 663 lo que equivale a una reducción significativa entre la situación actual y la situación propuesta.

V. CONCLUSIONES

Colombia es un país que cuenta con un alto relieve el cual hace el transporte de carga por vía terrestre ineficiente y de altos costos los cuales se ven reflejados en los consumidores finales del producto, haciendo necesario la implementación de un nuevo sistema de transporte para el país el cual apoye al sistema logístico intermodal que tiene como principal objetivo la unificación de los diferentes medios de transporte de carga.

El 80% del transporte de carga movilizado en el país con destino a los puertos sobre el Caribe se realiza desde nueve de los treinta y dos departamentos, donde el principal departamento de origen de carga es el departamento de Antioquia, con el 33.33%, seguido de Bogotá DC con el 17.56%, Norte de Santander con el 12.69%, Valle del Cauca con el 6.32% y Santander con el 4.34%.

Con la implementación de la localización de las plataformas logísticas propuestas en la investigación y la utilización del transporte intermodal entre carreteras y ferrocarril habría una disminución de COP \$12 646 837 140 663 en el costo de transporte, lo que corresponde a una disminución del 20.16% a los costos actuales del transporte por el modo carretero.

Las ubicaciones óptimas de las plataformas logísticas utilizando el modelo *Hub* corresponden a las ciudades de Bogotá DC, La Dorada y Chiriguaná, teniendo en cuenta que estas ciudades cuentan con estaciones férreas del corredor ferroviario del Atlántico.

La integración de un sistema logístico intermodal y la implementación de plataformas logísticas permiten mejorar los costos del transporte de carga en el país influyendo posiblemente de manera positiva en la competitividad logística y el desarrollo de este.

FINANCIAMIENTO

El artículo es resultado de la línea de investigación en optimización de procesos productivos y servicios del semillero de investigación en manejo de procesos, recursos y operaciones —IMAPRO— así como del grupo de investigación GIII avalados y financiados por la Universidad de La Salle, entre agosto de 2018 y diciembre de 2019 [7].

REFERENCIAS

- [1] S. Clavijo, A. Vera, D. Malagón, Á. Parga, S. Joya, M. C. Ortiz y L. Ordoñez, *Costos de Transporte, Multimodalismo y la competitividad de Colombia*, BO, CO: ANIF, 2014. Disponible en <https://www.anif.com.co/libros/costos-de-transporte-multimodalismo-y-la-competitividad-de-colombia/>
- [2] MinTransporte, *Transporte férreo y redes férreas*. BO, CO: MinTransporte, 2016.
- [3] R. Farahani, S. Fallah, R. Ruiz, S. Hosseini & N. Asgari, “OR models in urban service facility location: A critical review of applications and future developments,” *Eur J Oper Res*, vol. 1, no. 276, pp. 1–27, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.036>
- [4] A. Ahmadi-Javid, P. Seyedi & S. Syam, “A survey of healthcare facility location,” *Comput Oper Res*, vol. 79, pp. 223–263, Mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.05.018>
- [5] T. Hale & C. Moberg, “Location Science Research: A Review,” *Ann Oper Res*, vol. 123, no. 1-4, pp. 21–35, Oct. 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1026110926707>
- [6] A. Arabani & R. Zanjirani, “Facility location dynamics: An overview of classifications and applications,” *Comput Ind Eng*, vol. 65, no. 1, pp. 408–420, Feb. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018>
- [7] M. Akyüz, T. Ocan & I. Altinel, “The multi-commodity capacitated multi-facility Weber Problem: Heuristics and confidence intervals,” *IIE Trans*, vol. 42, no. 11, pp. 825–841, Mar. 2009. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2010.491504>
- [8] R. Farahani, Z. Drezner & N. Asgari, “Single Facility Location and Relocation problem with time-dependent weights and discrete planning horizon,” *Ann Oper Res*, vol. 167, pp. 353–368, Mar. 2009. <https://doi.org/10.1007/s10479-008-0338-x>
- [9] R. Farahani, M. Hekmatfar, A. Arabani & E. Nikbakhsh, “Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications,” *Comput Ind Eng*, vol. 64, no. 4, pp. 1096–1109, Feb. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.01.012>
- [10] R. Arevalo, R. Santofimio, J. Rocha & W. Adarme, “Logistic platform placement for harmonious development of the nation’s intermodal network,” *SHIP Sci Technol*, vol. 12, no. 23, pp. 81-90, Mar. 2018. <https://doi.org/10.25043/19098642.173>
- [11] S. Alumur, J. Campbell, I. Contreras, B. Kara, V. Marianov & M. O’Kelly, “Perspectives on modeling hub location problems,” *Eur J Oper Res*, vol. 291, no. 1, pp. 1–17, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.039>
- [12] A. Alibeyg, I. Contreras & E. Fernández, “Exact solution of hub network design problems with profits,” *Eur J Oper Res*, vol. 266, no. 1, pp. 57–71, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.024>
- [13] R. Farahani & M. Hekmatfar, Eds. *Facility Location Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. HDB, DE: Verlag, 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2>
- [14] MinTransporte, “Registro Nacional de Despachos de Carga por Carretera - RNDC”. Jun 16, 2011. *Gov.co*. Disponible en: https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/305/registro_nacional_de_despachos_de_carga_por_carretera_rndc/
- [15] GAMS, (v. 23.9.1), GAMS Software GmbH. Disponible en <https://www.gams.com/download/>
- [L1] *CONPES 3547*, del 27 de Octubre de 2008, Política Nacional Logística. DNP. Recuperado de <https://www.mincit.gov.co/mincomercioexterior/temas-de-interes/modulo-vuce-%E2%80%93inspeccion-simultanea/documento-conpes-3547-de-2008.aspx>
- [L2] *Resolucion 4100*, del 28 de diciembre de 2004, por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional. Mintransporte. Disponible en <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15600&dt=S>

Julian Andrés Arango López. Universidad de La Salle (Bogotá, D.C., Colombia). <https://orcid.org/0000-0002-1616-1082>

Jair Eduardo Rocha González. Universidad de La Salle (Bogotá, D.C., Colombia). <https://orcid.org/0000-0003-4636-5462>

Carlos Andrés Páez-Sánchez. Universidad de La Salle (Bogotá, D.C., Colombia). <https://orcid.org/0000-0001-8531-8605>