

CARLOS CHAVES. 2025. Modelación matemática y optimización de operaciones en sistemas de transporte por cable, revisión de literatura. Análisis de caso para la ciudad de Pasto. Revista Sigma, 21 (2). Páginas 71–80.

REVISTA SIGMA

Departamento de Matemáticas y Estadística

Volumen XXI N° 2 (2025), páginas 71–80

Universidad de Nariño

Modelación matemática y optimización de operaciones en sistemas de transporte por cable, revisión de literatura. Análisis de caso para la ciudad de Pasto

Carlos Fernando Chaves López¹

Abstract: This article reviews the literature with a view to understanding how operations research and mathematical modeling have been used in the design, planning, and operation of logistics and transportation systems. It addresses important elements such as the geographical and topographical characteristics of the city of Pasto, model formulation, logistics platform analysis, strategic node location, vehicle routing, and resource allocation, framed within methodologies consolidated by entities such as the National Planning Department (DNP). All of this is done with the aim of establishing the conceptual and methodological foundations that will allow this knowledge to be applied to the feasibility analysis of a cable transport system for the city of Pasto.

Keywords. Mathematical modeling, optimization, cable transport, logistics, Pasto

Resumen: El presente artículo realiza una revisión de literatura orientada a comprender cómo la I.O. y la modelación matemática han sido utilizadas en el diseño, planificación y operación de sistemas logísticos y de transporte. Se abordan elementos importantes como las características geográficas y topográfica de la ciudad de Pasto, la formulación de modelos, el análisis de plataformas logísticas, la localización de nodos estratégicos, el ruteo de vehículos y la asignación de recursos, enmarcados en metodologías consolidadas por entidades como el Departamento Nacional de Planeación (DNP). Todo ello, con el propósito de establecer las bases conceptuales y metodológicas que permitan aplicar este conocimiento al análisis de factibilidad de un sistema de transporte por cable para la ciudad de Pasto.

Palabras Clave. Modelación matemática, optimización, transporte por cable, logística, Pasto

¹Magíster en Pedagogía de la Universidad Mariana. Docente, Departamento de Matemáticas, Universidad de Nariño. Correo: cfchaves1@gmail.com.

1. Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento acelerado de los centros urbanos, junto con los desafíos de movilidad y sostenibilidad, ha impulsado la búsqueda de soluciones de transporte más eficientes e innovadoras. Dentro de este panorama, los sistemas de transporte por cable han emergido como una alternativa viable, especialmente en ciudades con topografías complejas como es el caso de la ciudad de Pasto - Nariño. En este contexto, la modelación matemática y la optimización de operaciones se constituyen en herramientas fundamentales para garantizar la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad de dichos sistemas.

El presente artículo realiza una revisión de literatura orientada a comprender cómo la I.O. y la modelación matemática han sido utilizadas en el diseño, planificación y operación de sistemas logísticos y de transporte. Se abordan elementos importantes como las características geográficas y topográfica de la ciudad de Pasto, la formulación de modelos, el análisis de plataformas logísticas, la localización de nodos estratégicos, el ruteo de vehículos y la asignación de recursos, enmarcados en metodologías consolidadas por entidades como el Departamento Nacional de Planeación (DNP). Todo ello, con el propósito de establecer las bases conceptuales y metodológicas que permitan aplicar este conocimiento al análisis de factibilidad de un sistema de transporte por cable para la ciudad de Pasto.

2. Condiciones geográficas y topográficas de San Juan de Pasto

San Juan de Pasto, capital del departamento de Nariño, se sitúa en el suroccidente colombiano, en plena cordillera de los Andes, lo que determina una configuración geográfica particularmente compleja, por cuanto la ciudad se encuentra en el Valle de Atriz (Alcaldía de Pasto, 2020), una depresión interandina rodeada por elevaciones que generan una topografía irregular; este relieve combina terrenos planos con zonas montañosas que inciden directamente en la planificación territorial, así como en la conectividad y accesibilidad urbana.

En este sentido, cabe resaltar la presencia del volcán Galeras, cuya altitud alcanza los 4.276 metros sobre el nivel del mar, este macizo volcánico, además de constituir un símbolo natural y cultural para los pastusos, impone restricciones urbanas derivadas de su actividad geológica permanente, a su alrededor se hallan otras elevaciones notables como el cerro Bordoncillo, Morasurco, Patascoy, Campanero, Pan de Azúcar, entre otras (Alcaldía de Pasto, 2020); la distribución de estas formaciones, sumada a los cauces hídricos y las fallas tectónicas presentes, fragmenta el territorio y complica la expansión ordenada del sistema vial, especialmente hacia las zonas periféricas.

Como consecuencia de lo anterior, diversos sectores de la ciudad presentan limitaciones de acceso, particularmente aquellos ubicados en laderas o terrazas naturales, situación que repercute en los tiempos de desplazamiento, la prestación de servicios públicos y la integración de la población al sistema urbano. No en vano, varios estudios en el ámbito de la movilidad han evidenciado una correlación directa entre la ubicación topográfica de los barrios y los niveles de exclusión social de sus habitantes.

Frente a esta realidad, se hace indispensable considerar soluciones de transporte innovadoras que se ajusten a las características físicas del territorio; en este contexto, el uso de sistemas de transporte por cable se presenta como una alternativa altamente viable, que, no requiere grandes intervenciones sobre el terreno y permite conectar puntos de difícil acceso de manera

eficiente, rápida y sostenible. Además, su implementación puede integrarse dentro de una estrategia de movilidad intermodal, articulándose con otros sistemas como el transporte colectivo urbano o las ciclovías.

Ante ello, la modelación matemática resulta importante, pues permite simular trayectorias, identificar puntos nodales óptimos y optimizar recursos, que, dada la complejidad geográfica de Pasto debe asumirse como una oportunidad para repensar la movilidad desde una mirada adaptada al territorio, a sus condiciones topográficas, haciendo posible proyectar soluciones de transporte por cable que respondan a las necesidades reales de la población, contribuyendo así a una ciudad más conectada, incluyente y resiliente.

3. Investigación de operaciones I.O.

El inicio de la investigación de operaciones se atribuye a ciertos servicios militares que se prestaron al inicio de la Segunda Guerra Mundial, porque existía la urgente necesidad de asignar recursos escasos a las maniobras y actividades para llevar a cabo las operaciones de manera eficaz, al finalizar la guerra el éxito de la I.O. en las actividades bélicas generó gran interés debido a las posibilidades de aplicarla en un ámbito distinto al militar (Hillier & Lieberman, 2010). En la actualidad, la I.O., por su objetivo de encontrar una mejor solución, llamada “solución óptima” para el problema que se está estudiando, pues es posible que existan muchas soluciones que se consideren como las mejores, ha sido aplicada en áreas como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, fuerzas armadas y servicios públicos entre otras.

De acuerdo con Hillier y Lieberman (2010), el proceso contiene los siguientes pasos:

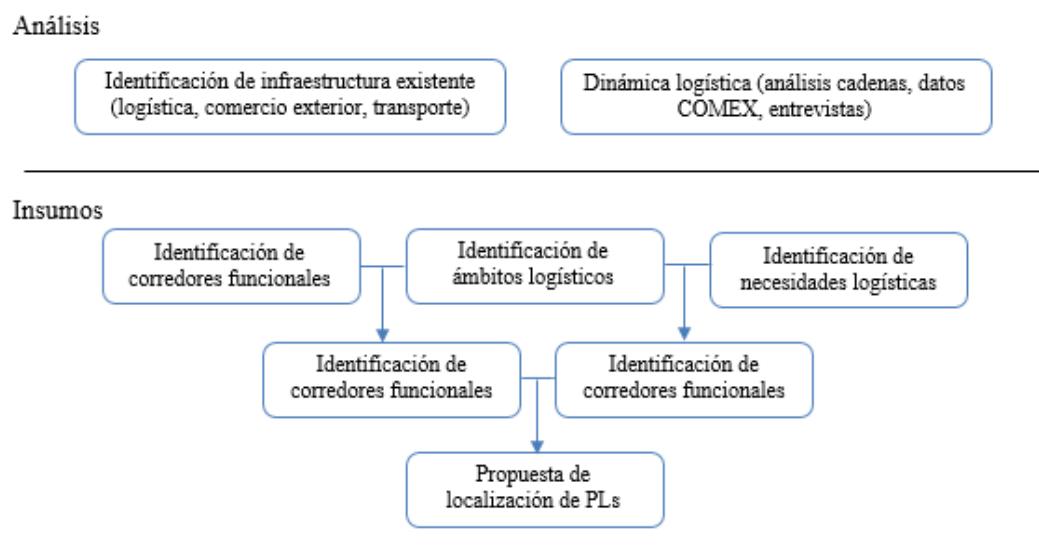
- a Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes, aquí se definen los objetivos, el alcance, las interrelaciones del área en estudio, los cursos de acción posibles, límites de tiempo para tomar una decisión. entre otros. Este proceso es crucial porque tiene significativa relevancia en las conclusiones del estudio.
- b Formulación de un modelo matemático que represente el problema: consiste en reformular el problema mediante la construcción de un modelo matemático que represente la esencia del problema, para ello, se definen las variables de decisión con los valores respectivos, seguidamente se define la función objetivo, las restricciones y los parámetros.
- c Desarrollo de un procedimiento basado en computadora para derivar una solución para el problema a partir del modelo: consiste en la aplicación de uno de los dos algoritmos (procedimientos iterativos de solución) de investigación de operaciones mediante el uso de los paquetes de software disponibles.
- d Prueba del modelo y mejoramiento de acuerdo con las necesidades: para tratar de encontrar y corregir tantas fallas como sea posible, esto es, realizar la validación del modelo.
- e Preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración: consiste en instalar un sistema bien documentado para aplicarlo según lo establecido, con el respectivo procedimiento de solución y procedimientos operativos para su implantación.
- f Implementación: en este paso se cosecharán los beneficios del estudio.

4. Análisis de plataformas logísticas

Las plataformas logísticas son puntos o áreas de rupturas de las cadenas de transporte y logística en los que se concentran actividades y funciones técnicas de valor añadido, incorporan un conjunto de instalaciones, recursos humanos y materiales, sistemas de información y de gestión necesarios para llevar adelante las operaciones de la cadena de suministro o logística (Departamento Nacional de Planeación, 2010)

Ampliando lo expuesto, el Departamento Nacional de Planeación DNP, presenta los lineamientos a seguir para la selección óptima de la localización macro y micro de la plataforma logística en el territorio como se presenta en la figura que prosigue; esta metodología fue definida por la firma ALG para el Gobierno Nacional. Prosiguiendo, para un estudio ade-

Figura 1: *Esquema de la metodología para la selección de la macrolocalización y microlocalización óptima*



Fuente: Elaboración propia, con base en DNP (2010). *Estudios de localización, diseño y factibilidad de una plataforma logística en Colombia. Manual para la inserción en el territorio de plataformas logísticas.*

cuando, se requiere un análisis previo a un doble nivel, así mismo es importante elaborar un diagnóstico de la infraestructura existente y en proyecto; lo cual permitirá comprender la situación actual y asentar un marco de referencia; con ello, se elabora una caracterización de las infraestructuras de transporte carretero, férreo, marítimo y aéreo. Posteriormente se elabora el análisis bajo los siguientes criterios (DNP, 2010):

- Disponibilidad de infraestructura de transporte, en términos de capacidad, funcionalidad y calidad.
- Existencia de un mercado, que demande los servicios.
- Disponibilidad de mano de obra para la operación de la plataforma.
- Presencia de oferta de servicios logísticos, involucrando los nodos de producción y consumo.

- Compatibilidad del desarrollo de una infraestructura logística con los instrumentos de planeación y normatividad existentes a nivel urbanístico y ambiental.
- Identificación de necesidades logísticas que permitan definir la orientación funcional de los nodos candidatos.

De este modo, llevar a cabo el análisis de identificación de los tipos de estructura logística, permite mejorar la eficiencia de las cadenas, definiendo así la orientación funcional de las plataformas y las macro localizaciones candidatas de estas, considerando que, en algunos casos, más de una opción puede mejorar la situación actual, por lo que en ocasiones se puede considerar más de una solución por cadena.

5. Ruteo y asignación

Son las actividades indispensables en las operaciones logísticas y de transporte, su diseño responde a la incertidumbre de la demanda de los usuarios y/o clientes, cuando ocurren deficiencias en su elaboración, pueden presentarse algunos inconvenientes, como afirman Bakarcic y Di Piazza (2012), “El problema de ruteo de vehículos consiste en distribuir un conjunto de tareas entre un conjunto de vehículos disponibles, así, maximizar ganancias o minimizar costos de operación” (p. 1). Entre estas tareas están: transportar pasajeros a lo largo de un segmento entre dos estaciones, llevar una carga de mercadería de un depósito a otro, entre otras.

Además, cuando se debe resolver un problema de ruteo de vehículos, surge también la necesidad de asignar conductores a cada una de las tareas que llevaran a cabo los vehículos. Este problema se conoce en la literatura como el problema de asignación de conductores (Bakarcic & Di Piazza, 2012). Por su parte, respecto a los problemas de ruteo vehicular, Bustos y Jiménez (2014), proponen el uso de técnicas metaheurísticas para resolver problemas de ruteo que no generan soluciones óptimas, pero que tienen la particularidad de resolver problemas de gran complejidad de una manera sencilla y suficientemente buenas con tiempos razonables de cómputo como: la búsqueda tabú, algoritmos genéticos, colonia de hormigas, algoritmo de memoria adaptativa, algoritmo genético híbrido, búsqueda de vecindades, algoritmo de ramificación y valor, estrategia de guía auto adaptativa, heurística multifase y heurística basada en ahorros, recocido simulado, y otros más.

Estas técnicas han sido utilizadas, unas más que otras, para construir el software de ruteo. Lo importante, en este sentido, es que un software puede ser diseñado para generar soluciones de ruteo para satisfacer varios criterios al mismo tiempo, por ejemplo, el costo de transportación y el nivel de satisfacción de los clientes.

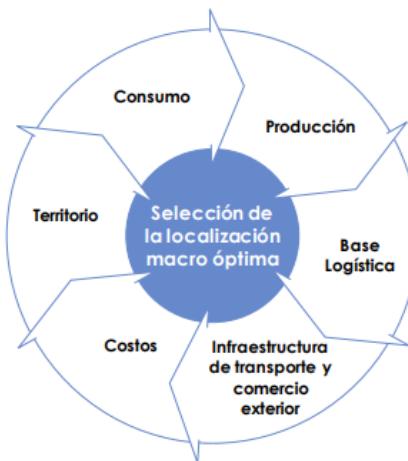
6. Puntos nodales

Un punto nodal de transporte, se entiende como un sistema de conectividad por nudos y líneas de recogida y distribución de la carga, con la necesidad de operaciones de transbordo, transporte multimodal y servicio puerta a puerta (Herrera & Fontalvo, 2000). Con base en esta definición y teniendo en cuenta el análisis de plataformas logísticas y el esquema presentado en la figura 1, se pueden establecer los nodos candidatos macro, que se evalúan para posteriormente seleccionar el nodo macro óptimo. Según el DNP (2010), en este nivel

de estudio, la localización de una plataforma logística se establece con base a diferentes criterios multidisciplinares que se estructuran en torno a ejes de análisis.

Para comprender lo dicho, a modo de ejemplo se ha tomado el objetivo del Gobierno, frente a la Política Nacional Logística contenida en el Conpes 3547 de 2008 (Departamento Nacional de Planeación, 2008). Para este tipo de análisis y frente a este contexto, la estructura para la evaluación se plantea bajo los siguientes seis aspectos fundamentales (ver figura 2).

Figura 2: *Ejes de análisis para la evaluación y selección de la macro localización óptima*



Fuente: DNP (2010).*Estudios de localización, diseño y factibilidad de una plataforma logística en Colombia. Manual para la inserción en el territorio de plataformas logísticas.*

Así, para cada uno de los ejes de análisis se define un conjunto de objetivos a alcanzar por parte de los diferentes nodos propuestos, lo que permitirá determinar cuál de las opciones presenta un mayor nivel de cumplimiento global de los objetivos.

- Objetivos eje 1, Consumo: Maximización del potencial de atención al mercado de consumo y oportunidades de atención a consumo de productos con logística de valor agregado.
- Objetivos eje 2, Producción: Maximizar el potencial de atención al sector industrial y oportunidades de atención a la industria de productos con logística de valor agregado.
- Objetivos eje 3, Base logística: Reconocimiento de la actividad logística existente y respuesta a la demanda del sector en términos del servicio logístico.
- Objetivos eje 4, Infraestructura de transporte y comercio exterior: Presencia de infraestructura del transporte y presencia de infraestructura de comercio exterior.
- Objetivos eje 5, Costos: Reducción de costos de instalación y reducción de costos de operación.
- Objetivos eje 6, Territorio: Contribución a la logística nacional de comercio exterior, contribución a la logística regional de comercio exterior e impacto positivo sobre el desarrollo social.

La valoración de los objetivos por alternativa de análisis se concreta en el cálculo de una serie de indicadores específicamente seleccionados, que permiten medir el nivel de cumplimiento

de cada uno de los objetivos planteados y a partir de dicha valoración se realiza un análisis comparado y se procede a la selección del macro nodo que presenta el mejor comportamiento respecto los ejes definidos. (Departamento Nacional de Planeación, 2010)

Ahora, según el DNP (2010), la metodología para la microlocalización sigue las mismas líneas anteriormente explicadas para la microlocalización, de este modo, el análisis se realiza según una evaluación de cada una de las localizaciones posibles, y tiene como objetivo ubicar la plataforma en una zona estratégica en términos logísticos, con el objetivo de maximizar la eficiencia y competitividad logística de la zona, la selección de la localización micro óptima se efectúa en base a la evaluación de cada una de las ubicaciones en relación a los ejes de análisis de acuerdo a unos objetivos asociados que son valorados en indicadores. La figura 3 que se expone enseguida, presenta gráficamente los factores a considerar en la selección de la localización micro.

Figura 3: Factores para la evaluación de alternativas de localización



Fuente: DNP (2010) *Estudios de localización, diseño y factibilidad de una plataforma logística en Colombia. Manual para la inserción en el territorio de plataformas logísticas.*

A este análisis macro, respecto a cada uno de los ejes se les ha asociado una serie de objetivos básicos que debe cumplir, para que la evaluación comparada con los demás factores candidatos permita determinar cuál de ellas se encuentra más alineada con éstos. (Departamento Nacional de Planeación, 2010)

- Objetivo eje 1, Accesibilidad: Conexión con los principales ejes de la red arterial de la infraestructura de transporte.
- Objetivo eje 2, Logística: optimización de la logística.
- Objetivo eje 3, Intermodalidad: Capacidad de acceso al ferrocarril y modo fluvial.
- Objetivo eje 4, Inversión: Minimización del costo de la inversión.
- Objetivo eje 5, Medio ambiente: maximización del costo de la inversión.
- Objetivo eje 6, Medio social y urbano: Maximización del impacto positivo de la plataforma en el municipio.

Finalmente, es importante precisar que los ejes definidos responden a una priorización realizada para el objetivo del Gobierno Nacional, es por ello que, cada proyecto de plataformas logísticas debe contemplar los ejes que mejor reflejan sus objetivos, y como el resultado que se espera se ubica en el centro de la evaluación de los ejes.

7. Modelo MoSCoW

Según Kukhnavets (Kukhnavets, 2018), este método ofrece una solución rápida y fácil para problemas de priorización de criterios para desarrollo de modelos estratégicos de transporte, es por ello que MoSCoW se adapta a proyectos internos; considerando dentro de las herramientas para la priorización, los servicios inteligentes diseñados para equipos de productos grandes y pequeños, los cuales facilitan la planificación, programación, análisis de sus tareas y ayudan a priorizar tareas de forma rápida y sencilla. (Kukhnavets, 2018)

Tabla 1: *Modelo MoSCoW aplicado al proyecto de diseño de transporte por cable para la ciudad de Pasto*

Mo Debe	S Debería
Transportar cantidad óptima de personas. Mejorar el rendimiento del transporte de personas. Fijar el costo de tiquete viable para el pago de los usuarios y que cubra los costos y gastos de funcionamiento y administración. Determinar las rutas más cercanas para que el tiempo y la distancia sean eficientes. Gestionar con eficacia la implementación. Diseñar estrategias de funcionamiento a largo plazo.	Brindar solución de transporte de personas, frente a restricciones de capacidad (número de personas, peso total de ellas en cada cabina). Contemplar y estudiar restricciones referentes a la demanda. Estimar tiempo de circulación de pasajeros entre cabinas. Optimizar la red de transporte y fomentar el cambio modal.
Co Podría	W Lo haría
Contemplar rubros respecto a energía, lubricantes, filtros, mantenimiento, salarios y prestaciones, estaciones de servicio, gastos administrativos, impuestos, seguros, limpieza y repuestos. Gestionar la integración del proyecto, el alcance del proyecto, así como también el tiempo, calidad, recursos humanos, riesgos y adquisiciones del proyecto.	Determinar los costos de operación del modelo. Estimar costo de tiquete. Determinar consumo de combustible por cabina. Calcular consumo de combustible del sistema.

Mediante el modelo MoSCoW y como se observa en la tabla que antecede, se presentan aspectos que debe contemplar el modelo de diseño de transporte por cable para la ciudad de Pasto como transportar cantidad óptima de personas, mejorar el rendimiento del transporte de personas, fijar el costo de tiquete viable para el pago de los usuarios y que cubra los costos y gastos de funcionamiento y administración., determinar las rutas más cercanas para que el tiempo y la distancia sean eficientes, gestionar con eficacia la implementación y diseñar estrategias de funcionamiento a largo plazo basado en aspectos como lo que se debe, debería, podría y se haría.

8. Conclusiones

La investigación de operaciones ofrece un enfoque sistemático y estructurado para abordar problemas complejos de transporte y logística, aportando herramientas matemáticas y computacionales que facilitan la toma de decisiones óptimas.

La planificación de plataformas logísticas requiere un análisis multinivel (macro y micro) y multidimensional (económico, social, ambiental), sustentado en criterios técnicos que permiten identificar localizaciones estratégicas con base en indicadores cuantificables.

El ruteo de vehículos y la asignación de recursos humanos constituyen actividades críticas dentro de las operaciones logísticas, donde, su adecuada formulación e implementación influyen directamente en la eficiencia operativa y en la satisfacción de los usuarios.

Las técnicas metaheurísticas se posicionan como una alternativa efectiva para resolver problemas complejos de ruteo que no pueden ser abordados mediante métodos exactos, gracias a su capacidad de generar soluciones suficientemente buenas en tiempos razonables de cómputo.

Los sistemas de transporte por cable, como los propuestos para ciudades como Pasto, se benefician notablemente del uso de herramientas de I.O., para diseñar operaciones óptimas, seleccionar rutas adecuadas y maximizar el impacto social y económico del proyecto.

Referencias

- [1] Alcaldía de Pasto. (2020). Información general Pasto, Nariño. *Alcaldía de Pasto.gov.co*. Obtenido de <https://www.pasto.gov.co/index.php/nuestro-municipio/informacion-general>
- [2] Bakarcic, D., & Di Piazza, G. (2012). Ruteo de vehículos y asignación de conductores: un enfoque combinado. *Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de <https://gestion.dc.uba.ar/media/academic/grade/thesis/bakarcic.pdf>
- [3] Bustos, A., & Jimenez, E. (2014). Modelos para un mejor ruteo vehicular. *RevistasÉnfasis: Logística*. Obtenido de <http://www.logisticamx.enfasis.com/articulos/69225-modelos-un-mejor-ruteo-vehicular>
- [4] Departamento Nacional de Planeación. (2008). CONPES 3547. *Dirrección de desarrollo digital*. Obtenido de https://www.dnp.gov.co/LaEntidad/_subdireccion-general-prospectiva-desarrollo-nacional/direccion-desarrollo-digital/Paginas/documentos-conpes-economia-y-transformacion-digital.aspx
- [5] Departamento Nacional de Planeación. (2010). Estudios de localización, diseño y factibilidad de una plataforma logística en Colombia. Manual para la inserción en el territorio de plataformas logísticas. *DNP*. Obtenido de <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/Documents/2010070120MA>
- [6] Herrera, R., & Fontalvo, T. (2000). Seis Sigma Métodos estadísticos y sus aplicaciones. *Universidad Tecnológica de Uruguay*. Obtenido de https://d1wqxtsixzle7.cloudfront.net/54023689/Six_Sigma_-_Metodo_Estadistico-libre.pdf
- [7] Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. México: McGraw Hill.

-
- [8] Kukhnavets, P. (28 de enero de 2018). ¿Cómo elegir la mejor técnica de priorización? *Hygger.* Obtenido de <https://hygger.io/blog/how-to-choose-the-best-prioritization-technique/>