



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE QUÍMICA

“OPTIMIZACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE TERRESTRE DE UNA
EMPRESA LÁCTEA EN CIUDAD DE MÉXICO, CON EL USO DE
TECNOLOGÍAS DE LA INDUSTRIA 4.0.”

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN ADMINISTRACIÓN INDUSTRIAL

PRESENTA:
NANCY DONAJÍ SÁNCHEZ GARCÍA

TUTOR:
I.Q. FRANCISCO JERÓNIMO NIETO COLÍN
FACULTAD DE QUÍMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

I.Q. Francisco Jerónimo Nieto Colín	Presidente
M.A.I. Alejandro García Vera	Secretario
M.A.I. Jenifer Nayelli Castro Duplan	Vocal
M.A.I. Isabel Chávez Hernández	Vocal
M. en A. Ernesto Fernández Morales	Vocal

AGRADECIMIENTOS

Mi más profundo agradecimiento y cariño a la *Universidad Nacional Autónoma de México* quien, además de ser mi segunda casa, me ha brindado las mejores experiencias académicas.

Agradezco eternamente a *mi mamá Donají y mi papá Enrique* por todo el amor que siempre me han dado, sin duda son lo mejor que me ha pasado en la vida.

Agradezco inmensamente a *mi hermana Carmen* por su compañía desde el primer día de nuestra vida y por todos los momentos juntas.

Agradezco infinitamente a *mi compañero de vida Carlos* por todo su amor y apoyo incondicional, por siempre creer en mí e impulsarme en este camino.

Agradezco al *Dr. Cacho* por alentarme, motivarme y apoyarme con determinación en cada paso de mis proyectos de vida.

Agradezco a *Itzel y César* por escucharme siempre y por su amistad, que espero se conserve hasta el final de los tiempos.

Agradezco enormemente a la *Facultad de Química* por la maravillosa oportunidad de estudiar la Maestría en Administración Industrial (MAI), enriquecer mis conocimientos y acercarme a mis anhelos profesionales.

Agradezco a *mis sinodales* por su apoyo, compromiso, tiempo y disposición: Francisco Nieto, Alejandro García, Jenifer Castro, Isabel Chávez y Ernesto Fernández.

Un especial agradecimiento a *mi tutor el Ing. Francisco Nieto* por su gran apoyo desde el primer día de la MAI, sus comentarios tan valiosos, disposición, dedicación de tiempo y por compartirme sus experiencias de vida.

Agradezco al *Maestro Alejandro García* por su valioso apoyo a lo largo de la maestría, su disposición y ejemplar calidad humana.

Agradezco a la *Maestra Jenifer Castro* por su compromiso, tiempo, oportunos comentarios y retroalimentación.

Agradezco a la *Maestra Isabel Chávez* por su tiempo, disposición, amabilidad y calidez humana.

Agradezco al *Maestro Ernesto Fernández* quien, gracias a su clase de Administración de la Cadena de Suministro, me inspiró a desarrollar esta investigación. Gracias por sus enriquecedores comentarios y enorme experiencia en el tema.

Agradezco al *Maestro Alejandro Zanelli* por ampliar mi perspectiva e inspirarme en mi plan de vida y carrera.

Doy gracias a *todos mis profesores de la MAI* por compartirme sus experiencias y conocimientos, indudablemente este posgrado no sería igual sin ellos.

Agradezco a *Vianey, Karla y Erick* por su amistad y lindos momentos a lo largo de la maestría, espero que nuestra amistad perdure siempre.

Finalmente, anhelo profundamente que este trabajo motive a las empresas a utilizar tecnologías de la Industria 4.0 para optimizar sus rutas de transporte terrestre.

A mi mamá Donají y mi papá Enrique,

A mi hermana Carmen,

A mi compañero de vida Carlos,

Y a ti, lector.

El hombre que mueve montañas comienza cargando pequeñas piedras.

Confucio

ÍNDICE

Resumen	9
Introducción	11
Antecedentes y planteamiento del problema	11
Justificación	13
Objetivos	13
Pregunta de investigación	13
Hipótesis.....	14
Alcance.....	14
Metodología.....	14
CAPÍTULO 1. Marco teórico	16
1.1. Contexto de la industria láctea.....	16
1.2. Cadena de suministro.....	18
1.3. Transporte	26
1.4. Transformación digital, competitividad y logística 4.0.	30
CAPÍTULO 2. Tecnología del transporte y optimización de rutas	35
2.1. Sistemas Inteligentes de Transporte y sus beneficios.....	35
2.2. Optimización de rutas de transporte	38
2.3. Métricas para el transporte	39
2.4. Casos de éxito de empresas proveedoras de Sistemas de Información Geográfica	42
2.5. Casos de éxito de empresas de paquetería, logística y tecnología.....	43
CAPÍTULO 3. Implementación de un Sistema de Información Geográfica	45
3.1. Quantum-GIS	45
3.2. Métodos de optimización de rutas de transporte.....	46
3.3. Obtención de datos.....	50
3.4. Metodología de la implementación de un GIS.....	53
CAPÍTULO 4. Resultados y análisis de resultados.....	56
4.1. Modelo base	56
4.2. Modelo segmentado	57
4.3. Modelo de un solo viaje	60
4.4. Comparación de los resultados de cada modelo	62
4.5. Beneficios y factibilidad de QGIS y el modelo propuesto	64

Conclusiones	66
Recomendaciones	68
Anexo	69
Lista de figuras, gráficas y mapas.....	71
Lista de tablas.....	72
Referencias	73

Resumen

El suministro de productos lácteos es primordial para hacer posible su consumo ya que, por sus propiedades nutricionales, son esenciales en la alimentación humana. Además, son alimentos perecederos, es decir, que tienen una duración corta y algunos requieren refrigeración, por lo que el transporte juega un papel determinante para una entrega eficiente y puesto que en éste se encuentra inmerso el mayor porcentaje del costo logístico resulta crucial optimizarlo, lo que se puede lograr con tecnologías de vanguardia.

Por lo anterior el objetivo general del presente trabajo fue generar rutas óptimas de transporte de una empresa del sector lácteo en Ciudad de México utilizando tecnologías de la industria 4.0, lo cual se llevó a cabo con herramientas gratuitas como los Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), específicamente Quantum-GIS (QGIS), ya que juegan un papel trascendental para la transformación digital y brindan mayor competitividad dado al rezago tecnológico que actualmente se vive en México.

Cabe señalar que la bodega de la empresa del caso de estudio se localiza en la alcaldía Iztapalapa y distribuye sus productos a 57 tiendas de una cadena mexicana de supermercados de la CDMX. Para generar las rutas, los datos fueron recabados del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) y del OpenStreetMap (OSM, por sus siglas en inglés). Además, en QGIS se usaron dos métodos de optimización: A* y el problema del viajante (TSP, por sus siglas en inglés), de manera que se aplicaron a tres situaciones diferentes con las que se minimizó el tiempo y la distancia: modelo base, modelo de un solo viaje y modelo segmentado, siendo el mínimo por mejorar, el teóricamente ideal y el propuesto para la presente investigación, respectivamente.

Con el modelo propuesto se logró superar al modelo base y obtener resultados aproximados al modelo de un solo viaje. Considerando el tiempo y la distancia en conjunto, con este modelo se obtuvieron las rutas más rápidas y las más cortas, también, se incorporaron tres rutas diferentes para reducir la complejidad, ahorrar recursos y aumentar la capacidad de carga, representando algunos de los beneficios que proporciona, por lo tanto, se concluye que es el más apropiado para alcanzar resultados óptimos y su uso es factible.

Introducción

Antecedentes y planteamiento del problema

Los productos lácteos son esenciales en la alimentación humana debido a sus propiedades nutricionales, por lo que su elaboración ocupa un lugar importante en la industria de alimentos. En México, el sector lácteo representa el tercer lugar del valor de la producción primaria (SIAP, 2019), lo que equivale al 10% del PIB alimentario (INEGI, 2020b), está valuado en 320 mil millones de pesos y genera 600 mil empleos directos y más de un millón de empleos indirectos (CANILEC, 2020).

Asimismo, el suministro de estos productos es primordial para hacer posible su consumo y porque son alimentos perecederos, para lo cual el transporte juega un papel determinante dada la variedad que existe en el mercado y el volumen que se demanda de cada uno de ellos. Cabe destacar que, dentro de todos los modos de transporte, el carretero es el que más se utiliza en México (CANACAR, 2021). Además, el transporte suele ser la variable que impacta más en el costo logístico de una empresa (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018), por lo que mejorar su eficiencia y eficacia es fundamental. Dado lo anterior, es conveniente aprovechar las nuevas tecnologías incorporadas en la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0.

Los efectos de dicha revolución han generado en la sociedad cambios importantes que se ven reflejados en la interacción de las personas, las empresas y todos los sectores económicos (Schwab, 2016). Las empresas han tenido que evolucionar y ser parte activa de este cambio tecnológico y del proceso de globalización, en particular estos dos elementos impulsan y demandan que éstas se mantengan constantemente innovando y mejorando en su cadena de suministro, la cual no es ajena al fenómeno de la Industria 4.0 pues se ha visto impulsada en sus diferentes eslabones, entre ellos en el de logística (CEPAL, 2020).

Dentro de la logística se ha encontrado un área de oportunidad en la administración del transporte, específicamente en las rutas de traslado, con el empleo de Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), ya que impacta en toda la organización y genera ventajas competitivas¹. Evidencia de este hecho lo han mostrado resultados en empresas de tecnología, logística y transporte como Uber, DHL, FedEx, entre otras, que han obtenido beneficios como: incremento de la productividad y rentabilidad (ESRI, 2010); reducción de errores, costos y consecuentemente ahorro de tiempo (Faiz & Krichen, 2013); maximización del valor agregado para el cliente respondiendo efectivamente a sus necesidades (Uber Engineering, 2015); etc.

No obstante, y de acuerdo con el Instituto para el Desarrollo Gerencial (IMD, por sus siglas en inglés), México se encuentra en los últimos lugares del *ranking* de competitividad digital (IMD, 2021) y la actual pandemia ocasionada por el SARS-CoV-2 es un factor de amenaza, razón por la que la implantación de los GIS es un área emergente en varias entidades de logística, sin embargo, en ciertos casos, no se considera como un elemento trascendental para fines estratégicos. Por consiguiente, es relevante lograr que las compañías tomen conciencia del efecto que tiene emplear tecnologías de la industria 4.0 y darles a conocer herramientas disponibles y viables para que puedan tomar mejores decisiones y actuar con una visión más sostenible, motivo por el que se deriva el presente estudio que busca resolver problemas de ruteo con GIS y obtener beneficios en la optimización de recursos.

¹ Se originan en la habilidad para satisfacer las necesidades de los clientes más eficaz o eficientemente que la competencia (Thompson, y otros, 2018).

Justificación

Dado al rezago tecnológico que actualmente se vive en México surge la necesidad de impulsar la productividad de una empresa del sector lácteo cuyos productos son perecederos, variados y de demanda diaria, por lo tanto, se busca mostrar la factibilidad de alternativas gratuitas que pueden ayudar a solucionar problemas de ruteo, como los GIS, ya que juegan un papel trascendental para la transformación digital y brindan mayor competitividad.

Objetivos

- Objetivo general

Optimizar las rutas de transporte terrestre de una empresa láctea en Ciudad de México utilizando tecnologías de la industria 4.0.

- Objetivos específicos

- Identificar las tecnologías aplicadas en la industria 4.0.
- Definir la importancia del transporte terrestre en las organizaciones del sector industrial.
- Minimizar el tiempo y la distancia de tránsito del transporte terrestre.
- Determinar los beneficios y la factibilidad de la aplicación de un GIS gratuito para optimizar rutas en el transporte terrestre.

Pregunta de investigación

¿El uso de tecnologías de la Industria 4.0, en específico GIS, en la administración del transporte terrestre permitirá la creación de rutas de traslado óptimas para una empresa láctea en Ciudad de México?

Hipótesis

El empleo de un GIS permite generar rutas de traslado óptimas en una empresa láctea en Ciudad de México si se considera este sistema en la administración del transporte terrestre.

Alcance

El presente estudio pretende demostrar, mediante una revisión bibliográfica y métodos de aprendizaje de máquina², que el uso de tecnologías de la Industria 4.0 en el transporte terrestre es determinante para encontrar rutas óptimas de traslado, y que una herramienta para alcanzarlo es por medio de GIS. Asimismo, busca especificar los beneficios asociados a esta propuesta y determinar su viabilidad como mecanismo para propiciar ventajas competitivas en las empresas y predominen en el mercado.

Metodología

De acuerdo con los objetivos expuestos anteriormente se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. Mediante el análisis de diversas fuentes de información se definió la importancia del transporte terrestre en las organizaciones y se identificaron las tecnologías derivadas de la industria 4.0.
2. Se examinaron casos de éxito de empresas que han optimizado sus rutas de transporte y las herramientas que han empleado para llevarlo a cabo.

² Métodos de análisis de datos, identificación de patrones y toma de decisiones con mínima intervención humana (Katz, Dougall, de Urquiza, & Fish, 2017).

3. Con un caso de estudio de una empresa del sector lácteo, se implementaron métodos de optimización de rutas a través de tecnologías gratuitas de la industria 4.0, particularmente GIS.
4. Dado lo anterior y, finalmente, se identificaron los beneficios y la factibilidad de usar un Sistema de Información Geográfica, específicamente Quantum-GIS (QGIS), para generar rutas óptimas de traslado.

CAPÍTULO 1. Marco teórico

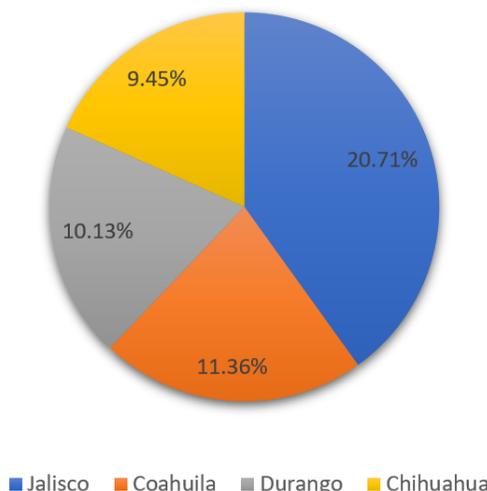
1.1. Contexto de la industria láctea

Producción de leche en México y el mundo

En el 2019, la producción mundial de leche abarcó 81% de leche de vaca, 15.1% de leche de búfala y un total de 3.8% de leche de cabra, oveja y camello (FAOSTAT, 2021). Para ese mismo año, la producción mundial de leche de bovino alcanzó 715,922,506 ton. La Unión Europea (UE-28) produjo la mayor cantidad de leche con una participación del 23.5%, seguido de Estados Unidos de América, India, Brasil y China, con 13.8%, 12.6%, 5.0% y 4.5%, respectivamente (FAOSTAT, 2021). India y China son los principales impulsores de la producción lechera debido a su mayor tasa de natalidad.

La producción de leche en México representa la tercera actividad pecuaria en importancia por la generación de valor, solo detrás de la producción de carne de bovino y de carne de pollo, con una participación de 17% (SIAP, 2019), la cual fue de 12,275,865 ton en el 2019 (FAOSTAT, 2021), prácticamente 2 de cada 100 litros en el mundo son de origen mexicano. Jalisco, Coahuila, Durango, Chihuahua y Guanajuato aportan más del 50% de la producción nacional (SIAP, 2020).

Gráfica 1. Producción nacional de la leche de bovino



Fuente: Elaboración propia con datos de (SIAP, 2020).

Mercado de leche en México

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) “El consumo per cápita de leche y productos lácteos es mayor en los países desarrollados y su demanda está creciendo como consecuencia del aumento de los ingresos, el crecimiento demográfico, la urbanización y los cambios en los regímenes alimentarios”.

El consumo de leche en México se mide sumando la producción interna y las importaciones lácteas y restando las exportaciones (CANILEC, 2021a) y, por otro lado, el consumo nacional per cápita de leche se calcula dividiendo el consumo nacional entre la población total, el cual por día se ubicó en 345 mL en 2019 y obedece a patrones de índole histórico, cultural y económico. Históricamente el consumo ha estado por debajo del recomendado por la FAO (500 mL diarios), en el aspecto cultural hay personas que erróneamente creen que la leche no es apta para consumo humano y, finalmente en el factor económico influyen los ingresos y precios, además de que el consumidor requiere un producto funcional, práctico y nutritivo que le proporcione grandes beneficios (CANILEC, 2021b).

Históricamente, el saldo de la balanza comercial de productos lácteos ha sido deficitaria, por lo que se complementa con la importación de leche descremada en polvo, sin embargo, tras un crecimiento en las importaciones promedio de 8.2% durante 2015-19, en 2020 las importaciones de México cayeron en un 17%, ya que la recesión económica relacionada con la pandemia del SARS-CoV-2 provocó la pérdida de puestos de trabajo y un menor poder adquisitivo (USDA, 2020) (FAO, 2021); mientras tanto, aumentó a nivel nacional la producción de leche para satisfacer la demanda interna de la industria y los consumidores.

Durante una década hubo una continuada caída en el consumo de leche, sin embargo, en el 2020 el consumo aumentó gracias a las compras de pánico, principalmente de leche ultrapasteurizada (UHT), por el confinamiento, pero

también con ajustes en hábitos de consumo al estar preparando y consumiendo los alimentos en casa, con una mayor orientación hacia una alimentación saludable (CANILEC, 2021b).

En el 2020 el consumo nacional de leche fluida fue de 4,200,000 ton (USDA, 2020) y la elaboración de productos lácteos representó el cuarto lugar en el PIB de la industria alimentaria, con el 10% (INEGI, 2020b). De acuerdo con la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM), se elaboró y envasó 3,838,121 ton, de los cuales el 35% correspondió a leche pasteurizada y el 65% a la leche UHT (INEGI, 2020a).

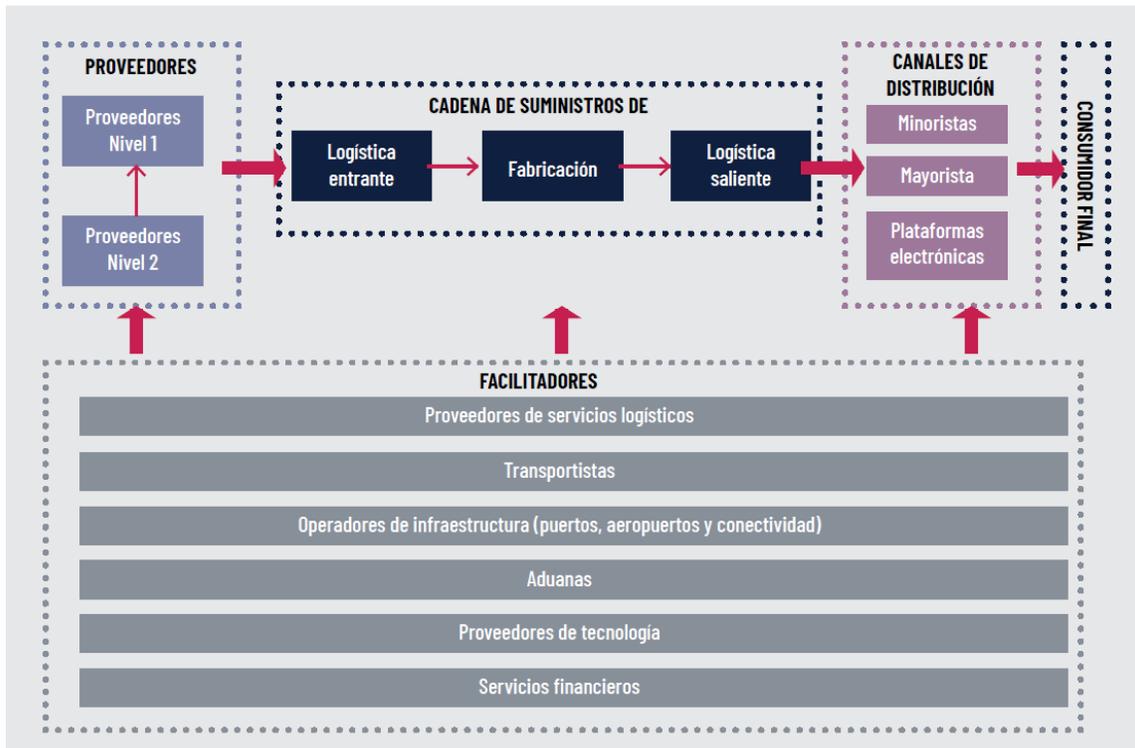
1.2. Cadena de suministro

Una cadena de suministro es el conjunto de actividades que se llevan a cabo para satisfacer la demanda del cliente. Su desempeño depende de proveedores de insumos, empresas manufactureras, canales de comercialización y facilitadores del flujo de productos e información, quienes abarcan diferentes áreas como el desarrollo de nuevos productos, la mercadotecnia, las operaciones, la distribución, las finanzas y el servicio al cliente (Calatayud, Agustina; Katz, Raúl, 2019).

Cabe resaltar que el objetivo de una cadena de suministro es maximizar el valor total generado o su rentabilidad total, la cual es la diferencia entre lo que vale el producto y/o servicio final para el cliente y los costos en que la cadena incurre para cumplir la petición de éste, por lo que se busca satisfacer al cliente al mínimo costo total³ (Chopra & Meindl, 2013).

³ El costo total de una cadena de suministro hace referencia a la suma de todos los costos asociados con mover, poseer, almacenar, administrar, comprar, manufacturar, distribuir y financiar las materias primas, el inventario en proceso, el producto terminado y las cuentas por cobrar en los que incurre una empresa en el transcurso del proceso de satisfacción del cliente, y es la diferencia entre los ingresos generados por el cliente (ventas netas) y la rentabilidad de la cadena de suministro (utilidad después de impuestos) (Chopra & Meindl, 2013).

Figura 1. Participantes en una cadena de suministro

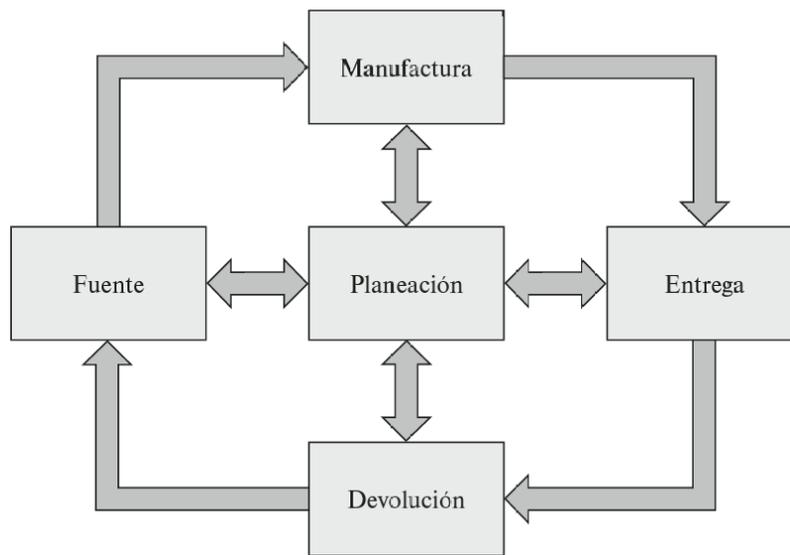


Fuente: (Calatayud, Agustina; Katz, Raúl, 2019).

Procesos de una cadena de suministro

Los procesos de operaciones y cadenas de suministro se clasifican en planeación, selección de proveedores, manufactura, entrega y devoluciones. La planeación consta de los procesos necesarios para operar estratégicamente una cadena de suministro ya existente, es decir, incrementar los ingresos a través de la mejora del servicio al cliente, con enfoque a lograr su satisfacción al mínimo costo total; la selección de proveedores o fuente se lleva a cabo con el fin de recibir los artículos y/o servicios para crear el producto de la compañía; la manufactura es donde se fabrica el producto o se proporciona el servicio principal; la entrega son los procesos de logística; y la devolución comprende los procesos para recibir productos defectuosos y excedentes, así como las actividades de seguimiento que se requieren para apoyo después de ventas (Chase & Jacobs, 2019).

Figura 2. Procesos de una cadena de suministro



Fuente: (Chase & Jacobs, 2019).

Administración de la cadena de suministro

De acuerdo con Heizer y Render “La administración de la cadena de suministro es la integración de las actividades que procuran materiales y servicios, para transformarlos en bienes intermedios y productos terminados, y los entregan al cliente.” Por otro lado, también se expone que “La administración de la cadena de suministro consiste en formular una estrategia para organizar, controlar y motivar a los recursos que intervienen en el flujo de servicios y materiales dentro de la cadena de suministro” (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2008).

Además, “La administración de la cadena de suministro requiere un flujo de materiales y bienes dinámico, colaborativo y coordinado a través de sistemas de logística de todas las organizaciones en la red” las cuales tienen algunas características y requerimientos comunes como el pronóstico, la programación y la transportación (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Logística y competitividad

De acuerdo con el Consejo de Profesionales de Administración de la Cadena de Suministro, “La logística es la parte del proceso que planea, implementa y controla el *flujo* y almacenamiento eficiente y efectivo de bienes, servicios e información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de consumo a fin de satisfacer los requerimientos del cliente al mínimo costo total”.

Las actividades y decisiones logísticas pueden ser divididas y clasificadas de diferentes maneras. Estas decisiones logísticas van desde decisiones estratégicas a largo plazo que involucran niveles de servicio al cliente y diseño de la red, hasta decisiones tácticas que se refieren a cómo planificar de modo eficiente los materiales y los recursos, u operativas a corto plazo que trabajan con información muy precisa como enrutamiento diario de vehículos (Ballou, 2004).

Dado que una de las actividades que se vincula con la logística es la *distribución*, también resulta importante mencionar que un *canal de distribución* se define como todas las actividades necesarias para realizar una gestión eficiente del flujo de los productos, servicios, información y finanzas, y ponerlos al alcance del consumidor meta, con el objetivo de facilitar su compra, lo que implica un movimiento unidireccional de mercancías a lo largo de una ruta, desde el punto de producción hasta el punto de consumo, valiéndose de un sistema de comunicación que facilite su entrega en el momento oportuno, en el lugar indicado y con la calidad esperada (L. Ailawadi & W. Farris, 2020).

Un canal de distribución también puede pensarse como las estructuras físicas y las empresas intermediarias a través de las que viajan estos flujos, estos intermediarios pueden clasificarse como distribuidores, mayoristas, minoristas, proveedores de transportación y corredores. Algunas de estas empresas intermediarias toman posesión física de los bienes, algunas toman el título de los bienes y otras toman

ambos. Por lo tanto, es importante hacer distinción entre el canal de logística y el canal de mercadotecnia, el primero se refiere a los medios por los cuales fluyen físicamente los productos del lugar de disponibilidad hacia el de demanda, mientras que el segundo hace referencia a los medios por los cuales se administran los elementos transaccionales necesarios (pedidos del cliente, facturación, cuentas por cobrar, etc.) (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018). Como anteriormente se mencionó, se hará énfasis en el canal logístico dado que, en el presente trabajo, es el tema de interés.

Según la longitud, los canales logísticos se ubican de acuerdo con el número de intermediarios que existan entre el producto y el consumidor final. Con estas características se pueden encontrar tres tipos, como se muestra en la siguiente tabla, siendo la primera parte del *canal corto* (fabricante a detallista) en el que nos enfocaremos debido a que la leche es un producto perecedero. Dado lo anterior, es imperativo que los alimentos perecederos mantengan ininterrumpidamente condiciones que garanticen su calidad hasta que son consumidos, por lo que se debe disponer de medios de transporte especializado (Lucila Acosta, 2017).

Tabla 1. Tipos de canales según su longitud

Tipo de canal	Características
Canal directo	<ul style="list-style-type: none"> • Carece de intermediarios, es decir, la relación se origina entre productor y consumidor. • Con regularidad se utiliza en el sector de servicios, ya que, por tratarse de bienes intangibles, la producción y el consumo se realizan de forma simultánea. 
Canal corto	<ul style="list-style-type: none"> • Está conformado por tres niveles: el fabricante, el detallista (empresa que vende los productos o servicios al consumidor final) y el consumidor final. • La oferta se encuentra centralizada tanto en el fabricante como en el detallista y entre los dos se encargan de cubrir la necesidad del mercado. 
Canal largo	<ul style="list-style-type: none"> • Está representado por más de tres niveles, entre los cuales intervienen el fabricante, el mayorista, el minorista, y el consumidor final. Ocasionalmente también forma parte: el distribuidor, el corredor o el representante. 

Fuente: Adaptado de (Lucila Acosta, 2017).

De igual manera, es importante hacer mención que el punto inicial del fabricante que se toma a consideración es el Centro de Distribución (CEDI), en el que se almacenan los productos y se embarcan órdenes de salida para que sean distribuidos al detallista. Asimismo, los detallistas que se toman a consideración en el resto del escrito son los *minoristas con establecimiento*, en específico los de *autoservicio* y más particularmente aún los *supermercados*, en los que el consumidor encuentra los productos exhibidos en los pasillos, toma aquellos que necesita y se dirige a una caja para efectuar el pago, además de que proporcionan la ventaja de cercanía con los domicilios de los clientes.

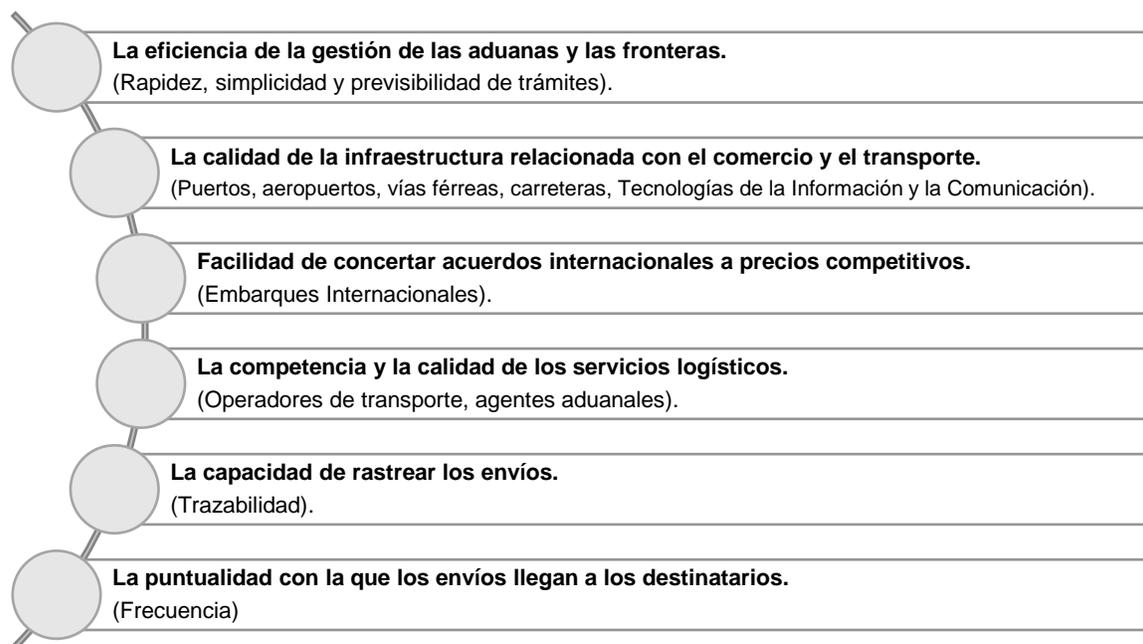
Las actividades de la gestión logística de la distribución física incluyen: transportación, depósito y almacenamiento, embalaje industrial, manejo de materiales, control de inventario, procesamiento de pedidos, pronóstico de inventario, planeación y programación de la producción, adquisición, servicio al cliente, ubicación de instalaciones, manejo de bienes devueltos, partes y servicio de apoyo, soporte de componentes y servicio, así como recuperación y eliminación de desechos (Council of Supply Chain Management Professionals, 2013).

Igualmente, es preciso señalar que el presente trabajo se enfoca en la transportación la cual, en muchos casos, es delegada a proveedores externos especializados para que su desempeño sea más eficiente y eficaz y los costos⁴ sean menores, ya que es una actividad de importancia en el sistema de logística y a menudo es la variable más grande del costo de esta área. Adicionalmente, es el movimiento físico o flujo de bienes en la red que mueve el producto y es un componente vital del suministro porque proporciona el vínculo físico entre las diversas organizaciones de una cadena de suministro (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

De igual forma, es significativo mencionar que el Banco Mundial emite el Índice de Desempeño Logístico (LPI, por sus siglas en inglés), que es una herramienta que mide el rendimiento logístico a lo largo de la cadena de suministro de cada país. Este índice considera seis aspectos: aduanas, infraestructura, embarques internacionales, competencia de servicios logísticos, seguimiento y rastreo, y puntualidad en la entrega.

⁴ Costos de transporte incluyen: valor de la unidad, salario del chofer, flete, combustible, tiempo en tránsito, orden perfecta y valor del producto.

Figura 3. Aspectos considerados en el Índice de Desempeño Logístico



Fuente: Adaptado de (The World Bank, 2018).

En 2018, México ocupó el lugar 53, dentro del ranking de desempeño logístico conformado por 160 países, con un LPI promedio igual a 3.08 sobre 5, lo que representa un 73.6% del mejor rendimiento global (The World Bank, 2018). La mejor puntuación en el mundo fue de Alemania con un LPI promedio de 4.19.

Gráfica 2. Comparación del desempeño logístico promedio de México con la mejor puntuación en el mundo, 2018

Aspecto	LPI	LPI
	Alemania	México
Aduanas	4.09	2.78
Infraestructura	4.38	2.90
Embarques internacionales	3.83	3.09
Competencia de servicios logísticos	4.26	3.06
Seguimiento y rastreo	4.22	3.14
Puntualidad en la carga	4.40	3.49
Promedio	4.19	3.08



Fuente: Adaptado de (The World Bank, 2018).

Comparando cada aspecto del desempeño logístico con México y ante un mercado cada vez más globalizado, se observa que se tiene aún mucho que avanzar en la competitividad nacional, para lo cual se necesita reforzar el sistema logístico y hacerlo más eficaz y confiable.

Siguiendo en materia de competitividad, de acuerdo con el Foro Económico Mundial, en 2019 México ocupó el puesto 48, y uno de los puntos a destacar es que hacen falta mejoras en la infraestructura del transporte ya que resulta fundamental para el desarrollo económico de un país, en la medida que ésta fomenta la competitividad e impulsa el crecimiento. En particular, la infraestructura de transporte impulsa el desarrollo económico ya que disminuye los costos de comercialización y genera una mayor integración de los mercados, además de que promueve la movilidad de los factores de la producción (World Economic Forum, 2019).

1.3. Transporte

El transporte es el área operativa de la logística que vincula a los socios e instalaciones geográficamente separados en la cadena de suministro de una empresa. Constituye un pilar fundamental en la dinámica industrial ya que ofrece los servicios de movimiento y almacenamiento de productos, además, en éste se encuentra inmerso el mayor porcentaje del costo total logístico (Ballou, 2004), lo que lo convierte en un factor clave del éxito para la entrega oportuna de materia prima y productos terminados a los clientes finales, y en un generador de valor para la organización.

Un sistema eficiente y económico de transporte, resultado de una excelente administración, contribuye a ser más competitivo en el mercado. Para lo anterior, existen dos principios económicos fundamentales que afectan la eficiencia del transporte: la economía de escala y la economía de distancia; la primera hace

referencia al costo por unidad de peso que disminuye conforme aumenta el tamaño de un embarque y, la segunda se refiere a menor costo por unidad de peso del transporte conforme aumenta la distancia (Bowersox, Closs, & Cooper, 2007).

Modos de transporte

Cuando surge la necesidad de transportar mercancías, los administradores de la cadena de suministro pueden elegir entre cinco modos básicos de transporte: carretero, ferroviario, aéreo, acuático y ductos. Además, el transporte intermodal combina el uso de dos o más de los modos básicos para mover el flete desde su origen hasta su destino (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Cada modo tiene diferentes estructuras económicas y técnicas, y cada uno proporciona diferentes niveles de calidad de servicio, sin embargo, este trabajo se enfoca al modo carretero, específicamente camiones o autotransporte de carga, que de acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transporte “es el porte de mercancías que se presta a terceros en caminos de jurisdicción federal” (SCT, 2008).

Las razones de elegir el modo carretero son: su importante aportación al PIB nacional de 3.3% en el año 2020, su contribución en el número de empleos directos e indirectos, el alto porcentaje de la carga que se mueve en el país y el impacto que tiene en la productividad nacional que permite que millones de personas accedan diariamente a productos de toda índole, como los lácteos. En el mismo año, el autotransporte de carga movilizó 512.7 millones de toneladas de productos y mercancías, lo que equivale al 81% de la carga terrestre y 56.9% de la carga doméstica total, siendo el transporte que más se emplea en el país (CANACAR, 2021).

Tabla 2. Características de las capacidades modales

Modo	Fortalezas	Limitaciones	Rol primario	Características del producto primario	Productos de ejemplo
Carretero	Accesible ⁵ Rápido y versátil Servicio al cliente	Capacidad limitada Costo alto	Mueve los envíos más pequeños en los mercados locales, regionales y nacionales.	Valor alto Productos terminados Volumen bajo	Comida Ropa Electrónicos Muebles
Ferrovionario	Gran capacidad Bajo costo	Accesibilidad Servicio inconsistente Costos por daños	Mueve grandes cargamentos de mercancías internas en largas distancias.	Bajo valor Materias primas Alto volumen	Carbón/ refrescos Madera/ papel Grano Productos químicos
Aéreo	Rápido para largas distancias Protección de la carga Flexibilidad	Accesibilidad Alto costo Capacidad baja	Mueve los envíos urgentes de carga nacional y envíos más pequeños de carga internacional.	Valor alto Productos terminados Volumen bajo Sensible al tiempo	Ordenadores Publicaciones periódicas Productos farmacéuticos Comercio electrónico
Acuático	Gran capacidad Bajo costo Capacidades internacionales	Lento Accesibilidad	Mueve grandes envíos nacionales a través de ríos y canales. Mueve grandes cargamentos de transporte internacional de mercancías a través de los océanos.	Valor bajo Materias primas Productos a granel Productos terminados en contenedores	Petróleo crudo Minerales Productos agrícolas Ropa Electrónicos Juguetes
Ductos	Almacenamiento en tránsito Alta eficiencia Bajo costo	Lento Red limitada	Mueve grandes volúmenes de carga nacional en largas distancias	Bajo valor Productos líquidos No es sensible al tiempo	Petróleo crudo Petróleo Gasolina Gas natural

Fuente: (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

⁵ La accesibilidad determina si un modo particular es capaz de llegar a los puntos de origen y destino, así como proporcionar servicio por la ruta dadas las limitaciones geográficas de la infraestructura, la red y el alcance operativo que las agencias reguladoras gubernamentales autorizan (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Además, las ventajas inherentes del transporte por camión son su servicio puerta a puerta, que implica que no hay carga o descarga entre el origen y el destino, su frecuencia y disponibilidad de servicio; y su velocidad y conveniencia (Ballou, 2004). Asimismo, este modo de transporte impulsa el desarrollo nacional y regional conectando a comunidades rurales, aumentando la competitividad de la economía, generando empleos y permitiendo la accesibilidad a bienes y servicios para todos los usuarios de la Red Carretera Federal (SCT, 2021).

Características del transporte terrestre para la distribución de lácteos

El transporte terrestre de productos industrializados requiere de características físico-mecánicas y de seguridad enlistadas en la NOM-068-SCT-2-2014 (DOF, 2015). Particularmente se hace alusión de los elementos de sujeción de carga como lonas, cadenas, ganchos, bisagras, etc., que permiten mantener la carga inmovilizada y que resulta importante para cualquier tipo de negocio.

Los medios de transporte para la distribución de lácteos deben cumplir con ciertos criterios térmicos, razón por la que es importante complementar con sensores de temperatura y humedad que en conjunto permitan entregar productos con excelentes condiciones y generar alertas en caso de que exista algún problema.

Asimismo, en la NOM-012-SCT-2-2017 (DOF, 2017) se mencionan las capacidades y dimensiones que pueden ser trasladadas, por lo que existen sensores de peaje para tener conocimiento sobre la cantidad que se está distribuyendo. Otro sensor altamente socorrido es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) con el objetivo de conocer en tiempo real la ubicación de las unidades y, si es el caso, monitorear robos.

Por último, también es posible considerar otros sensores como cámaras que monitoreen al operador del vehículo, o sensores de motor utilizados para dar un mantenimiento oportuno a las unidades y minimizar el riesgo de quedar inoperantes.

Desafíos en el transporte

Como punto de interés en la actualidad, la logística de transporte ha sido una de las más afectadas debido a las medidas tomadas para restringir la propagación del nuevo coronavirus, SARS-CoV2, por lo que el reto principal es lograr que las empresas se adapten y aprovechen las oportunidades que involucran los cambios.

De igual manera, las principales preocupaciones que se enfrentan en el país son: capacidad limitada, sobrerregulación, elevado costo de utilización de la infraestructura y mala calidad del servicio (Banco de México, 2016), y los instrumentos regulatorios más importantes para el transporte terrestre se relacionan con seguridad, dimensiones de peso y tamaño, control de las emisiones, eficiencia y rapidez, reducción de costos, etc. (OECD, 2017), para los cuales es necesario trabajar con el fin de impulsar la competitividad al mínimo costo total.

1.4. Transformación digital, competitividad y logística 4.0.

Mientras que la Primera Revolución Industrial se caracterizó por la aplicación de máquinas de vapor en la producción, la Segunda utilizó la electricidad para posibilitar la producción en masa y la Tercera empleó la informática para automatizar procesos, la Cuarta Revolución industrial se basa en un avance sin precedentes en tecnologías digitales convergentes, comenzando a erosionar los límites entre los espacios físicos y digitales, con la posibilidad de crear beneficios económicos significativos (Schwab, 2016).

En los hechos, la Industria 4.0 es la mejora de productos y procesos industriales mediante el uso de tecnologías de automatización y digitalización; y el conjunto de mundos reales y representaciones virtuales que constituyen un nuevo espacio de gestión que es ciber-físico, es decir, la integración de elementos de un mundo físico con componentes de cómputo, almacenamiento y comunicación (Micheli Thiri3n, 2020).

Figura 4. Las Revoluciones Industriales



Fuente: Adaptado de (Calatayud, Agustina, 2017).

Las principales tecnologías que caracterizan a la Revolución 4.0 se describen en la Tabla 3. Sin embargo, cabe mencionar que esta Revolución no sólo está representada por el uso de este tipo de tecnologías sino también por la velocidad, la amplitud y profundidad en que ocurren, lo cual está cambiando la manera como vivimos, trabajamos y nos relacionamos, impactando a los países, las empresas, las industrias, y la sociedad en su conjunto (Schwab, 2016).

Tabla 3. Tecnologías que caracterizan a la Cuarta Revolución Industrial

Tecnología	Características	Aplicación
Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés)	Conjunto de sensores (aparatos que captan magnitudes físicas como desplazamiento, movimiento, la intensidad de luz, temperatura, sonido, etc.), dispositivos y redes que conectan objetos con sistemas de computación.	En la salud (dispositivos que monitorean el ritmo cardíaco o el nivel de azúcar en la sangre), en la agricultura (monitoreo de la humedad y la temperatura de cultivos), en la logística (seguimiento de envíos y la optimización de rutas), etc.
Internet Industrial de las cosas (IIoT, por sus siglas en inglés)	Aplicación particular de la IoT en entornos industriales, con el fin de maximizar y automatizar la captura de datos para mejorar la trazabilidad de los procesos y la toma de decisiones de producción en tiempo real.	Aplicación industrial para optimizar procesos y tomar mejores decisiones.
Analítica de Big Data	Se refiere a la capacidad de procesar bases de datos muy extensas, a fin de encontrar patrones entre los datos, como correlaciones o relaciones de causalidad.	Se encuentra ampliamente extendida en sectores como el marketing digital y el comercio electrónico en la planificación estratégica y toma de decisiones.
Servicios en la nube/ Cloud computing	Tecnología que permite a los usuarios externalizar la infraestructura tecnológica (hardware) a proveedores externos que ofrecen acceso compartido e ilimitado a servidores de datos, almacenamiento, aplicaciones y servicios mediante internet, con un modelo de pago por uso.	En entornos en los que se necesita conectar a internet con el fin de almacenar o tener acceso a información compartida.
Inteligencia Artificial (AI, por sus siglas en inglés) / Machine learning	Mediante determinados algoritmos (procedimientos, paso a paso, para encontrar la solución a un problema), permite que un ordenador aprenda rutinas sin estar necesariamente preprogramadas. A medida que los algoritmos son aplicados en el análisis de información, van “aprendiendo” y cambiando su comportamiento.	En vehículos autónomos, recomendaciones de productos en plataformas electrónicas como Amazon o Netflix, detección de fraude en la utilización de una tarjeta de crédito, predicción de demanda, etc.
Automatización y robótica	Aplicación de tecnologías digitales a procesos manuales repetitivos, permitiendo su automatización.	Está ampliamente presente en la producción en masa, como la automotriz y la electrónica, así como también en la gestión de almacenes y, recientemente, en la conducción autónoma.
Impresión 3D	Es la tecnología que permite la creación de objetos mediante la impresión sucesiva de capas de material que se adhieren para dar forma al objeto, según el diseño digital del mismo.	Se ocupa en en el diseño de productos (por ejemplo, los ortopédicos) y en las empresas que producen partes específicas para industrias como la electrónica o la automotriz.
Realidad aumentada (AR, por sus siglas en inglés)	Aplicación que, mediante el uso de dispositivos visuales, permite combinar la realidad existente en un entorno logístico con información en 3D y datos informáticos relevantes que se despliegan sobre la misma visualización con el fin de mejorar la toma de decisiones.	En logística se emplea en la gestión de bodegas para mejorar los procesos de selección, control de calidad y empaquetado de productos, etc.
Cadena de bloques/ Blockchain	Esta tecnología ofrece un mecanismo seguro para el intercambio de información entre los distintos componentes de la cadena productiva y logística, mediante una encriptación de la información y su almacenaje de forma distribuida evitando con ello un único punto de fallo o adulteración fraudulenta de la información.	Encriptación de monedas digitales, operación de procedimientos de manera confiable y segura en el comercio exterior, transporte, telecomunicaciones, tecnología, etc.

Fuente: Adaptado de (Katz, Dougall, de Urquiza, & Fish, 2017) y (CEPAL, 2020).

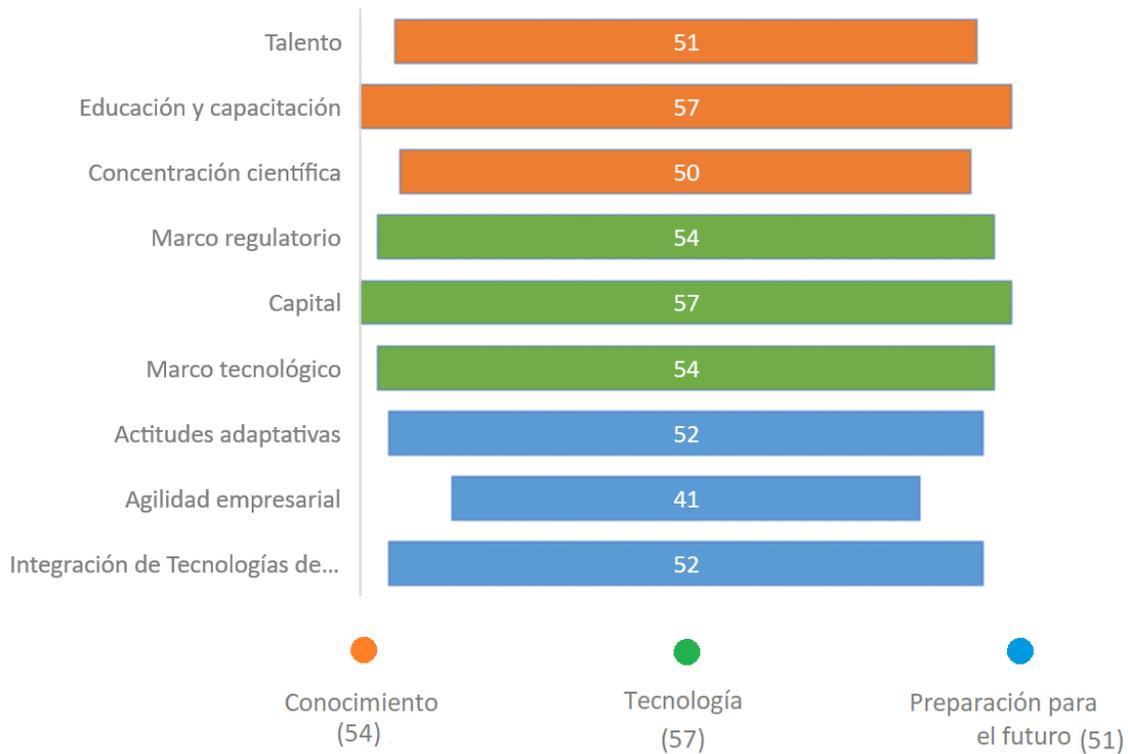
Esta realidad cambiante ha utilizado como herramienta principal al internet, lo que ha encaminado en un uso intensivo de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), la conectividad y con ello a la transformación digital que hace referencia a nuevas oportunidades estratégicas de negocio que se originan gracias a la incorporación de dichas tecnologías (Fuente, 2018), las cuales están asociadas a la competitividad en el mercado. Dado lo anterior, es importante analizar el grado de preparación nacional para afrontar la transformación digital.

Transformación digital y competitividad en México

El Instituto para el Desarrollo Gerencial mide la capacidad y disposición de varias economías para adoptar y explorar tecnologías digitales como un factor clave para la transformación económica de sus empresas, gobierno y sociedad en general, razón por la que da a conocer el *ranking mundial de competitividad digital* en el que considera tres índices: conocimiento, tecnología y preparación para el futuro.

A pesar de que las TIC han tomado auge en el país, consecuencia de la pandemia, actualmente México está posicionado en el lugar 56 de 64 países de dicho *ranking*, en el que se acumuló una caída de siete lugares desde el 2017, lo que explica que otros países avanza más rápidamente. El índice de *tecnología* fue el peor calificado, y abarca tres subíndices que lo definen: Marcos Regulatorios, Capital y Marco Tecnológico, de los cuales el segundo es el más deficiente en el que se evaluó: el financiamiento para el desarrollo tecnológico, inversión en telecomunicaciones, capital de riesgo, etc., con lo que se observa que hay mucho por delante para lograr una transformación digital en el país (IMD, 2021).

Gráfica 3. Clasificación de los factores de la competitividad digital de México, 2021



Fuente: Elaboración propia con datos de (IMD, 2021).

Logística 4.0

La industria 4.0 está modificando la manera en que los negocios operan, incluyendo el sector de logística y transporte, por lo que es importante destacar que el empleo de los medios digitales en la logística lleva el nombre de *Logística 4.0*, y se caracteriza por optimizar recursos, reducir tiempos y costos, facilitar procesos mediante soporte tecnológico, proveer información en tiempo real, optimizar rutas, dar seguimiento a envíos, promover una logística colaborativa, entre otros, lo cual representa una oportunidad para tomar decisiones basadas en evidencia y hacer más eficientes, productivos y rentables los servicios (CEPAL, 2020). Sin embargo, la logística actual tiene varios desafíos en esta era digital porque la tecnología cambia las tendencias o costumbres de las personas y, por lo tanto, la forma de satisfacer sus demandas. Un desafío es la optimización de rutas del transporte el cual se abordará con mayor detalle en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 2. Tecnología del transporte y optimización de rutas

2.1. Sistemas Inteligentes de Transporte y sus beneficios

En un mundo cada vez más competitivo, la distribución de mercancías demanda reducción de costos, servicios más rápidos, de alta calidad, confiables e integrales, para lo cual es indispensable una mayor inversión en infraestructura y la incorporación de innovaciones tecnológicas que permitan hacer más productivos y eficientes los servicios. Dado lo anterior se destaca la importancia de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, por sus siglas en inglés) que es el nombre que recibe la aplicación de las TIC en el sector de transporte y logística (CEPAL, 2012) y que se caracterizan por funcionar mediante *Machine Learning* e Internet de las cosas.

Sistemas de Administración de Transporte

Para desarrollar estrategias y tomar decisiones operativas existen varios factores que deben tomarse en cuenta, por lo que se han desarrollado herramientas de software de tecnología de la información. Las herramientas más completas son los Sistemas de Administración de Transporte (TMS, por sus siglas en inglés) las cuales se definen como el software que se utiliza para la planificación, ejecución, *optimización* y control del movimiento de mercancías, así como para la evaluación de desempeño. Además, los TMS se pueden vincular con sistemas de administración de pedidos, sistemas de administración de almacenes y herramientas de la planificación de la cadena de suministro (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Tabla 4. Aplicaciones de planificación, ejecución y de análisis en los TMS

Planificación	Ejecución	Análisis del desempeño
<ul style="list-style-type: none">• <i>Enrutamiento y programación.</i>• Planificación de la carga.	<ul style="list-style-type: none">• Licitación de la carga.• Seguimiento del estado.• Programación de citas.	<ul style="list-style-type: none">• Seguimiento del rendimiento.• Auditorías de la facturación de mercancías.

Fuente: *Elaboración propia con datos de* (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Cabe señalar que la incorporación de tecnología es clave para la eficiencia y sostenibilidad de los servicios de infraestructura, además, ayuda a administrar los datos y alternativas de transporte con el objetivo de tomar mejores decisiones, las cuales tienen un gran impacto en la satisfacción del cliente, el control de costos, el desempeño de una cadena de suministro más competitiva y en el éxito de la organización.

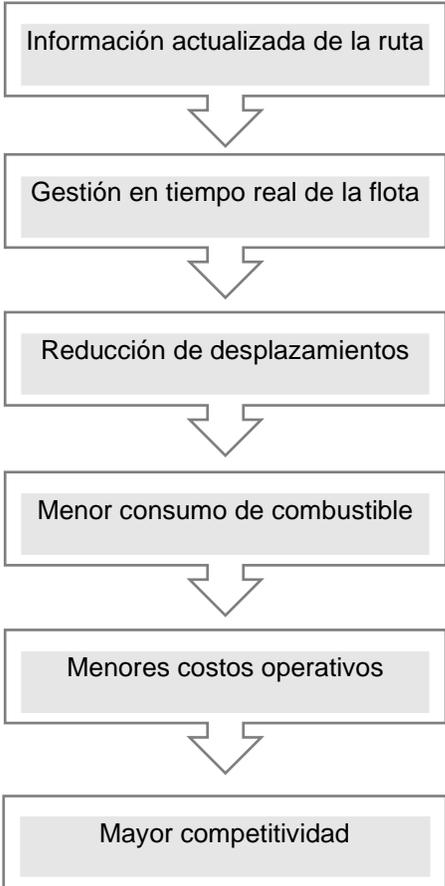
Sistemas de información geográfica

Los GIS se han convertido en un soporte fundamental para la transformación digital de las empresas en la Cuarta Revolución Industrial, los cuales son un modelo informatizado del mundo real, en un ecosistema de referencia ligado a la Tierra, para satisfacer necesidades de información concretas (SGM, 2017), y ayuda a las empresas a tomar decisiones analíticas de localización ya que almacenan y despliegan información en formato digital que puede vincularse con una ubicación geográfica (Heizer, Rennder, & Munson, 2017).

El presente trabajo se enfoca en una *planificación adecuada de las rutas de entrega*, en el que el software utiliza métodos matemáticos y rutinas de optimización para identificar posibles rutas que cumplen las restricciones del servicio, de modo que los campos de aplicación de los GIS que pueden emplearse son: 1) infraestructura que optimiza sistemas de mantenimiento o auxilia en la planificación de redes, 2) información de rutas que obtiene modelos de tráfico y vías, planifica sistemas de

transporte, monitorea vehículos en tránsito, calcula tiempos de conducción, etc., lo que se expone con mayor detalle más adelante (SGM, 2017).

Beneficios del uso de tecnología en el transporte



La aplicación de tecnología en el transporte genera grandes beneficios, entre ellos: disponer información actualizada de las condiciones de la ruta, gestionar en tiempo real las flotas de transporte, posibilitando la optimización de los trayectos, la reducción de los tiempos de desplazamiento y los viajes de retorno en vacío, lo que genera el aumento de la productividad, mayor rotación de inventario y la satisfacción del cliente. De igual manera, al disminuir la cantidad de vehículos desplazándose, también disminuye la congestión, lo que conlleva a menores emisiones y accidentes viales. Lo anterior ayuda a optimizar costos, manteniendo o mejorando la calidad, y mejora los márgenes de operación, lo que incide directamente en la rentabilidad de las empresas y su competitividad.

A modo de resumen, los beneficios de aplicar tecnología en la movilidad y logística se pueden agrupar en tres grandes bloques: 1) posibilitan la provisión de servicios logísticos integrados para esquemas complejos, 2) favorece la reducción de las emisiones de carbono asociadas al transporte y 3) mejora los márgenes de operación de las empresas, al permitir una gestión más eficiente y segura de las flotas (CEPAL, 2012). Dado lo anterior, la digitalización conduce a una cadena de suministro caracterizada por mayor rapidez, flexibilidad, personalización,

transparencia y eficiencia que hacen posible un cambio sustancial en términos de servicio, costos, capital y agilidad (McKinsey & Company, 2017).

2.2. Optimización de rutas de transporte

La optimización de rutas resulta conveniente en cualquier ámbito, específicamente para las empresas de transporte que requieren una distribución óptima tanto del tiempo, como del combustible, las cuales están relacionadas con la distancia que recorren.

La optimización de rutas de transporte se basa en procedimientos matemáticos precisos que son diseñados para encontrar la “mejor” solución, dada la definición matemática del problema en evaluación, y todas las suposiciones que se hayan hecho, lo que significa que resulta posible demostrar matemáticamente que la solución resultante es la mejor, por lo que cabe nombrar que los modelos de optimización en uso en la actualidad incorporan técnicas como la programación matemática, particiones en conjunto, enumeración, secuenciación y el uso de técnicas matemáticas avanzadas, para identificar y evaluar alternativas de diseño de red factibles a modo de minimizar los costos y mantener o mejorar el servicio al cliente (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Cabe destacar que en los métodos de optimización se observan ventajas como: 1) la garantía de que el usuario tendrá la mejor solución posible para un conjunto dado de supuestos e información, 2) una gran cantidad de estructuras complejas pueden manejarse en forma correcta, 3) se realiza un análisis más eficiente ya que todas las alternativas se generan y se evalúan, 4) se pueden efectuar comparaciones una y otra vez, etc. Sin embargo, también existe la desventaja de que a medida que incrementa la complejidad del problema, no se podrá obtener una solución óptima dentro de un tiempo computacional razonable y con las capacidades de memoria

de incluso las computadoras más grandes, por lo tanto, se debe considerar un balance entre la descripción del problema y el tiempo de solución (Ballou, 2004).

Se ha comentado sobre los Sistemas Inteligentes de Transporte y sus beneficios, así como sobre la optimización de las rutas, por lo que a continuación se explican las métricas para el transporte, que están en sintonía con los ITS, las cuales nos sirven para cuantificar y evaluar su desempeño.

2.3. Métricas para el transporte

La calidad de los servicios de transporte es tangible, en el sentido de que muchos requisitos son observables y cuantificables. Esto permite a las organizaciones dar seguimiento a las actividades por medio de las métricas de transporte o los indicadores clave del desempeño (KPI, por sus siglas en inglés). Los KPI del transporte son mediciones objetivas del desempeño del transportista o de la flota privada que están vinculadas para suministrar el éxito de la cadena (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

Algunos criterios de evaluación del transporte son: costo, rapidez, capacidad, disponibilidad, frecuencia, fiabilidad, flexibilidad y servicio, los cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 5. Criterios de evaluación del transporte

Criterio	Descripción
Costo	Es un cargo variable, cuyo monto depende del tipo de mercancía, el tamaño del embarque y la <i>distancia</i> a recorrer, entre otros aspectos.
Rapidez	Se determina midiendo el <i>tiempo</i> transcurrido desde el embarque de la carga hasta que se recibe en su lugar de destino.
Capacidad	Se devalúa considerando las dimensiones de la carga y la cantidad que puede ser transportada en un viaje.
Disponibilidad	Es la facilidad para movilizar la carga a un determinado destino.
Frecuencia	Es la periodicidad con que se pueden realizar embarques y salidas de mercancía.
Fiabilidad	Capacidad para entregar la mercancía dentro de los plazos y condiciones estipulados, por lo que resulta conveniente contar con información en tiempo real.
Flexibilidad	Adaptabilidad para responder eficazmente a las condiciones del producto en un momento determinado.
Servicio	Acondicionamiento de la mercancía, respaldo por daños o desperfectos a causa de la manipulación, diligenciamiento de seguros, entre otros.

Fuente: (Lucila Acosta, 2017).

Cabe señalar que la administración del tiempo y la distancia resulta crucial dado que con éstos se busca medir qué tan eficiente es el proceso de entrega y el rendimiento de cada vehículo, motivo por el cual son los criterios de evaluación a optimizar en el presente estudio. También resulta importante hacer mención que los clientes se enfocan en KPI dirigidos hacia la calidad del servicio del transporte, los cuales se centran en hacer las cosas bien a la primera vez de acuerdo con los requisitos específicos del cliente. Las métricas de calidad del servicio más comunes se presentan a continuación.

Tabla 6. Métricas comunes de transporte

Métrica	Fórmula	Objetivo típico
Entrega a tiempo	$\frac{\text{Total de las entregas a tiempo}}{\text{Entregas totales}}$	>95%
Promedio del tiempo de tránsito	$\frac{\text{Suma de los tiempos de tránsito}}{\text{Entregas totales}}$	Baja variación alrededor de la meta
Tarifa por daños	$\frac{\text{Total de unidades dañadas}}{\text{Total de unidades enviadas}}$	<1%
Tarifa por escasez	$\frac{\text{Total de unidades perdidas o robadas}}{\text{Total de unidades enviadas}}$	<1%
Exactitud de la facturación	$\frac{\text{Total de facturas de transporte exactas}}{\text{Facturas totales de mercancías}}$	>99%
Índice de entrega perfecta	$\% \text{ A tiempo} \times \% \text{ libre de daños} \\ \times \% \text{ de exactitud de la facturación}$	>95%
Órdenes perfectas	$\frac{\text{Órdenes perfectas}}{\text{Total de órdenes surtidas}}$	>95%

Fuente: (Gibson, 2018).

La medición consistente, el seguimiento del desempeño y la revisión de un número manejable de KPI de transporte genera beneficios considerables, ya que ayudan a las organizaciones a adoptar un enfoque proactivo, así como a señalar ineficiencias, desarrollar estrategias para la reducción de los costos de la cadena de suministro y tomar decisiones. Además, los datos de los KPI se pueden utilizar para analizar las compensaciones del nivel de servicio-costos y ofrecen ventajas como trabajar con datos medibles y cuantificables, comparar datos de forma objetiva, trabajar con datos en tiempo real, rediseñar procesos para hacerlos más eficientes, mejorar los resultados a todos los niveles, aumentar la satisfacción final del cliente, identificar oportunidades de mejora, entre otros. Con lo anterior, es posible elevar a una empresa por encima de su competencia.

2.4. Casos de éxito de empresas proveedoras de Sistemas de Información Geográfica

Como se mencionó anteriormente, un Sistema de Información Geográfica es una herramienta de ayuda para la toma de decisiones que se puede aplicar de muchas maneras a muchos problemas y su elección gira en torno al que otorgue mejores resultados al mínimo costo total. Algunas empresas proveedoras que ofrece su servicio a sectores como el de alimentos y bebidas son las siguientes.

CARTO

CARTO es una empresa que ofrece herramientas para el análisis y visualización de datos geolocalizados que facilitan la toma de decisiones en la distribución de productos (CARTO, 2022) de empresas como Saucey y PostMates. La primera distribuye bebidas alcohólicas (Mapbox, 2022) y la segunda brinda servicio de entrega a domicilio y comercio rápido, ambas con métodos que permiten reducir la distancia y el tiempo de entrega promedio (CARTO, 2019).

SIGSA

SIGSA es una empresa mexicana encargada de la distribución del GIS más popular del mundo en México (ESRI – ArcMap), el cual se utiliza para optimizar procesos bajo un marco geográfico generando grandes beneficios operativos, ejecutivos y económicos. Entre sus principales clientes están la cervecera Grupo Modelo y la empresa de bebidas Coca – Cola FEMSA que, además de usar herramientas de análisis estadístico y programación, tienen un alcance en la mejora de operaciones como la planeación de rutas, ubicación de tiendas y toma de decisiones en tiempo real (SIGSA, 2022).

Wise Systems

Wise Systems es una empresa de tecnología e Inteligencia Artificial que brinda soluciones de logística para mejorar la eficiencia de la flota y el servicio al cliente, adaptándose a los desafíos cotidianos que enfrentan (Wise Systems, 2022). Le brinda servicio en tiempo real a la cervecera Anheuser – Busch para optimizar su sistema de ruteo diario por medio de la reducción de distancia, incremento de entregas a tiempo y con ello la disminución de rechazos (Business Insider Intelligence, 2019).

2.5. Casos de éxito de empresas de paquetería, logística y tecnología

Los GIS han sido aplicados en diferentes empresas y sectores como el de transporte para la optimización de sus recursos, generando un gran impacto y a su vez ventajas competitivas. A continuación, se exponen algunos ejemplos.

Uber Technologies Inc.

Uber Technologies Inc. tiene origen estadounidense y es una empresa de tecnología y la principal proveedora de servicios de transporte a través de una aplicación móvil (*app*), con presencia en más de 310 ciudades alrededor del mundo.

Esta empresa utiliza algoritmos de enrutamientos modernos basados en datos GPS para construir un sistema cuidadosamente optimizado capaz de manejar cientos de miles de solicitudes de servicio de transporte por segundo, con un tiempo de respuesta de milisegundos, ya que la empresa le da suma importancia a la precisión y eficiencia para determinar la mejor manera de llegar a algún lugar y satisfacer a sus clientes, dado que lo primero que un pasajero observa es el tiempo estimado de llegada (Uber Engineering, 2015).

DHL

DHL es una empresa de paquetería a nivel mundial. Su actividad es entregar mercancías a clientes dispersos geográficamente, por lo que su principal preocupación era clasificar los artículos según el código postal y entregar, con un costo mínimo, las mercancías utilizando algunos de los vehículos disponibles. Sin embargo, para solucionar el problema de clasificación y entrega, la empresa optó por utilizar un GIS, el cual mejoró todo el proceso tanto en tiempo como en ahorro de costos, ya que actualmente las tareas se manejan automáticamente usando el software, primero clasificando los elementos en términos de sus códigos postales y luego se muestran en el mapa mientras se resaltan las rutas que se adoptarán (Faiz & Krichen, 2013).

FedEx

FedEx es una compañía de logística de origen estadounidense que tiene cobertura a nivel internacional. La empresa emplea GIS para resolver problemas complejos de la planificación y ejecución del proceso de entregas diarias, por lo que los datos espaciales se están implementando dentro de la organización para su uso en la toma de decisiones para el enrutamiento y la programación de miles de vehículos que recogen y entregan mercancía con el fin de obtener mayor satisfacción de los usuarios, ya que los datos del cliente y la información de los recursos pueden predecir las mejores prácticas para los métodos de entrega y aumentar la productividad minimizando los tiempos de respuesta y ejecución (ESRI, 2010).

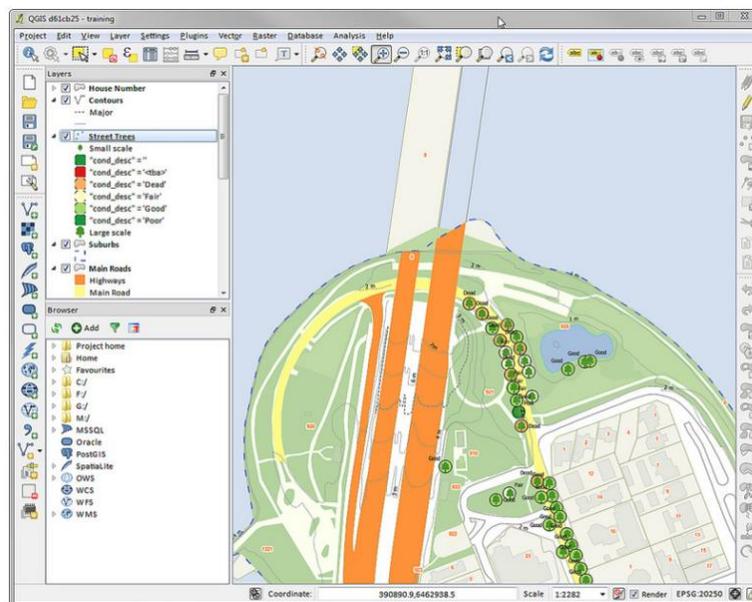
Un ejemplo de lo anterior es que el GIS le ha proporcionado a FedEx un método preciso para predecir el número diario de rutas requeridas y como resultado ha minimizado el número de horas en carretera, lo que se traduce a diversos beneficios como el ahorro de combustible y el uso eficiente de los recursos. Asimismo, un desafío particular que han enfrentado es la obtención de una geo codificación correcta requerida para ubicar las direcciones necesarias para recoger o enviar un paquete (ESRI, 2010).

CAPÍTULO 3. Implementación de un Sistema de Información Geográfica

3.1. Quantum-GIS

QGIS es un Sistema de Información Geográfica libre (gratuita) y de Código Abierto, es decir, que cualquier persona puede generar herramientas adicionales para extender las capacidades del software. Este sistema proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos, ya que puede visualizar, gestionar, editar, analizar, diseñar y publicar información geoespacial en tiempo real. Asimismo, no sólo es un GIS de escritorio de computadora, ya que también proporciona un explorador de archivos espaciales, una aplicación de servidor y aplicaciones web, lo que también hace posible su uso en teléfonos móviles y tabletas (QGIS, 2021).

Figura 5. Captura de pantalla de QGIS para escritorio



Fuente: (QGIS, 2021).

La principal competencia de QGIS es ArcGIS, que también es un Sistema de Información Geográfica, motivo por el que a continuación se presenta una tabla comparativa entre ambos.

Tabla 7. Comparación entre QGIS y ArcGIS

Características	QGIS	ArcGIS
Soporte del Sistema Operativo	Es multiplataforma y se puede instalar y ejecutar en máquinas Windows, Mac o Linux.	Sólo se puede instalar en Windows.
Tiempo de carga y geoprocesamiento	Tiempo de inicio y de procesamiento de datos rápido.	Sistema lento en el tiempo de carga y geoprocesamiento.
Desarrollo	Por lo general, el coste del desarrollo está sufragado por organizaciones no financieras, pero con el apoyo de las empresas comerciales que aportan donaciones al proyecto.	Su desarrollo es llevado a cabo por el equipo de ESRI (Environmental Systems Research Institute), aunque las mejoras al sistema han sido resultado de los comentarios de los usuarios.
Complementos (plugins)	Tiene una biblioteca de aplicaciones gratuitas y permite crear complementos propios.	Por medio de una colección de herramientas se pueden personalizar las actividades. Contiene menor cantidad de complementos que QGIS.
Análisis espacial	Menos capacidades analíticas espaciales que ArcGIS.	Tiene más capacidades analíticas espaciales listas para usar que QGIS.
Costo	Software de código abierto que se puede descargar gratuitamente.	Software propietario y disponible comercialmente que cuesta miles de pesos.
Licencia	Dado que es un software gratuito y de código abierto, no hay problema de licencia. Se puede descargar en cualquier computadora y no hay límite de las herramientas que se pueden utilizar.	Uso restringido a través de una licencia.
Adopción	El empleo de QGIS está creciendo, es popular en los círculos académicos y en ámbitos donde el software de código abierto es la norma.	La mayoría de las agencias gubernamentales y comerciales lo utilizan sobre cualquier otro paquete GIS.

Fuente: Adaptado de (Monde Geospacial, 2017) y (GIS Lounge, 2012).

Dadas las características antes mencionadas se considera adecuado el empleo de QGIS para los fines del presente trabajo.

3.2. Métodos de optimización de rutas de transporte

Dado que los costos de transportación normalmente se encuentran entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales, mejorar la eficiencia mediante la máxima utilización del equipo de transportación y de su personal es una

preocupación importante. Un problema frecuente en la toma de decisiones es reducir los costos de transportación y mejorar el servicio al cliente encontrando los mejores caminos que debería seguir un vehículo en una red de carreteras que minimicen el tiempo o la distancia, para lo que se requieren de métodos de optimización, sin embargo, primero se planea la ruta, después se resuelve con ayuda de sistemas computarizados y, finalmente, se revisa la solución matemática para que, en caso de ser necesario, se hagan modificaciones (Ballou, 2004).

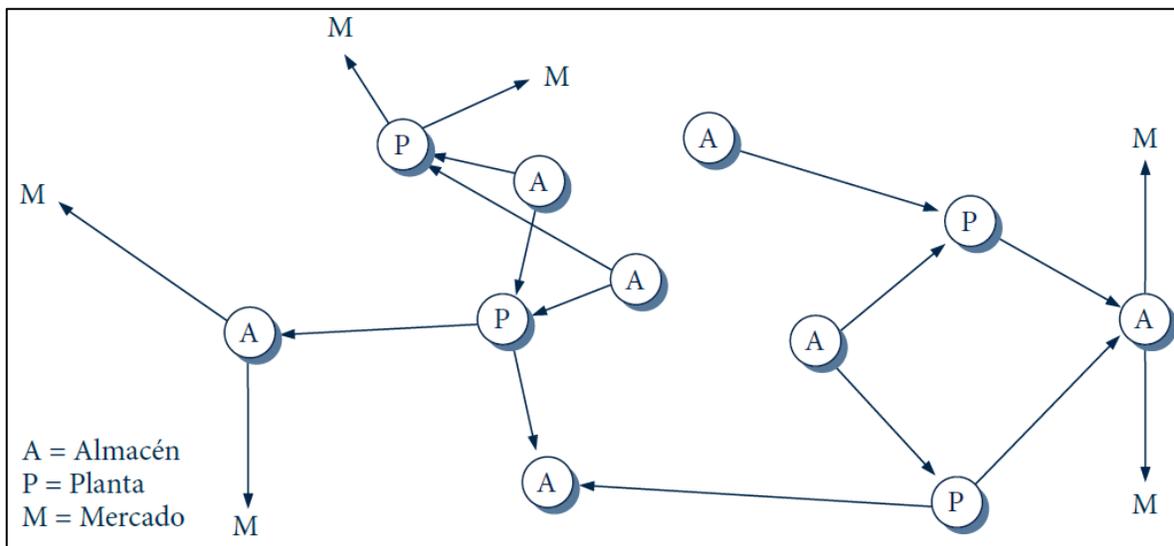
De acuerdo con (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018), una de las técnicas más sencillas y directas es el método de la *ruta más corta y/o más rápida*, en el que nos dan una red representada por enlaces y nodos, donde:

- Los nodos son puntos espaciales fijos donde los bienes se detienen para su depósito o procesamiento (instalaciones de manufactura/ ensamblaje, y almacenes). Son los puntos de conexión entre los enlaces.
- Los enlaces representan la red de transporte y conectan los nodos en el sistema logístico. Son los costos (distancias, tiempos o una combinación de ambos, formados como un valor promedio de tiempo y distancia) para pasar entre los nodos.

La perspectiva nodo – enlace representa una base conveniente para buscar posibles formas de mejorar el sistema de transporte entre diferentes participantes de la cadena de suministro, por ejemplo: planta, almacén y clientes en un área de mercado. Sin embargo, como se comentó con anterioridad, su complejidad se relaciona directamente con las diferentes relaciones entre tiempo y distancia, y con la regularidad, previsión y volumen del flujo de mercancías que entran, salen y se mueven dentro del sistema.

En relación con lo anterior, también es importante mencionar que un grafo representa un conjunto de nodos unidos en una red, en donde existe un costo relacionado al desplazamiento entre nodos, para lo cual un algoritmo o método de búsqueda tratará de encontrar un camino óptimo entre dos nodos, por lo que a continuación se explican algunos de los métodos referentes a la *ruta más corta y/o más rápida*.

Figura 6. Nodos y enlaces en un sistema de logística



Fuente: (Coyle, Langley, Novack, & Gibson, 2018).

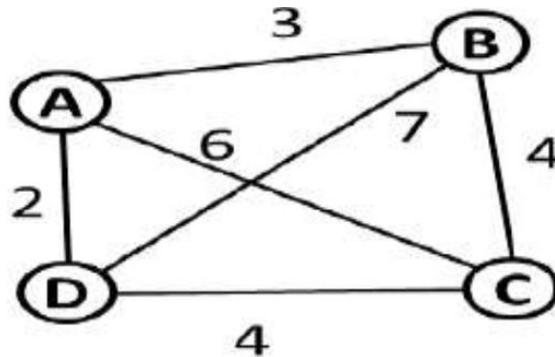
Método del problema del viajante o *Travelling Salesman Problem*

(TSP, por sus siglas en inglés)

El problema del viajante es un método de optimización en el que se busca encontrar el recorrido más corto y, al mismo tiempo, el más eficiente, a través de un conjunto de n vértices (nodos) para que cada uno de ellos se visite exactamente una vez y volver al punto de partida, es decir, pone la condición de que no se pase por el mismo lugar dos veces y que el punto de inicio y fin sea el mismo. Este método es fácil de describir, pero difícil de resolver ya que a medida que aumenta el número

de destinos el problema se vuelve más complejo (Dahiya & Sangwan, 2018). La siguiente figura ilustra una colección de ciudades y sus distancias entre sí, en donde el recorrido $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ es la ruta óptima:

Figura 7. El problema del viajante



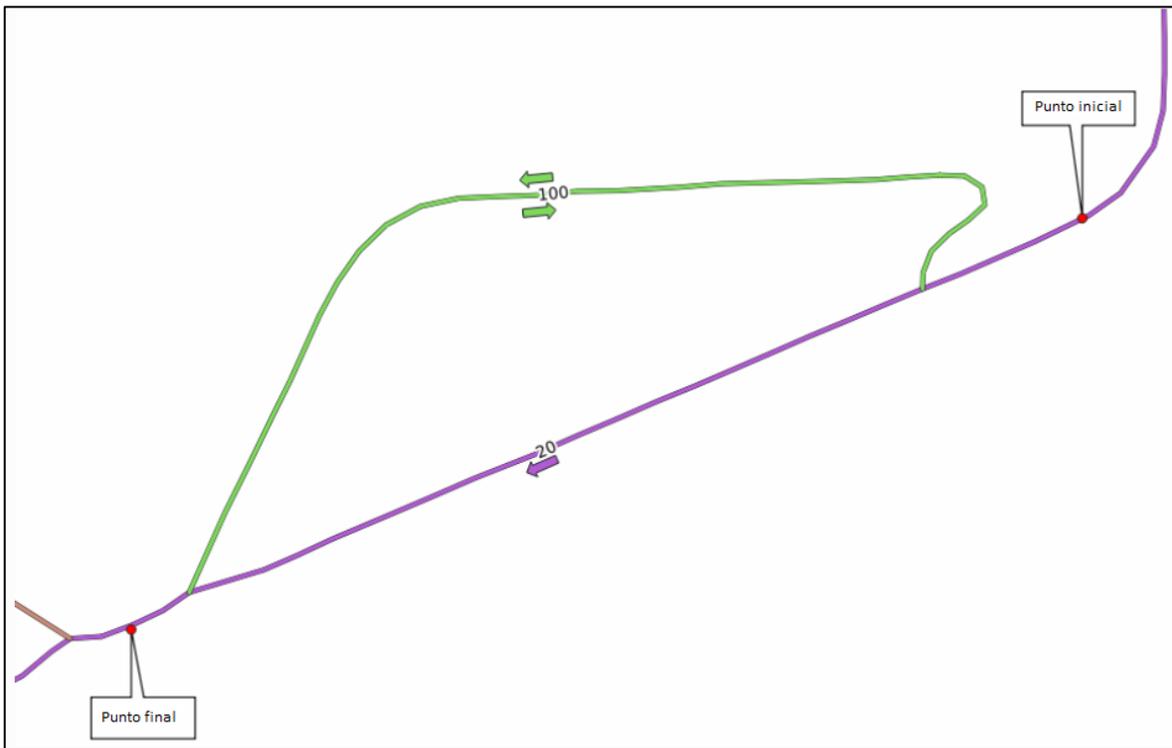
Fuente: (Dahiya & Sangwan, 2018).

Hoy en día, el TSP es utilizado en diversos campos, ingenierías y problemas de optimización, algunos de los ámbitos en los que se aplica son en el problema de enrutamiento de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) y en el enrutamiento de paquetes en un sistema de transporte. Existen diversas soluciones que se utilizan en el método TSP, en este caso se empleará el *enfoque de fuerza bruta*, el cual consiste en calcular y comparar todas las posibles rutas, para luego establecer una única solución, la óptima (Calviño Martínez, 2011).

Método A*. La ruta más corta y la ruta más rápida

La búsqueda de la ruta más corta y/o la más rápida es compleja en una red de carreteras y se aplica en la planificación logística o en la simulación de tránsito para la minimización de distancia y/o tiempo y con ello la optimización de costos. Para lo anterior, hay varios algoritmos de búsqueda de ruta como el método A*, que es de tipo heurístico, lo que significa que mediante modelos computacionales encuentra una ruta óptima desde un nodo inicial determinado hasta un nodo objetivo también determinado (Shrawan Kr & B. L, 2015).

Figura 8. La ruta más corta y la ruta más rápida



Fuente: (QGIS, 2020).

Cabe destacar que la ruta más corta puede coincidir con la más rápida, aunque eso no siempre ocurre dado que existen diferentes límites de velocidad. Como se muestra en la Figura 8. La ruta más corta y la ruta más rápida, los límites de velocidad de cada camino están representadas mediante etiquetas en km/h y el camino más rápido es el de color verde, mientras que el más corto y directo es el de color morado (QGIS, 2020).

3.3. Obtención de datos

En el presente trabajo se utilizan dos fuentes de información gratuitas de donde se obtienen los datos para proceder a la optimización de rutas de transporte, estas fuentes son: el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) y el OpenStreetMap (OSM, por sus siglas en inglés).

Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas

Contar con información estadística y geográfica oportuna y veraz ha sido una necesidad nacional, por lo que el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) ha puesto a disposición de la sociedad el DENU, que proporciona información actualizada de más de 5 millones de unidades económicas activas en el territorio nacional, dado que ofrece datos que permiten identificarlas por el nombre comercial, el tipo de organización jurídica (personas físicas o morales), por su actividad económica y por su tamaño (con base en el estrato de su personal ocupado); así como, ubicarlas en el territorio mexicano por regiones, localidades, manzanas y calles (INEGI, 2021a).

Las características antes dichas hacen del DENU una herramienta muy útil con diversas ventajas como: 1) enriquecer la toma de decisiones para el desarrollo de programas de fomento económico y para la optimización de los recursos en los ámbitos público y privado; 2) realizar estudios e investigaciones económicas, identificar clientes, proveedores o competidores potenciales, así como, nuevas áreas de distribución de productos o servicios; 3) tomar decisiones en situaciones de desastre porque proporciona información para la estimación de pérdidas y costos de reconstrucción, así como para evaluar y definir políticas de prevención civil y desarrollo urbano; además 4) el acceso gratuito a través de la web propicia su utilidad en la difusión de los negocios y la búsqueda de unidades económicas para satisfacer alguna necesidad específica; finalmente 5) la información puede ser consultada en el micrositio mediante computadoras, tabletas, teléfonos celulares y aplicaciones que pueden ser descargadas desde el micrositio del directorio (INEGI, 2021b), como se muestra a continuación.

Figura 9. Micrositio del DENUE

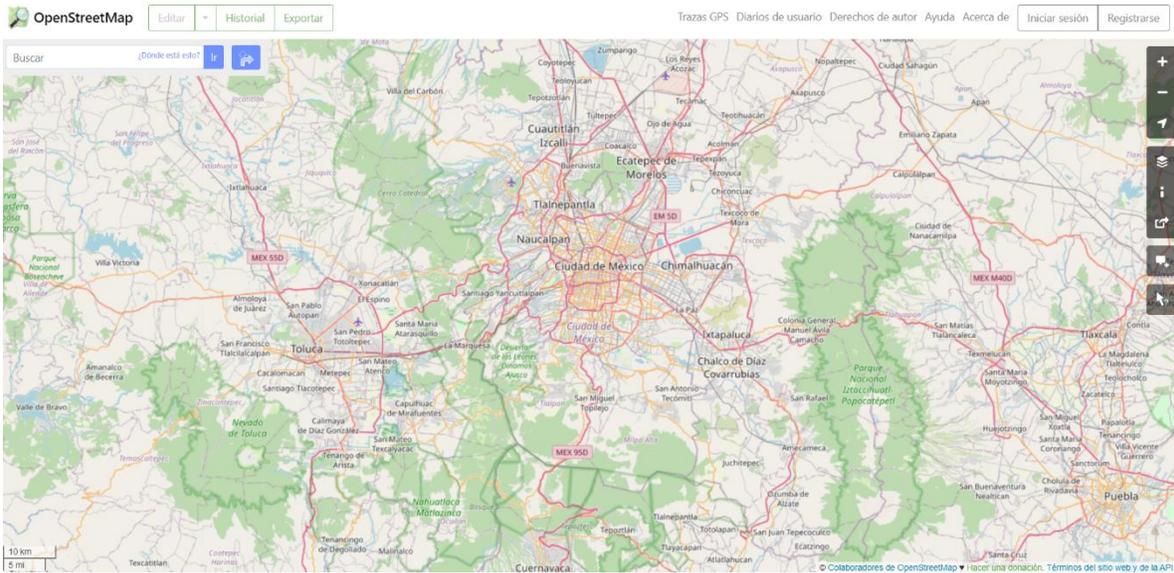


Fuente: (INEGI, 2020b).

OpenStreetMap (OSM)

OSM es un proyecto colaborativo a nivel mundial que permite crear mapas empleando información geográfica como las rutas del país, sus velocidades y tiempos. Comparte las siguientes características: 1) los colaboradores utilizan imágenes aéreas, dispositivos GPS, mapas y otras fuentes de datos libres para verificar que los datos de OSM sean precisos y estén actualizados; 2) su uso es libre, es decir, sus datos están bajo una licencia abierta y funciona sin restricciones legales en relación con el derecho de uso, la redistribución y la creación de versiones modificadas; 3) proporciona datos de mapas para miles de sitios web, aplicaciones móvil y dispositivos como computadoras y tabletas; 4) contiene herramientas de planificación de servicios de ruta abierta, como “OpenRouteService” (ORS, por sus siglas en inglés) (OpenStreetMap, 2021), etc. A continuación, se muestra una imagen de OSM:

Figura 10. Micrositio de OSM



Fuente: (OpenStreetMap, 2021).

Cabe resaltar que los datos del proyecto OpenStreetMap se pueden usar en aplicaciones para el cálculo de rutas óptimas para vehículos y peatones, mediante métodos de optimización descritos anteriormente, ya que contiene herramientas informáticas y servicios que lo convierten en una fuente de datos factible para proyectos complejos, razón por la cual se empleó para el presente trabajo.

3.4. Metodología de la implementación de un GIS

Mediante el uso de QGIS se aplicaron los métodos de optimización A* y TSP para optimizar el tiempo o la distancia en las rutas de transporte de la empresa láctea, desde su centro de distribución hacia los supermercados en CDMX, con el fin de distribuir productos lácteos. Se siguieron los pasos que a continuación se describen:

1. Se utilizó el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas y el filtro de “*Comercio al por menor*” para localizar los supermercados ubicados en la Ciudad de México.
2. Se descargaron las ubicaciones encontradas.
3. Se ocupó el Sistema de Información Geográfica llamado QGIS para observar las ubicaciones anteriormente descargadas y asegurar que estuvieran colocadas correctamente en el mapa.
4. En QGIS se ocupó un segundo filtro para identificar los supermercados existentes en la CDMX.
5. Asimismo, en QGIS se insertó la ubicación de la bodega de la empresa láctea localizada en CDMX, que funge como punto inicial y final de las rutas.
6. Después, se creó una cuenta en la página web de “*OpenRouteSevice*”, la cual es parte del proyecto colaborativo “*OpenStreetMap*” y es la implementación de dos métodos de optimización: A* y el problema del viajante.
7. En QGIS se descargó un complemento de ORS llamado “*ORS tools*”, en el que se insertaron los datos necesarios para generar las rutas de traslado (Modo de viaje terrestre, preferencia de viaje, método de optimización, etc.). Cabe enfatizar que en la preferencia se elige entre la ruta más rápida o la más corta para optimizar el tiempo o la distancia, según sea el caso, ya que son criterios de evaluación del transporte útiles para calcular indicadores clave de rendimiento.
8. Los métodos de optimización antes mencionados se aplicaron a distintas situaciones, razón por la que se crearon tres modelos diferentes para comparar los resultados entre ellos, como se observa en la siguiente tabla. Es importante mencionar que el “modelo base” y el “modelo de un solo viaje” son referencias que han sido considerados para fines comparativos, por otro lado, el “modelo segmentado” constituye el propuesto para la presente investigación.

Tabla 8. Modelos utilizados para optimizar rutas de transporte terrestre

Modelo	Descripción
Modelo base	Se basa en visitar los supermercados y volver al centro de distribución de la empresa láctea cada que se asiste a una de ellas, por lo tanto, se tienen “ n ” viajes donde “ n ” es el número de supermercados que se deben visitar. Los resultados derivados de este modelo son los mínimos por superar.
Modelo segmentado	Consiste en clasificar en tres zonas (sur, oriente y poniente) a las alcaldías de la CDMX con establecimientos de una cadena mexicana de supermercados, con la finalidad de repartir las entregas en tres rutas diferentes.
Modelo de un solo viaje	Se basa en el principio de enviar un solo viaje (“ n ” = 1) que atienda todos los supermercados y, una vez hecho, regrese al centro de distribución de la empresa láctea. Es el modelo teóricamente ideal.

9. El paso anterior se repitió dos veces para los tres modelos diferentes, con el objetivo de obtener la ruta más corta y la ruta más rápida en cada modelo.
10. Se le dio diseño a cada trayecto creado en los mapas y se analizó la información.

CAPÍTULO 4. Resultados y análisis de resultados

En el DENUÉ se localizaron en total 57 tiendas de una cadena mexicana de supermercados en la CDMX y la bodega de la empresa láctea en la alcaldía Iztapalapa. Cabe señalar que los resultados y las rutas que se presentan en este capítulo se generaron en QGIS y que dependen de factores como el número de supermercados, la distancia a la que se ubican, los límites de velocidad en avenidas y calles, así como al sentido de la dirección. Dado lo anterior, a continuación, se exponen los resultados y análisis de resultados de los tres modelos aplicados:

4.1. Modelo base

Los datos de la siguiente tabla manifiestan que la ruta más corta recorre 23.348 km menos que la ruta más rápida, por lo tanto, existe una reducción de kilometraje, lo que permite determinar el uso que se le ha dado al camión. Sin embargo, referente al tiempo, la ruta más rápida ahorra 44.974 horas en comparación con la ruta más corta, por lo que en términos de productividad y uso de combustible resulta ser más eficiente porque se puede entregar más mercancía en menor tiempo, disminuir costos y tener disponibilidad de las unidades de transporte.

No obstante, es preciso tener presente que este modelo no resulta práctico porque implica viajes innecesarios que provocan que el tiempo y la distancia se dupliquen (ida y vuelta por cada supermercado visitado) y que se genere una ineficiencia derivada de interrumpir la ruta de reparto cuando existe capacidad de continuar, razón por la que no es posible calcular las distancias y tiempos óptimos entre los establecimientos de los supermercados. Además, QGIS lo cataloga como un problema complejo, lo que significa que el tiempo que utiliza para su resolución es mayor que otros problemas simples y es incapaz de trazar la solución en el mapa debido a la gran cantidad de datos.

Tabla 9. Resultados de la ruta más rápida y la ruta más corta en la CDMX, con el modelo base

Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)
Más rápida	1649.594	29.729
Más corta	1626.246	74.703

Nota: Datos obtenidos con la información del anexo.

4.2. Modelo segmentado

La complejidad del modelo base fue el motivo por el que se propuso segmentar en tres zonas a las alcaldías de la CDMX con establecimientos de una cadena mexicana de supermercados y utilizar tres rutas diferentes de reparto, con la limitante de que en cada grupo segmentado solo es posible considerar 50 ubicaciones como máximo. Las alcaldías se clasificaron de la siguiente manera, en las que se localizaron en total 8 supermercados en el sur, 25 en el oriente y 24 en el poniente:

- **Zona sur:** Tlalpan, Xochimilco y Coyoacán.
- **Zona oriente:** Iztacalco, Iztapalapa, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero.
- **Zona poniente:** Álvaro Obregón, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Azcapotzalco.

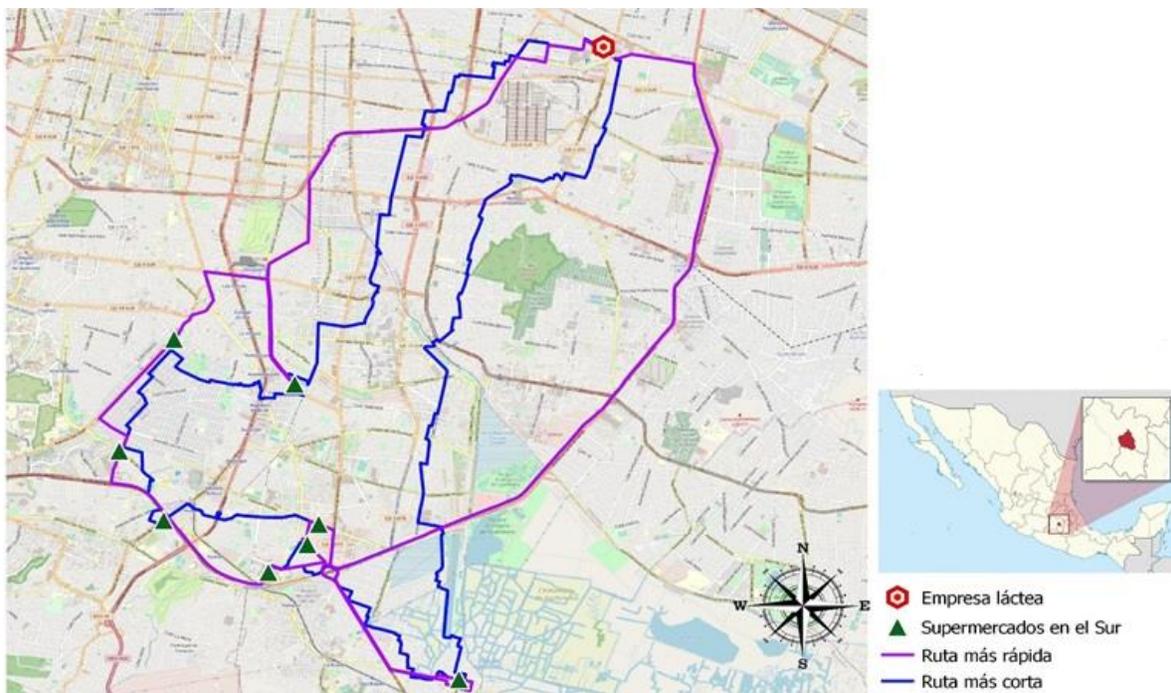
Tabla 10. Resultados de las rutas más rápidas y las rutas más cortas en la CDMX, con el modelo segmentado

Zona	Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)
Sur	Más rápida	55.451	1.074
	Más corta	54.758	1.572
Oriente	Más rápida	115.225	2.269
	Más corta	106.353	2.985
Poniente	Más rápida	110.792	2.220
	Más corta	104.959	2.921
TOTAL	Más rápida	281.468	5.563
	Más corta	266.070	7.478

De acuerdo con los resultados se encontró que, en general, las rutas más rápidas se recorren en menos tiempo, mientras que las rutas más cortas transitan una menor cantidad de kilómetros, como se observa en la tabla. Igualmente, se puede apreciar que las mercancías se entregan en un total de 5.563 horas recorriendo 281.468 km para la ruta más rápida, mientras que la ruta más corta se logra en 7.478 horas transitando 266.070 km, lo que representa una diferencia de 15.398 km y 1.915 horas, tomando ventaja de la distancia la ruta más corta y del tiempo la ruta más rápida.

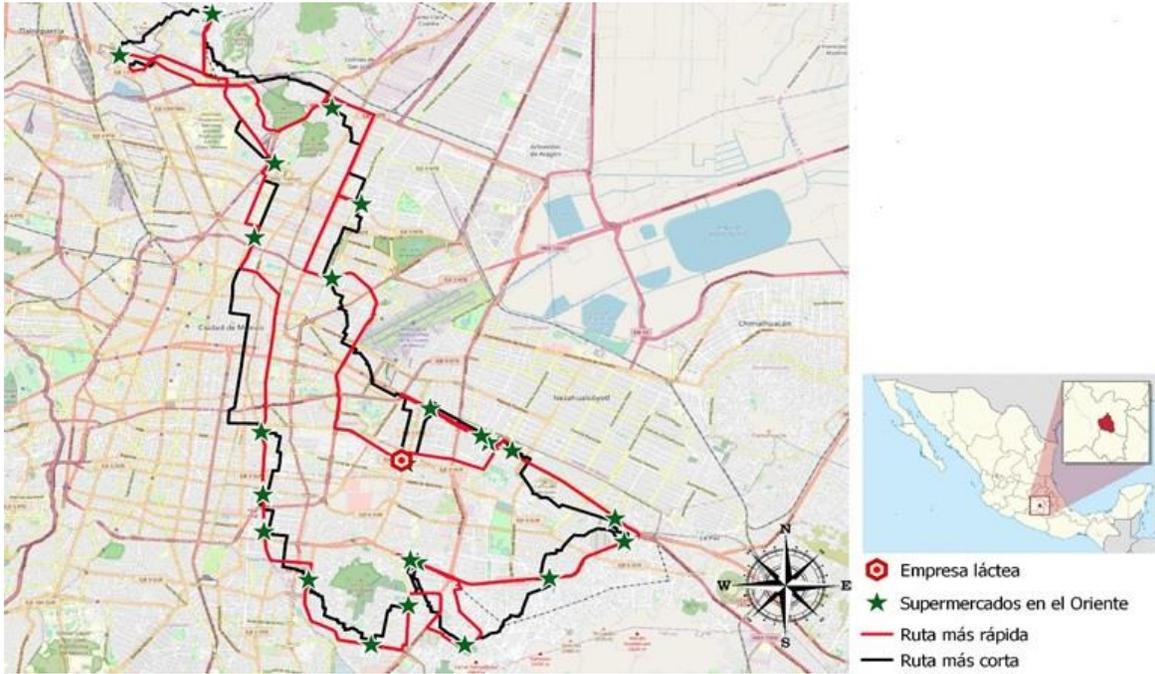
En los siguientes mapas se muestran las rutas más rápidas y las rutas más cortas para la distribución de productos lácteos desde el CEDI de la empresa láctea al sur, oriente y poniente de la CDMX.

Mapa 1. Ruta más rápida y ruta más corta para la zona sur de la CDMX, con el modelo segmentado



Fuente: Elaboración propia en QGIS con datos de (INEGI, 2021b).

Mapa 2. Ruta más rápida y ruta más corta para la zona oriente de la CDMX, con el modelo segmentado



Fuente: Elaboración propia en QGIS con datos de (INEGI, 2021b).

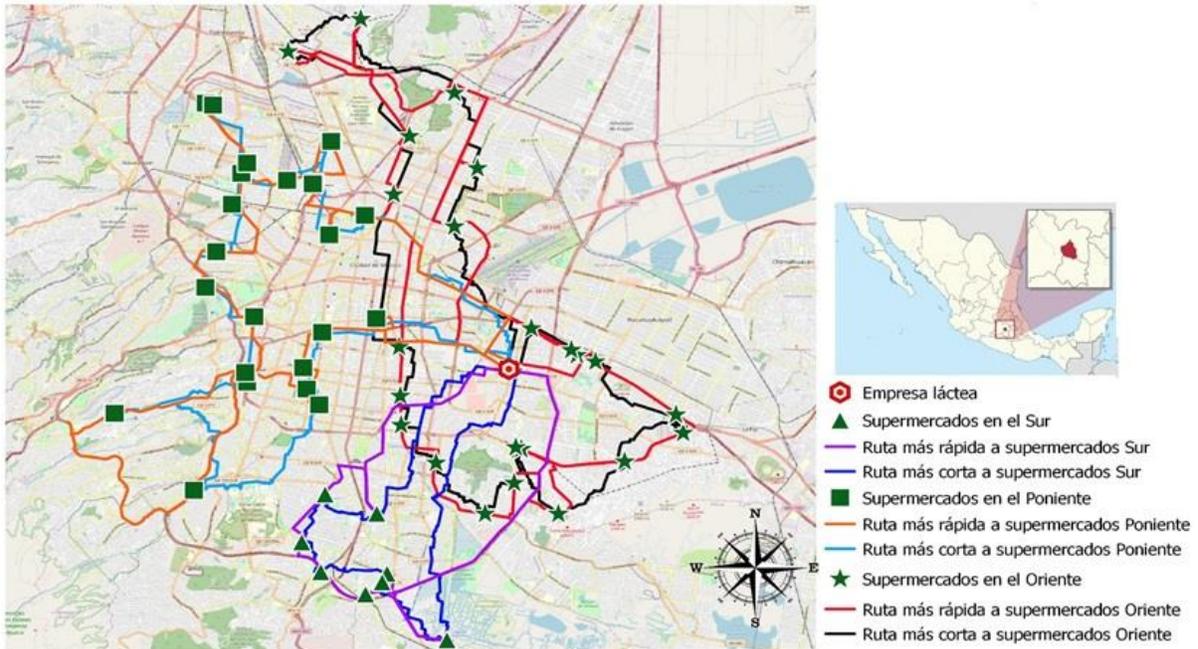
Mapa 3. Ruta más rápida y ruta más corta para la zona poniente de la CDMX, con el modelo segmentado



Fuente: Elaboración propia en QGIS con datos de (INEGI, 2021b).

También se logra apreciar que mientras más supermercados existan por zona, la distancia y el tiempo son mayores y viceversa, sin embargo, como se mencionó antes, no es el único factor que se considera. Las rutas creadas se visualizan en conjunto en el siguiente mapa.

Mapa 4. Rutas más rápidas y rutas más cortas para las zonas sur, oriente y poniente de la CDMX, con el modelo segmentado



Fuente: Elaboración propia en QGIS con datos de (INEGI, 2021b).

4.3. Modelo de un solo viaje

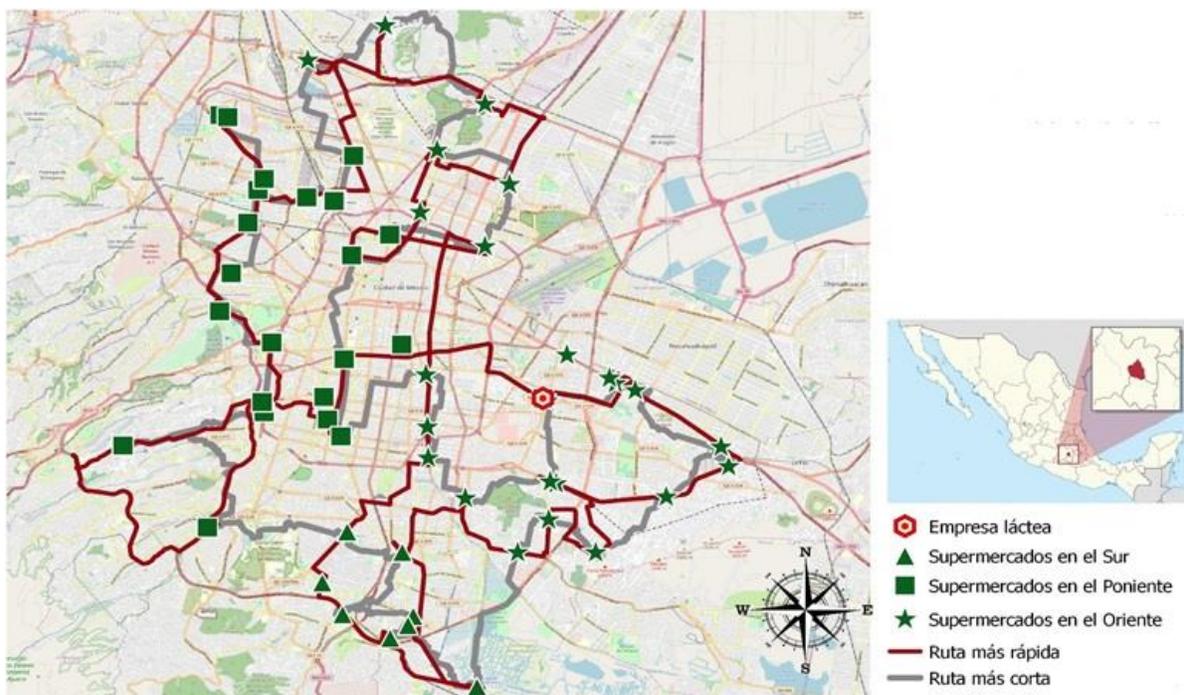
Este modelo es teóricamente más eficiente debido a que se puede ir a cada supermercado en un viaje y solamente regresar una vez, lo que implica un recorrido más directo en tiempo y distancia. Sin embargo, la capacidad de carga disminuye dadas las condiciones y, además, representa una limitante tecnológica ya que el método utilizado en QGIS no es capaz de generar una ruta con más de 50 puntos o ubicaciones debido a que se convertiría en un problema complejo, por lo que solamente se consideraron 50 supermercados de todas las alcaldías. Pese a que los resultados obtenidos están sobrestimados, son aproximadamente comparables con los otros dos modelos y se obtienen rutas óptimas entre los supermercados.

Tabla 11. Resultados de la ruta más rápida y la ruta más corta en la CDMX, con el modelo de un solo viaje

Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)
Más rápida	225.761	4.549
Más corta	207.011	9.759

Como se observa en la tabla, la ruta más rápida tiene una ventaja de 5.210 horas, mientras que la más corta de 18.750 km. No obstante, la elección de ruta se llevará a cabo de acuerdo con las necesidades y prioridades en cuanto a kilometraje recorrido, entregas a tiempo, productividad, disponibilidad del transporte, uso de combustible traducido a costos, etc. En el siguiente mapa se distingue la ruta más rápida y la ruta más corta para la distribución de productos lácteos desde el centro de distribución de la empresa a 50 supermercados ubicadas en diversas alcaldías de la CDMX (modelo de un solo viaje).

Mapa 5. Ruta más rápida y ruta más corta en la CDMX, con el modelo de un solo viaje



Fuente: Elaboración propia en QGIS con datos de (INEGI, 2021b).

4.4. Comparación de los resultados de cada modelo

Como puede notarse en la tabla y las gráficas, el modelo base es el mínimo por mejorar ya que, aun cuando se encuentra optimizado, es el menos eficiente de todos en cuanto a la distancia y el tiempo que se requieren para llevar a cabo las entregas de los productos lácteos. Por otro lado, el modelo de un solo viaje es el extremo al modelo base y, dado que representa teóricamente el “ideal” se busca la aproximación más cercana a los resultados de éste, lo que se pretende con el modelo segmentado.

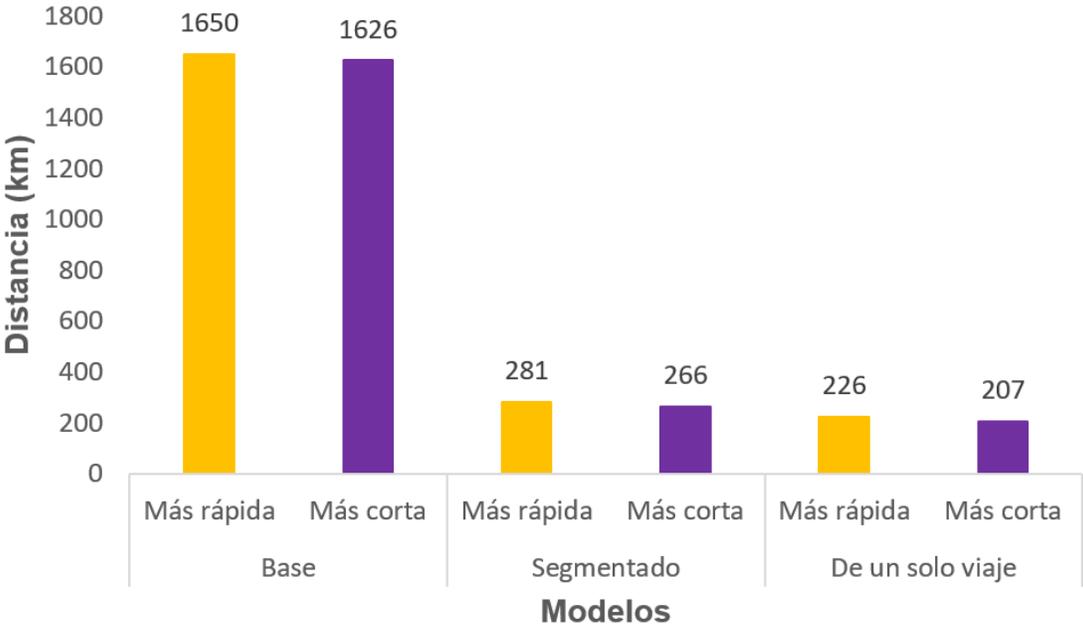
Tabla 12. Resultados de las rutas más rápidas y las rutas más cortas en la CDMX, con los diferentes modelos

Modelo	Ruta	Distancia (km)	Tiempo (horas)
Base	Más rápida	1649.594	29.729
	Más corta	1626.246	74.703
Segmentado	Más rápida	281.468	5.563
	Más corta	266.070	7.478
De un solo viaje	Más rápida	225.761	4.549
	Más corta	207.011	9.759

Considerando la distancia, el modelo más conveniente es el de un solo viaje, mientras que, tomando en cuenta el tiempo, el modelo segmentado y el modelo de un solo viaje compiten entre ellos. Ahora bien, combinando el tiempo y la distancia, la ruta más rápida del modelo de un solo viaje es, en términos generales, la más oportuna, aunque cabe recordar que este modelo, dada su limitante tecnológica, solo consideró en su ruta 50 supermercados, mientras que el modelo segmentado comprende tres rutas diferentes para reducir la complejidad y, por consiguiente, se puede optar por utilizar tres camiones y no solo uno, con el fin de ahorrar recursos y aumentar la capacidad de carga que es difícil alcanzar en un solo viaje.

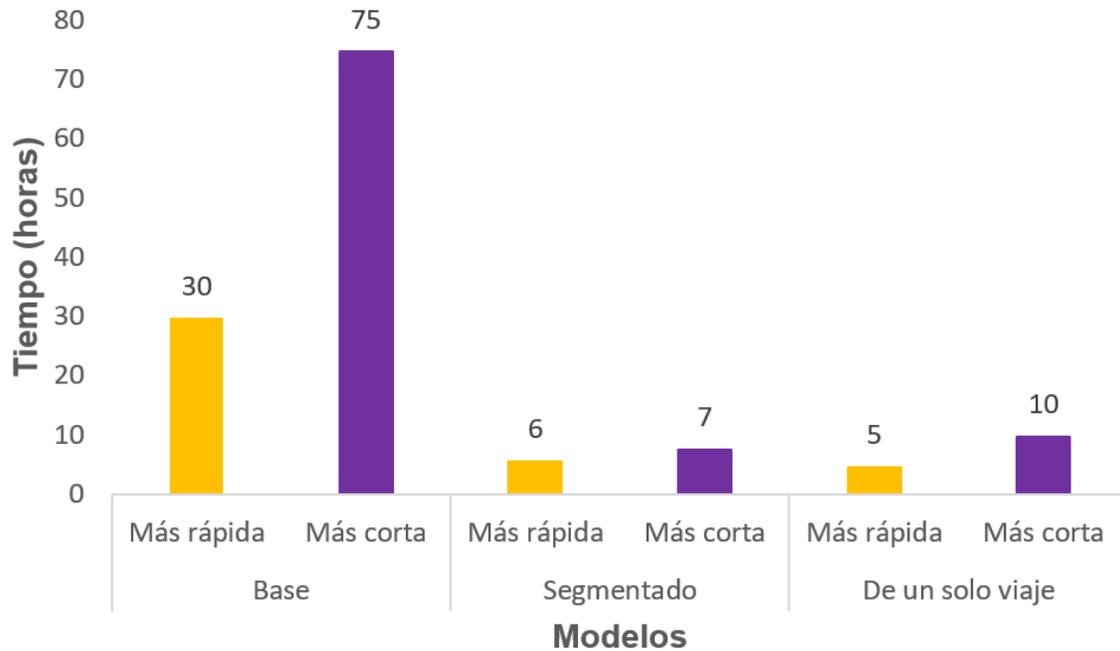
Por lo anterior, se logra superar al modelo base y se infiere que el modelo segmentado es el más apropiado para alcanzar resultados óptimos. Adicionalmente y, como se ha destacado previamente, el tiempo y la distancia son criterios de evaluación del transporte útiles para calcular diversos KPI, razón por la que es crucial optimizarlos.

Gráfica 4. Distancia total recorrida de las rutas más rápidas y las rutas más cortas de cada modelo



Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2021b).

Gráfica 5. Tiempo total de las rutas más rápidas y las rutas más cortas de cada modelo



Fuente: Elaboración propia con datos de (INEGI, 2021b).

4.5. Beneficios y factibilidad de QGIS y el modelo propuesto

En general, los GIS proporcionan una serie de beneficios en el manejo de datos digitales geográficos, por ejemplo: 1) son sencillos de actualizar y fáciles de distribuir; 2) el volumen de información y su almacenamiento facilitan el acceso a la información; 3) ofrecen facilidad y precisión en los análisis; 4) facilitan la conservación de la información; etc., por lo que su uso resulta vital para generar rutas de tránsito que son respaldadas con diferentes métodos y modelos, en cualquier organización con actividades de transporte en las que se busque optimizar diferentes recursos y KPI, de acuerdo con las necesidades de cada empresa.

Por otro lado, es factible utilizar Quantum-GIS porque: 1) es gratuito y no se requiere pagar una licencia; 2) es fácil de usar y la información está disponible; 3) presenta fácil compatibilidad y no requiere de mucha potencia computacional; 4) es adaptable

a las necesidades de cada negocio; 5) tiene la posibilidad de conectar con otros elementos de la industria 4.0 como los sensores, etc. Sin embargo, tiene la desventaja de que su aplicación no es automatizada, ya que es necesario que la información sea recabada con anticipación.

Particularmente, el modelo segmentado propuesto en el presente trabajo genera el beneficio de que los resultados obtenidos se aproximan a los resultados del modelo teóricamente ideal, pero a diferencia de este último, tiene ventajas como: 1) posibilidad de surtir varios supermercados de forma paralela por lo que la capacidad de la carga aumenta; 2) disponibilidad simultánea de unidades de transporte traducido a un servicio al cliente más eficiente; 3) menor desgaste de las unidades al recorrer menos kilómetros y ocupar menos tiempo; 4) posibilidad de personalizar el sistema de acuerdo con las necesidades empresariales (incorporación de tiempos promedio de carga y rutas prohibidas al ser peligrosas) de tal forma que las rutas sean más realistas, etc. Sin embargo, cabe recordar que este modelo está limitado para tener en cuenta solo 50 ubicaciones por cada grupo segmentado.

Dado lo anterior, la aplicación de este modelo en la empresa láctea es crucial por tres razones principales que le favorecen para ser más competitiva: 1) generar rutas óptimas de transporte y con ello mejorar sus KPI; 2) distribuir eficazmente productos lácteos perecederos con una vida de anaquel corta, lo que se puede manifestar en un mayor porcentaje de órdenes perfectas; 3) cumplir la demanda de lácteos de los hogares de la CDMX, traducido en mejor servicio al cliente.

Conclusiones

- Se definió que el transporte terrestre en las organizaciones del sector industrial es crucial porque proporciona los servicios de movimiento, almacenamiento y suministro de productos para hacer posible su consumo, además de que es la variable que impacta más en el costo logístico de una empresa, por lo que un sistema eficiente y económico contribuye a mejorar su posicionamiento en el mercado.
- Se identificaron las tecnologías utilizadas en la industria 4.0, las cuales son: internet de las cosas, internet industrial de las cosas, analítica de *Big Data*, servicios en la nube, inteligencia artificial, automatización y robótica, impresión 3D, realidad aumentada y cadena de bloques, de los que destacan el internet de las cosas y la inteligencia artificial ya que se aplican en los Sistemas Inteligentes de Transporte, como los GIS, que hacen posible una distribución de mercancías eficiente.
- Además, el presente estudio permite responder la pregunta de investigación y comprobar la hipótesis planteada: La aplicación de tecnologías de la Industria 4.0, concretamente un Sistema de Información Geográfica como herramienta para la administración del transporte en el área logística, permite y facilita generar rutas de traslado óptimas de una empresa láctea en CDMX, ya que disminuye tiempo y distancia recorridos que son elementos críticos en la distribución de productos perecederos. Cabe destacar que en el mercado existe una amplia variedad de GIS y su elección gira en torno a la obtención de mejores resultados al mínimo costo total.
- Las rutas óptimas de la empresa láctea en CDMX se realizaron en QGIS como Sistema de Información Geográfica. Esto se llevó a cabo con los métodos de optimización A* y TSP aplicados a tres distintas situaciones o modelos, de los cuales; dos de ellos fueron de referencia para fines comparativos, mientras que el otro constituyó el propuesto para la presente investigación, el cual resultó ser el más apropiado para obtener rutas más rápidas y, también, rutas más cortas.

- Se determinó que los beneficios de la aplicación de QGIS para generar rutas en el transporte terrestre son: fácil acceso a la información y actualización de datos, precisión en los análisis, gestión y optimización del tiempo y distancia. Con esto se logran mejorar KPI como la productividad, consumo de combustible, costos operativos, etc., y tomar decisiones operativas fundamentales para desarrollar ventajas competitivas y conseguir que una empresa tenga mayor potencial. También se determinó que su aplicación es factible porque es gratuito y de código abierto, de fácil compatibilidad y adaptable a los requerimientos de cada negocio, posibilitando su uso a las empresas con actividades de transporte.

Recomendaciones

Conforme a lo declarado en el presente estudio y en virtud de que se ha fundamentado que el uso de un Sistema de Información Geográfica es crucial para generar rutas de transporte óptimas, se recomienda aplicarlo como herramienta para la administración del transporte en el área logística, de modo que se obtengan ventajas competitivas. Asimismo, y como trabajo futuro para la generación de rutas con información adicional que las mejore en términos de eficiencia, seguridad, calidad, etc., se sugiere complementar la investigación incorporando:

- Una combinación de métodos de optimización y herramientas que permitan una sinergia con lo presentado anteriormente y que consideren datos como tiempo de carga, rutas peligrosas, día y hora de traslado, tránsito, etc. Por ejemplo, el método “*Dijkstra*” que también determina el camino más corto del punto de origen a los puntos de destino, y herramientas como *Google maps* y *Waze* que son aplicaciones sociales que ofrecen imágenes de mapas y las características antes dichas.
- Sensores con la finalidad de conectar el ruteo con el sistema de refrigeración y tránsito en tiempo real.

Lo anterior permite utilizar el Internet de las cosas como tecnología de la Industria 4.0 para aprovechar mejor los datos espaciales en tiempo real y tomar decisiones operativas esenciales, como la supervisión remota de activos, el mantenimiento predictivo y la optimización de procesos (ESRI, 2021).

Anexo

Tabla 13. Resultados de la ruta más rápida en la CDMX, con el modelo base.

Origen (Empresa láctea)	Destino (Super-mercados)	Tiempo (horas)	Distancia (km)
1	1	0.123	7.276
1	2	0.251	16.524
1	3	0.337	19.804
1	4	0.185	10.224
1	5	0.450	22.063
1	6	0.297	15.090
1	7	0.239	12.510
1	8	0.230	11.862
1	9	0.342	21.140
1	10	0.210	11.030
1	11	0.315	22.155
1	12	0.177	7.850
1	13	0.242	10.942
1	14	0.171	10.810
1	15	0.240	14.925
1	16	0.264	18.184
1	17	0.116	4.438
1	18	0.198	10.217
1	19	0.126	6.100
1	20	0.372	21.179
1	21	0.146	6.254
1	22	0.318	14.483
1	23	0.400	25.034
1	24	0.337	16.465
1	25	0.402	25.039
1	26	0.361	21.848
1	27	0.254	12.987
1	28	0.371	18.748
1	29	0.181	9.073
1	30	0.188	9.401

Origen (Empresa láctea)	Destino (Super-mercados)	Tiempo (horas)	Distancia (km)
1	31	0.372	18.766
1	32	0.333	16.374
1	33	0.165	7.708
1	34	0.143	6.497
1	35	0.342	17.172
1	36	0.296	20.095
1	37	0.255	14.915
1	38	0.240	14.669
1	39	0.213	10.128
1	40	0.138	5.494
1	41	0.324	18.589
1	42	0.226	10.814
1	43	0.271	17.384
1	44	0.116	5.030
1	45	0.294	17.320
1	46	0.344	22.553
1	47	0.160	10.122
1	48	0.360	21.437
1	49	0.010	0.311
1	50	0.247	12.521
1	51	0.157	6.435
1	52	0.333	16.906
1	53	0.474	29.632
1	54	0.140	5.851
1	55	0.321	21.727
1	56	0.280	13.342
1	57	0.467	29.352
TOTAL (IDA Y VUELTA)		29.729	1649.594

Tabla 14. Resultados de la ruta más corta en la CDMX, con el modelo base.

Origen (Empresa láctea)	Destino (Super- mercados)	Tiempo (horas)	Distancia (km)
1	1	0.215	4.732
1	2	0.741	16.294
1	3	0.883	19.235
1	4	0.432	9.453
1	5	1.170	25.191
1	6	0.656	14.303
1	7	0.610	13.292
1	8	0.505	10.974
1	9	0.875	18.711
1	10	0.481	10.590
1	11	0.809	17.417
1	12	0.385	8.407
1	13	0.545	11.979
1	14	0.437	9.514
1	15	0.678	14.834
1	16	0.793	17.447
1	17	0.201	4.413
1	18	0.548	12.058
1	19	0.323	6.583
1	20	1.017	22.338
1	21	0.151	3.042
1	22	0.727	15.189
1	23	1.129	24.668
1	24	0.776	16.944
1	25	1.120	24.466
1	26	0.930	20.280
1	27	0.621	13.526
1	28	0.887	19.372
1	29	0.380	8.329
1	30	0.449	9.879
1	31	0.888	19.391
1	32	0.770	16.818
1	33	0.391	8.549
1	34	0.311	6.806
1	35	0.828	18.095
1	36	0.843	18.085
1	37	0.745	16.347
1	38	0.701	15.319

Origen (Empresa láctea)	Destino (Super- mercados)	Tiempo (horas)	Distancia (km)
1	39	0.558	12.229
1	40	0.282	5.895
1	41	0.926	20.279
1	42	0.551	12.108
1	43	0.766	16.827
1	44	0.206	4.512
1	45	0.958	21.021
1	46	0.886	19.353
1	47	0.389	8.548
1	48	0.932	20.330
1	49	0.024	0.445
1	50	0.595	12.974
1	51	0.346	7.623
1	52	0.791	17.271
1	53	1.158	25.084
1	54	0.226	4.535
1	55	0.958	21.023
1	56	0.706	15.394
1	57	1.146	24.803
TOTAL (IDA Y VUELTA)		74.703	1626.246

Lista de figuras, gráficas y mapas

Figura 1. Participantes en una cadena de suministro	19
Figura 2. Procesos de una cadena de suministro.....	20
Figura 3. Aspectos considerados en el Índice de Desempeño Logístico	25
Figura 4. Las Revoluciones Industriales.....	31
Figura 5. Captura de pantalla de QGIS para escritorio.....	45
Figura 6. Nodos y enlaces en un sistema de logística.....	48
Figura 7. El problema del viajante.....	49
Figura 8. La ruta más corta y la ruta más rápida	50
Figura 9. Micrositio del DENUÉ.....	52
Figura 10. Micrositio de OSM.....	53
<hr/>	
Gráfica 1. Producción nacional de la leche de bovino	16
Gráfica 2. Comparación del desempeño logístico promedio de México con la mejor puntuación en el mundo, 2018.....	25
Gráfica 3. Clasificación de los factores de la competitividad digital de México, 2021	34
Gráfica 4. Distancia total recorrida de las rutas más rápidas y las rutas más cortas de cada modelo.....	63
Gráfica 5. Tiempo total de las rutas más rápidas y las rutas más cortas de cada modelo	64
<hr/>	
Mapa 1. Ruta más rápida y ruta más corta para la zona sur de la CDMX, con el modelo segmentado.....	58
Mapa 2. Ruta más rápida y ruta más corta para la zona oriente de la CDMX, con el modelo segmentado.....	59
Mapa 3. Ruta más rápida y ruta más corta para la zona poniente de la CDMX, con el modelo segmentado.....	59
Mapa 4. Rutas más rápidas y rutas más cortas para las zonas sur, oriente y poniente de la CDMX, con el modelo segmentado.....	60
Mapa 5. Ruta más rápida y ruta más corta en la CDMX, con el modelo de un solo viaje .	61

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de canales según su longitud.....	23
Tabla 2. Características de las capacidades modales	28
Tabla 3. Tecnologías que caracterizan a la Cuarta Revolución Industrial	32
Tabla 4. Aplicaciones de planificación, ejecución y de análisis en los TMS	36
Tabla 5. Criterios de evaluación del transporte.....	40
Tabla 6. Métricas comunes de transporte.....	41
Tabla 7. Comparación entre QGIS y ArcGIS	46
Tabla 8. Modelos utilizados para optimizar rutas de transporte terrestre	55
Tabla 9. Resultados de la ruta más rápida y la ruta más corta en la CDMX, con el modelo base.....	57
Tabla 10. Resultados de las rutas más rápidas y las rutas más cortas en la CDMX, con el modelo segmentado	57
Tabla 11. Resultados de la ruta más rápida y la ruta más corta en la CDMX, con el modelo de un solo viaje.....	61
Tabla 12. Resultados de las rutas más rápidas y las rutas más cortas en la CDMX, con los diferentes modelos	62
Tabla 13. Resultados de la ruta más rápida en la CDMX, con el modelo base.....	69
Tabla 14. Resultados de la ruta más corta en la CDMX, con el modelo base.....	70

Referencias

- Ballou, R. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*. (5ta ed.). Pearson. Prentice Hall.
- Banco de México. (Julio - septiembre de 2016). *Encuesta Mensual de Actividad Económica Regional*. Recuperado el 25 de septiembre de 2021, de Reporte sobre las economías regionales: <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/reportes-sobre-las-economias-regionales/%7B674C1732-3969-5FD1-03F2-A1AFC510A8F0%7D.pdf>
- Bowersox, D., Closs, D., & Cooper, M. (2007). *Administración y logística* (2a ed.). McGraw Hill.
- Business Insider Intelligence. (2019). *How Wise Systems helped Anheuser - Busch reduce late deliveries by 80%*.
- Calatayud, Agustina. (Marzo de 2017). *IDB. Inter-American Development Bank*. Obtenido de The Connected Supply Chain. Enhancing Risk Management in a Changing World: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/The-Connected-Supply-Chain-Enhancing-Risk-Management-in-a-Changing-World.pdf>
- Calatayud, Agustina; Katz, Raúl. (2019). *Cadena de suministro 4.0. Mejores prácticas Internacionales y hoja de ruta para América Latina*. Banco Interamericano de Desarrollo. doi:<http://dx.doi.org/10.18235/0001956>
- Calviño Martínez, A. (2011). *Cooperación en los problemas del viajante (TSP) y de rutas de vehículos (VRP): una panorámica*. Recuperado el 27 de octubre de 2021, de http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/ProyectosFinMaster/Proyecto_762.pdf
- CANACAR. (2021). *Cámara Nacional del Autotransporte de Carga*. Recuperado el 24 de septiembre de 2021, de Agenda Económica del Autotransporte de Carga: <https://canacar.com.mx/servicios/estadistica/agenda-economica-del-autotransporte-carga-2021/>

- CANILEC. (Enero - marzo de 2020). *Cámara Nacional de Industriales de la Leche*. Recuperado el 5 de noviembre de 2021, de Lacticinios. Los lácteos son salud: <https://www.canilec.org.mx/wp-content/uploads/2020/04/LACTICINIOS-1-2020.pdf>
- CANILEC. (Enero - mayo de 2021a). *Cámara Nacional de Industriales de la Leche*. Recuperado el 30 de agosto de 2021, de Nuevo boletín de la leche: <https://www.canilec.org.mx/wp-content/uploads/2021/07/Nuevo-Bolet%C3%ADn-de-la-Leche-ene-may2021-corregido.pdf>
- CANILEC. (Enero - marzo de 2021b). *Cámara Nacional de Industriales de la Leche*. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de Lacticinios. Foro: perspectivas del mercado de los lácteos: <https://www.canilec.org.mx/wp-content/uploads/2021/03/REVISTA-LACTICINIOS-1-DE-2021.pdf>
- CARTO. (2019). *On-demand last mile transportation: Real-time route optimization with Location Intelligence*. Recuperado el 3 de febrero de 2022, de <https://carto.com/blog/last-mile-transportation-route-optimization/>
- CARTO. (2022). *About us*. Recuperado el 3 de febrero de 2022, de <https://carto.com/about-us/>
- CEPAL. (2012). *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Recuperado el 4 de octubre de 2021, de Las tecnologías de la información y de las comunicaciones (TIC) y el desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: experiencias e iniciativas de política: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/7062-tecnologias-la-informacion-comunicaciones-tic-desarrollo-sostenible-america>
- CEPAL. (Abril de 2020). *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Recuperado el 27 de septiembre de 2021, de La revolución industrial 4.0 y el advenimiento de una logística 4.0: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45454-la-revolucion-industrial-40-advenimiento-logistica-40>

- Chase, R., & Jacobs, R. (2019). *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros*. (15a ed.). McGraw-Hill Education.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2013). *Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación*. (5ta ed.). Pearson.
- Council of Supply Chain Management Professionals. (2013). *CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary*. Recuperado el 10 de septiembre de 2021, de https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx
- Coyle, J. J., Langley, C. J., Novack, R. A., & Gibson, B. J. (2018). *Administración de la cadena de suministro. Una perspectiva logística* (10a ed.). Cengage Learning. Obtenido de <https://elibro-net.pbidi.unam.mx:2443/es/lc/unamdgb/titulos/93288>
- Dahiya, C., & Sangwan, S. (2018). Literature Review on Travelling Salesman Problem. *International Journal of Research*, 1152 - 1155. Recuperado el 26 de octubre de 2021, de https://www.researchgate.net/publication/341371861_Literature_Review_on_Travelling_Salesman_Problem
- DOF. (19 de enero de 2015). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 2 de febrero de 2022, de Norma Oficial Mexicana NOM-068-SCT-2-2014. Transporte terrestre, condiciones físico - mecánicas y de seguridad: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5378850&fecha=19/01/2015
- DOF. (26 de diciembre de 2017). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 2 de febrero de 2022, de Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017. Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508944&fecha=26/12/2017#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D012,de%20comunicaci%C3%B3n%20de%20jurisdicci%C3%B3n%20federal

- ESRI. (2010). Using GIS in Strategic Planning and Execution at FedEx Express. *International User Conference*.
- ESRI. (2021). *Velocidad de ArcGIS*. Recuperado el 8 de noviembre de 2021, de <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-velocity/overview>
- Faiz, S., & Krichen, S. (2013). *Geographical Information Systems and Spatial Optimization*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
- FAO. (Abril de 2021). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado el 30 de agosto de 2021, de Dairy Market Review: <http://www.fao.org/3/cb4230en/cb4230en.pdf>
- FAOSTAT. (2021). *Food and Agriculture Data. Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Recuperado el 30 de agosto de 2021, de Cultivos y productos de ganadería: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Fuente, Ó. (24 de enero de 2018). *Innovation & Entrepreneurship Business school*. Recuperado el 29 de septiembre de 2021, de ¿Qué es la transformación digital y cómo crear Digital Business?: <https://www.iebschool.com/blog/que-es-transformacion-digital-business/>
- Gibson, B. (2018). Métricas comunes de transporte. En J. Coyle, C. Langley, R. Novack, & B. Gibson, *Administración de la cadena de suministro. Una perspectiva logística* (10a ed.). Cengage Learning. Obtenido de <https://elibro-net.pbidi.unam.mx:2443/es/lc/unamdgb/titulos/93288>
- GIS Lounge. (2012). *QGIS versus ArcGIS*. Recuperado el 25 de octubre de 2021, de <https://www.gislounge.com/qgis-versus-arcgis/>
- Heizer, J., Rennder, B., & Munson, C. (2017). *Operations Management. Sustainability and Supply Chain Management*. Pearson.
- IMD. (2021). *International Institute for Management Development*. Recuperado el 1 de octubre de 2021, de Digital Competitiveness Ranking: <https://worldcompetitiveness.imd.org/countryprofile/MX/digital>
- INEGI. (2020a). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera: <https://www.inegi.org.mx/programas/emim>

- INEGI. (2020b). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de Producto Interno Bruto Trimestral: <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.aspx?pr=18&vr=1&in=2&tp=20&wr=1&cno=2>
- INEGI. (Mayo de 2021a). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Recuperado el 30 de octubre de 2021, de Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas. DENU: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463901150.pdf
- INEGI. (2021b). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Recuperado el 30 de octubre de 2021, de Directorio de empresas y establecimientos: <https://www.inegi.org.mx/temas/directorio/>
- Katz, R., Dougall, P., de Urquiza, S., & Fish, R. (2017). *Digital Ecosystems. Innovation and disruption in Latin America*. Recuperado el 25 de septiembre de 2021, de http://www.teleadv.com/wp-content/uploads/Digital_Ecosystems.pdf
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2008). *Administración de operaciones. Procesos y cadenas de valor* (8va ed.). Pearson Educación. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/566458/Administracion_De_Operaciones_-_LEE_J._K-comprimido.pdf
- L. Ailawadi, K., & W. Farris, P. (2020). Distribution Channels Today. En *Getting Multi-Channel Distribution Right* (1era ed., págs. 1-11). John Wiley & Sons, Inc.
- Lucila Acosta, A. (2017). Canales de distribución. Bogotá: AREANDINA. Fundación Universitaria del Área Andina. Recuperado el 18 de octubre de 2021, de <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/1270>
- Mapbox. (2022). *Saucey*. Recuperado el 3 de febrero de 2022, de <https://www.mapbox.com/showcase/saucey>
- McKinsey & Company. (6 de abril de 2017). Recuperado el 6 de octubre de 2021, de Supply Chain 4.0 en bienes de consumo: <https://www.mckinsey.com/industries/consumer-packaged-goods/our-insights/supply-chain-4-0-in-consumer-goods/es-ES>

- Micheli Thiri3n, J. (2020). Pr3logo. En A. Mart3nez Mart3nez, M. 3lvarez Medina, & A. Garc3a Garnica, *Industria 4.0 en M3xico. Elementos diagn3sticos y puesta en pr3ctica en sectores y empresas* (p3g. 14). Plaza y Vald3s S.A. de C.V. Recuperado el 29 de septiembre de 2021, de https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Garnica-2/publication/344125475_Los_retos_de_las_Pymes_en_el_contexto_de_la_industria_40_una_revisi3n_teorica/links/5f53798b458515e96d2f0a57/Los-retos-de-las-Pymes-en-el-contexto-de-la-industria-40-una-revisi3n
- Monde Geospatial. (2017). *ArcGIS vs QGIS – 10 Most Important Differences Between ArcGIS and QGIS*. Recuperado el 25 de octubre de 2021, de <https://monde-geospatial.com/arcgis-vs-qgis-10-most-important-differences-between-arcgis-and-qgis/>
- OECD. (2017). *Organizaci3n para la Cooperaci3n y el Desarrollo Econ3micos*. Recuperado el 25 de septiembre de 2021, de Revisi3n de Regulaci3n del Transporte de Carga en M3xico. Resumen: <https://www.oecd.org/gov/regulatory-policy/Resumen-Regulacion-Transporte-Mexico.pdf>
- OpenStreetMap. (2021). *OpenStreetMap*. Recuperado el 30 de octubre de 2021, de <https://www.openstreetmap.org>
- QGIS. (2020). *Lecci3n: An3lisis de red*. Recuperado el 1 de noviembre de 2021, de https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/training_manual/vector_analysis/network_analysis.html
- QGIS. (2021). *QGIS - El SIG L3der de C3digo Abierto para Escritorio*. Recuperado el 24 de octubre de 2021, de <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>
- Schwab, K. (2016). *World Economic Forum*. Recuperado el 25 de septiembre de 2021, de La Cuarta Revoluci3n Industrial: [http://40.70.207.114/documentosV2/La%20cuarta%20revolucion%20industrial-Klaus%20Schwab%20\(1\).pdf](http://40.70.207.114/documentosV2/La%20cuarta%20revolucion%20industrial-Klaus%20Schwab%20(1).pdf)

- SCT. (2008). *Secretaría de Comunicaciones y Transporte*. Recuperado el 24 de septiembre de 2021, de Glosario:
https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASICA/EST_BASICA_2008/EB2008-12-GLOSARIO.pdf
- SCT. (25 de mayo de 2021). *Secretaría de Comunicaciones y Transporte*. Recuperado el 21 de septiembre de 2021, de Programa Anual de Trabajo 2021 del sector Comunicaciones y Transporte: <https://www.gob.mx/sct/documentos/programa-anual-de-trabajo-2021-del-sector-comunicaciones-y-transportes?idiom=es>
- SGM. (22 de marzo de 2017). *Servicio Geológico Mexicano*. Recuperado el 5 de octubre de 2021, de Sistemas de información geográfica:
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- Shrawan Kr, S., & B. L, P. (Julio de 2015). *Shortest Path Searching for Road Network using A* Algorithm*. Recuperado el 30 de octubre de 2021, de <https://ijcsmc.com/docs/papers/July2015/V4I7201599a23.pdf>
- SIAP. (2019). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo rural*. Recuperado el 14 de septiembre de 2021, de http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecResumen.jsp
- SIAP. (Mayo de 2020). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo rural*. Recuperado el 30 de agosto de 2021, de <http://infosiap.siap.gob.mx/opt/boletlech/Brochure%20Cuarto%20Trimestre%202019.pdf>
- SIGSA. (2022). *SIGSA*. Recuperado el 3 de febrero de 2022, de <https://www.sigsa.info/es-mx/sigsa>
- The World Bank. (2018). *Connecting to Compete 2018 : Trade Logistics in the Global Economy*. Recuperado el 23 de septiembre de 2021, de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29971>
- Thompson, A., Strickland III, A., Janes, A., Sutton, C., Peteraf, M., & Gamble, J. (2018). *Administración estratégica. Teoría y casos* (2a ed.). McGraw Hill.

Uber Engineering. (2015). *ETA Phone Home: How Uber Engineers an Efficient Route*. Recuperado el 22 de octubre de 2021, de <https://eng.uber.com/engineering-routing-engine/>

USDA. (2020). *U.S. Department of Agriculture*. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de Dairy: World Markets and Trade: <https://downloads.usda.library.cornell.edu/usda-esmis/files/5t34sj56t/df65w155w/d791t7732/dairy.pdf>

Wise Systems. (2022). *About Wise Systems*. Recuperado el 3 de febrero de 2022, de <https://www.wisesystems.com/about/>

World Economic Forum. (2019). *The Global Competitiveness Report*. Recuperado el 24 de septiembre de 2021, de http://www3.weforum.org/docs/WEF_TheGlobalCompetitivenessReport2019.pdf