

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



ESCUELA SUPERIOR DE MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD ZACATENCO



“ANÁLISIS DE LAS CAUSAS QUE RETRASAN EL
SERVICIO DE LOS TRENES DE LÍNEA 1 DEL STC
METRO”.

TESIS

Que para obtener el grado de Maestría en Ciencias
en Ingeniería de Sistemas

Presenta:

BEATRIZ ADRIANA TIRO LINARES

Director De Tesis:

M. en C. Efraín José Martínez Ortiz

Ciudad de México, 2018

Resumen

La población mundial se concentra principalmente en las ciudades, este fenómeno se presenta sobre todo en países en desarrollo, trayendo como consecuencia un crecimiento acelerado de transporte urbano. El crecimiento en las zonas urbanas aumentan la problemática ya existente en materia de transporte: congestión vial, accidentes, ruido ambiental, dificultad de acceso, etc.

El transporte público es una alternativa para solucionar la demanda creciente de movilidad, ya que este es más eficiente que los automóviles particulares. Un vehículo de transporte público necesita menos espacio para llevar cierto número de personas que un auto, y si se habla de un vehículo de transporte público masivo y además eléctrico, el beneficio es aún mayor. La mejoría en un sistema de transporte público de una ciudad en términos económicos, políticos y sociales.

En este documento se da inicialmente los antecedentes del STC, desglosando algunos factores que incitaron a pensar en la planeación de un sistema de transporte masivo, por citar algunos: sobrepoblación, congestionamiento vial y la movilidad urbana. Citando la importancia de mejorar el servicio y la calidad de vida usuarios, ya su tiempo de espera en andenes disminuiría de manera significativa.

Abstrac

The world population is concentrated mainly in cities, this phenomenon occurs mainly in developing countries, resulting in an accelerated growth of urban transport. The growth in urban areas increases the existing problems in terms of transport: traffic congestion, accidents, environmental noise, difficulty of access, etc.

Public transport is an alternative to solve the growing demand for mobility, since it is more efficient than private cars. A public transport vehicle needs less space to carry a certain number of people than a car, and if there is talk of a mass public transport vehicle and also electric, the benefit is even greater. The improvement in a public transport system of a city in economic, political and social terms.

This document gives the background of the STC initially, breaking down some factors that led to think about the planning of a mass transport system, to name a few: overpopulation, road congestion and urban mobility. Citing the importance of improving the service and quality of life users, and their waiting time on platforms would decrease significantly

Contenido

| | |
|---|------|
| Resumen | iii |
| Abstrac | iv |
| Contenido | v |
| Índice de tabas | viii |
| Índice de figuras | ix |
| Capítulo 1. | 1 |
| Contexto de la investigación y Justificación | 1 |
| 1.1 Transporte | 2 |
| 1.1.2 Contexto histórico del transporte | 3 |
| 1.1.3 Importancia económica del transporte..... | 4 |
| 1.1.4 Transporte público | 4 |
| 1.1.5 Transporte público en la ciudad de México | 6 |
| 1.1.4 Transporte como derecho..... | 7 |
| 1.2 Movilidad urbana | 8 |
| 1.3.1 Movilidad urbana en la Ciudad de México..... | 11 |
| 1.3.2 Necesidad de reducción del uso del automóvil | 14 |
| 1.3.3 Transporte férreo | 14 |
| 1.3 Sistema de Transporte Colectivo y su desarrollo | 15 |
| 1.3.1 Incidentes en el STC | 19 |
| 1.4 Justificación | 21 |
| 1.5 Objetivos General y Particulares | 23 |
| 1.5.1 Objetivo General | 23 |
| 1.5.2 Objetivos particulares | 23 |
| Capítulo 2 | 24 |
| Marco Teórico y Metodológico de la investigación | 24 |
| 2.1 Marco Teórico | 24 |
| 2.1.1 Sistémica transdisciplinaria | 24 |
| 2.1.2 Ingeniería de Sistemas | 26 |
| 2.1.3 Estadística..... | 26 |
| 2.1.4 Regresión Lineal Múltiple..... | 27 |

| | | |
|--------------|--|----|
| 2.1.5 | Calidad | 31 |
| 2.2 | Metodología de la investigación | 33 |
| 2.2.1 | Fase I. Definición del problema | 33 |
| 2.2.2 | Fase II. Construcción del modelo | 34 |
| 2.2.3 | Fase III. Simulación y/u Optimización | 35 |
| 2.2.4 | Fase IV. Evaluación | 36 |
| 2.2.5 | Fase V. Implementación | 36 |
| 2.2.5 | Fase VI. Control y retroalimentación..... | 36 |
| Capítulo 3 | | 38 |
| Modelación | | 38 |
| 4.1.1 | Conocimiento del Medio Ambiente general y particular | 38 |
| | Recolección y análisis de datos | 42 |
| | Elección de las variables..... | 48 |
| | Construcción del modelo | 49 |
| | Construcción del modelo | 50 |
| | Interpretación de los resultados | 50 |
| | Interpretación de los datos de la solución | 55 |
| | Validar el modelo | 57 |
| Conclusiones | | 62 |
| Glosario | | 63 |
| Referencias | | 64 |

Índice de tabas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Ranking de ciudades con más congestión vehicular en el mundo. | 3 |
| Tabla 2. Tiempos de recorrido en la Zona Metropolitana del Valle de México. | 13 |
| Tabla 3. Incidentes relevantes que retrasan el servicio en línea 1 | 47 |
| Tabla 4. Variables por considerar en el modelo. | 49 |
| Tabla 5. Regresión con las cuatro variables propuestas. | 51 |
| Tabla 6. Regresión con solo tres de las variables propuestas. | 55 |

Índice de Gráficas

| | |
|--|----|
| Gráfica 1. Viajes promedió que un habitante hace en un día..... | 10 |
| Gráfica 2. Entidades de México que presentan una mayor densidad poblacional..... | 12 |
| Gráfica 3. Comparación entre crecimiento poblacional y pasajeros transportados por el STC y el Metrobús..... | 13 |
| Gráfica 4. Acumulado de minutos de retardo por línea del 2008 al 2016..... | 18 |
| Gráfica 5. Tiempo de retraso de líneas 1,2 y 3 por año..... | 19 |
| Gráfica 6. Incidentes registrados en el STC por año del 2008 al 2016..... | 20 |
| Gráfica 7. Incidentes registrados en el STC por año del 2008 al 2016..... | 21 |
| Gráfica 8. Curva de Regresión Lineal..... | 28 |
| Gráfica 9. Minutos acumulados de retardo por línea..... | 40 |
| Gráfica 10. Gráfico de Pareto de retrasos del 2018..... | 42 |
| Gráfica 11. Gráfico de Pareto de retrasos del 2009..... | 43 |
| Gráfica 12. Gráfico de Pareto de retrasos del 2010..... | 43 |
| Gráfica 13. Gráfico de Pareto de retrasos del 2011..... | 44 |
| Gráfica 14. Gráfico de Pareto de retrasos del 2012..... | 44 |
| Gráfica 15. Gráfico de Pareto de retrasos del 2013..... | 45 |
| Gráfica 16. Gráfico de Pareto de retrasos del 2014..... | 45 |
| Gráfica 17. Gráfico de Pareto de retrasos del 2015..... | 46 |
| Gráfica 18. Gráfico de Pareto de retrasos del 2016..... | 46 |

Capítulo 1.

Contexto de la investigación y Justificación

Dentro del marco de las ingenierías se ubica a la Ingeniería de sistemas, como una rama que tiene como objeto el estudio y análisis de los sistemas: la gestión, diseño, implantación, optimización de recursos; con el uso de inteligencia artificial, investigación operacional, creación de modelos y control de procesos en conjunto con una serie de herramientas de apoyo para lograr su fin.

La ingeniería de sistemas es una disciplina relativamente nueva, ya que su existencia no sobrepasa el medio siglo. Sin embargo, a penetrado en diversos campos de investigación de ciencia y tecnología (Jaime, 1992). Así mismo Victor M. y Martha Z. (2007) en su *Análisis de sistemas de Transportes* mencionan:

“La Ingeniería de Sistemas, que ha contribuido al desarrollo de técnicas de planificación, diseño y explotación de los sistemas de transporte, para hacerlos más eficientes y eficaces, al optimizarse los recursos disponibles. Esta disciplina, además, ha hecho posible la integración de los modos de transporte, mediante su interacción ordenada (transportación intermodal y multimodal), lo cual evita competencias inútiles y un mejor aprovechamiento de las características de cada uno de ellos”.

En esta investigación, mediante un enfoque sistémico se buscan aplicaciones ingenieriles en el área de planeación y calidad, en beneficio de los usuarios de la línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo. Esta línea no sólo es una de las más concurridas, sino también presenta un aumento en los incidentes que retrasan el recorrido normal de trenes. Este trabajo busca desmenuzar la información recabada, identificando elementos del sistema que pudieran afectar de forma directa o indirecta este retraso.

1.1 Transporte

Tras la primera revolución industrial que permitió la invención de la tecnología de vapor, surgió la industria ferroviaria. La segunda revolución industrial con producción en masa permitió el surgimiento de la industria del automóvil y, más cerca de nosotros, la tercera revolución industrial con digitalización permitió el surgimiento de viajes asistidos por computadora (por ejemplo, GPS en un automóvil).

Actualmente se tiene un nuevo reto para la evolución del transporte y es la falta y/o envejecimiento de infraestructura. La infraestructura y el transporte conectan a las personas con su lugar de trabajo o la escuela, además de permitir la distribución de los bienes y servicios. Es por ello que, en las ciudades más grandes, los organismos de planeación y gestión de transportes buscan alternativas para mejorar la calidad y eficiencia de este servicio. Pero ¿Qué es transporte? ¿Cómo definirlo?

Diferentes autores han propuesto una definición de “transporte”, sin embargo se han tomado las definiciones más cercanas a la intención de este trabajo. A continuación se mencionan algunas:

- "Es el traslado de un sitio a otro, de personas y mercancías, motivado por el hecho de que están en un lugar pero se necesitan en otro." (Thompson, 1976).
- "Es el traslado de un sitio a otro, de personas y mercancías, motivado por el hecho de que están en un lugar, pero se necesitan en otro." (Thompson, 1976).
- “Debe quedar muy claro que el transporte es una variable derivada de otras necesidades principales”. (Ruiz, 2007).

El transporte es vital importancia ya que permite la satisfacción de las necesidades como la salud, la educación, el trabajo, la industria, la comunicación y transmisión de conocimiento, y ocio. Pero la falta de planeación de un sistema de transporte que funcione acorde a las necesidades de la población ha ocasionado serios problemas de tránsito, tráfico y movilidad.

La congestión es un gran problema para muchas ciudades del mundo, con una congestión de hasta un 13% a nivel mundial desde 2008. Los atascos de tráfico tienen serios efectos en la sociedad que cuestan miles de millones de dólares por año en la pérdida de productividad de la

industria, y el impacto ambiental de las emisiones adicionales de CO2 y el aumento del consumo de combustible es enorme (Tomtom Traffic, 2016)

En su portal Web Tomtom Traffic informa que México cuenta con la ciudad más congestionada del mundo, al mostrar el ranking del aumento de tiempo de un viaje en comparación del total que se haría en condiciones de flujo libre o sin tráfico.

Tabla 1. Ranking de ciudades con más congestión vehicular en el mundo.

| Posición mundial | Ciudad | País | Proporción de tiempo adicional de traslado | | |
|------------------|------------------|-----------|--|----------------------------|---------------------------|
| | | | Promedio | En hora pico por la mañana | En hora pico por la tarde |
| 1 | Ciudad de México | México | 66% | 96% | 101% |
| 2 | Bangkok | Tailandia | 61% | 91% | 118% |
| 3 | Jakarta | Indonesia | 58% | 63% | 95% |
| 4 | Chongqing | China | 52% | 90% | 94% |

Fuente: Elaboración propia 2017. Datos: Tomtom Traffic 2016

Un viaje en la Ciudad de México aumenta 66% del tiempo total de su recorrido, y un viaje realizado en horas pico por la mañana y por la tarde, aumenta alrededor del doble del tiempo total de su recorrido.

1.1.2 Contexto histórico del transporte

Desde la aparición del ser humano, el transporte de objetos y del propio humano ha sido determinante para su supervivencia y desarrollo. No es casual que las primeras civilizaciones iniciaran y crecieran en zonas cercanas a ríos y mares, los que, además de cubrir muchas necesidades, cumplían el papel de ser las primeras vías de comunicación con otras regiones (Roca, 2005).

Para la segunda mitad del siglo XIX se origina la revolución de los transportes con la llegada de la máquina de vapor utilizada principalmente en los barcos y el ferrocarril (Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2009). Durante la Revolución Industrial el transporte masivo de personas y de bienes tiene importantes cambios ya que se torna indispensable para el desarrollo de la economía ya que se crean los grandes mercados nacionales e internacionales.

con la aparición del motor de combustión, crece el ferrocarril volviéndose en la gran empresa del siglo XIX y las consecuencias de su utilización fueron enormes para la economía facilitando el traslado de mercancías, así como la exportación e importación a otros países (UNED, 2009), además de favorecer la movilidad persona.

A finales del siglo XIX nace un nuevo modo de transporte caracterizado por el automóvil y sus derivados que compite con el ferrocarril, de esta manera el vehículo automotor impone su presencia sobre el ferrocarril en cuanto a su flexibilidad y mayor velocidad (Rivera & Zaragoza, 2007). Sin excluir el modo de transporte que más tecnología ha requerido, el avión (1919).

Finalmente existe una etapa en el transporte después de la Segunda Guerra Mundial y hasta la actualidad, donde los modos de transporte mantienen un desarrollo acelerado, surgiendo el transporte por ductos, por bandas, por cables o por canales artificiales.

1.1.3 Importancia económica del transporte

1.1.4 Transporte público

Las ciudades del mundo comparten el problema creciente de transporte urbano como la accidentalidad, congestión, dificultad de acceso, entre otras. Estos problemas generan costos económicos importantes de hasta el 9% del PIB de ciudades como Bangkok (Pardo, 2009). Diferentes estudios están en el acuerdo de que el transporte público es una posible solución a estos problemas.

- Estados Unidos: Si se ampliaran las estrategias de transporte público coordinadas con la combinación de actividades de viaje, desarrollo del uso del suelo y la eficiencia operativa, se podrían reducir los gases de efecto invernadero (GEI) en un 24 por ciento. El ahorro anual en costos de vehículos para los consumidores superará el costo de implementar estas estrategias hasta en \$ 112 mil millones de dólares (American Public Transportation Association, 2011).
- España: Se ha propuesto que el tránsito de vehículos particulares sólo esté permitido en el exterior de las urbes, limitando su uso en el interior, fomentando el uso de transporte

público y medios de transporte limpio como la bicicleta, además de la creación de espacios compartidos, en donde, tanto coches como bicicletas y peatones conviven en igualdad de condiciones (Cascales & Jiménez Gómez, 2016)

Sin embargo, el contexto es distinto en los países en desarrollo ya que intervienen múltiples agentes cuyo comportamiento es difícil de predecir y por lo tanto, de controlar. Pero comparte la idea de que el transporte público es una herramienta fundamental para solucionar los problemas de transporte urbano. La CEPAL sugiere al transporte público como alternativa para el desahogo de congestión vial, disminución de contaminación y reducción del número de accidentes.

En términos de movilización, un autobús, combi, camión o metro puede transportar un mayor número de personas por unidad de espacio, y aunque éstos emitan un mayor número de emisiones en comparación con un vehículo particular, en términos de personas transportadas, el beneficio del transporte público es mayor.

En términos de equidad, el transporte público favorece a la población de menores ingresos ya que los costos son más accesibles en comparación con el transporte privado. Aunque este beneficio se espera en términos de servicio público que es vigilado y controlado por el Estado.

El transporte público en América Latina ha pasado por dos momentos, el primero marcado por la sustitución de tranvías (uno de los primeros transportes de tipo colectivo) por autobuses. Y segundo, pasar de una fuerte presencia del Estado en materia de transporte público a la privatización en su mayoría. De esta manera las autoridades locales dejaron la responsabilidad del control y regularización de los servicios en manos de empresas que normalmente eligen las condiciones del transporte y de quien lo conduce según sus intereses.

En este sentido se puede hablar de dos tipos de transporte que al menos en América Latina son controlados por el Estado, y es el metro y el BRT (Bus Rapid Transit) o bus rápido. El primero tiene inicios en 1913 en Buenos Aires y se fueron extendiendo a otras ciudades con aportaciones muy positivas en materia de transporte urbano, sin embargo la construcción de gran parte de estos sistemas fue realizada con endeudamiento, debido a que eran obras muy costosas, es por ello que se pensó en otro tipo de transporte que tuviera grandes beneficios y que fuera menos costoso (Pardo, 2009).

Es en Bogotá donde se realizó la primera gran construcción que hace un *boom* de un Bus Rápido (BRT) como solución alterna o complementaria a la problemática. El Bus Rapid Transit es un sistema integrado que utiliza autobuses o vehículos especializados en carreteras o carriles dedicados para transportar a los pasajeros de forma rápida y eficiente a sus destinos (Urban transportation research & USDOT Federal Transit Administration, s.f.). Con todo esto, varias publicaciones afirman que el BRT, es una opción eficiente en la mejoría del sistema de transporte público en países en desarrollo con base en parámetros de capacidad, costo, tiempos de construcción y otras variables (Pardo, 2009).

Los sistemas tipo metro son sistemas de tránsito rápido, a través de trenes subterráneos o por superficie, y conocidos como Metro, subte, subway, underground, etc, Son parte importante en la historia y desarrollo de las grandes ciudades y se han convertido en una alternativa de transporte público que ha brindado grandes soluciones a los continuos congestionamientos de tránsito (AFS Analytics, 2016).

El mejorar los sistemas de transporte público es de vital importancia para el desarrollo sostenible en términos urbanísticos, sociales, ambientales, económicos y políticos. Especialmente si se habla de ciudades en vías de desarrollo donde la gran mayoría de sus habitantes utilizan el transporte público para movilizarse (entre el 70 y 80%) y evitar el cambio hacia el uso de autos particulares por insatisfacción en el servicio de transporte público (Pardo, 2009).

1.1.5 Transporte público en la ciudad de México

Desde antes de la llegada de los españoles Tenochtitlan ya contaba con infraestructura como calles, canales, calzadas y por su puesto sistemas de transportes. El medio de transporte más eficaz con el que contaba era los “acallis”, que eran canoas hechas de roble con capacidad para transportar hasta 70 personas.

Después de la conquista aumenta el número de calles y habitantes, y ya para 1648 había en la ciudad entre 30 mil y 40 mil habitantes y más de la mitad poseía un vehículo, lo que ocasionó serios problemas de tránsito. Sin embargo, el problema fue controlado la prohibición de exportaciones de vehículos. Para el siglo XIX la ciudad ya contaba con 160 mil habitantes y muchos autos circulando por las calles, es así que se crea el primer reglamento de tránsito en 1830, además de los inicios de la primera vía férrea en 1825, la cual busca satisfacer la alta demanda de transporte. Posteriormente en 1859 el transporte público da un cambio radical con

el uso del primer vehículo movido por energía eléctrica, el tranvía. Este inicio de nuevos modos de transporte también es caracterizado principalmente por el ferrocarril en 1910 (Secretaría de Movilidad, s.f.).

Pero es hasta 1967 que se crea El Sistema de Transporte Colectivo como un Organismo Descentralizado cuyo objetivo es la operación y explotación de un tren rápido, movido por energía eléctrica, con recorrido subterráneo, superficial para dar movilidad principalmente a usuarios de la Ciudad de México y la zona Metropolitana del Valle de México (Sistema de Transporte Colectivo, s.f.).

México Para la segunda mitad del siglo XX el problema de congestionamiento Vial se acrecentó de tal forma que en horas pico era más rápido caminar por las calles que la velocidad de circulación de los autos. A pesar de iniciar con una línea (línea 1), el STC llegó a ser un gran alivio en las calles con tráfico del centro de la gran ciudad.

Para...Metrobús y otros sistemas de transporte

1.1.4 Transporte como derecho

En este punto se refiere a la movilidad como el derecho que tenemos los ciudadanos de movilizarnos a lo largo de nuestras ciudades con el objeto de satisfacer nuestras necesidades laborales, familiares y sociales al mejor precio posible. En este contexto se señala al Estado como el ente obligado a proporcionar los mecanismos adecuados para el para el cumplimiento de este derecho al libre tránsito, además de propiciar que los distintos medios de transporte, públicos o privados sean de calidad y eficientes (Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2016)

Existen documentos legales que acreditan de manera más específica, el derecho a la libre movilidad:

- Ley de Transporte y Vialidad del Distrito Federal, artículo 101:

“Los usuarios tienen derecho a que el servicio público de transporte se preste en forma regular, continua, uniforme, permanente e ininterrumpida y en las mejores condiciones de seguridad, comodidad, higiene y eficiencia” (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2002).

- Ley de Movilidad de la Ciudad de México, artículo 5:

“La movilidad es un derecho de toda persona y de la colectividad a realizar el efectivo desplazamiento de individuos y bienes para acceder mediante los diferentes modos de transporte reconocidos en la ley, a un sistema de movilidad que se ajuste a la jerarquía y a los principios que se establecen en este ordenamiento, para satisfacer sus necesidades y pleno desarrollo. En todo caso el objeto de la movilidad será la persona” (Gaceta Oficial del Distrito Federal , 2014).

1.2 Movilidad urbana

La necesidad de traslado con el objeto de satisfacer necesidades es a lo que usualmente se le llama movilidad. Sin embargo, muchos autores abordan el tema de forma detallada en sus escritos o reportes, buscando una forma más exacta de definir la movilidad, y más aún, la movilidad urbana.

- “el desplazamiento entre un punto y otro de la ciudad, no se puede tener movilidad sin la necesidad de satisfacerla” (CAF, 2013).
- “La movilidad es el derecho al libre desplazamiento en condiciones óptimas de relación entre medio ambiente, espacio público e infraestructura (Duque, 2007)”.
- “la movilidad es una práctica social de desplazamiento en el territorio que conjuga deseos y necesidades de desplazamiento (que en conjunto pueden definirse como requerimientos de movilidad) y capacidades de satisfacerlos” (Gutiérrez, 2012).
- “La movilidad es un parámetro o variable cuantitativa que mide la cantidad de desplazamientos de las personas o los bienes en un determinado sistema socioeconómico” (Gutiérrez, 2012).

Dejando en claro que la movilidad va más allá del tránsito (actividad de personas y vehículos que pasan por una calle, una carretera, etc.) y transporte (sistema de medios para conducir personas y cosas de un lugar a otro) (RAE,2018), ya que la infraestructura y los automotores son solo los medios para lograr que se cumpla el fin.

Sin embargo, la movilidad se ha convertido en un tema de estudio por parte de muchas instituciones y especialistas y es mostrado como un desafío para las grandes ciudades ya que el incremento de población mundial está cada vez más concentrado en las ciudades. El informe de

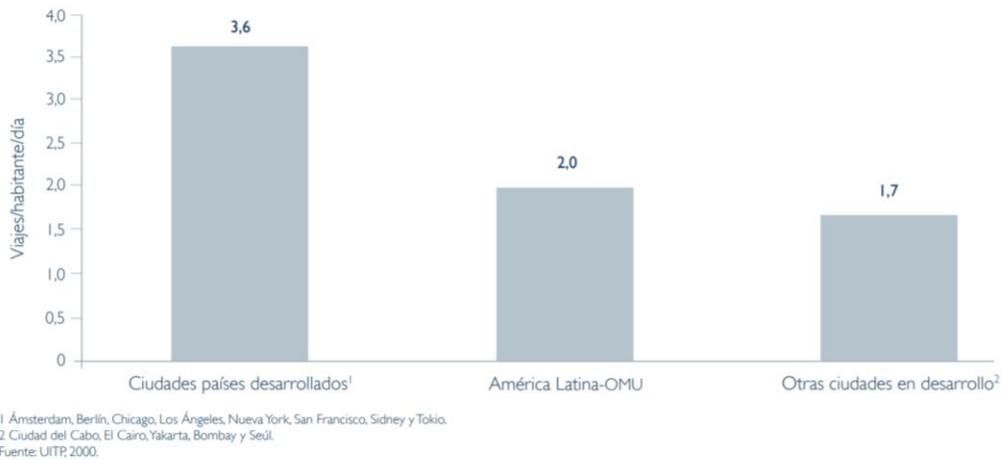
DESA señala que se ha pasado de 10 megaciudades en 1990 a 28 en 2014, con más de 10 millones de habitantes, y Tokio es la mayor de ellas, con 38 millones de habitantes (ONU, 2014).

El departamento de asuntos Económico y Sociales informó que el 54 % de la población mundial actual reside en áreas urbanas y se prevé que para 2050 llegará al 66% (ONU, 2014). Hoy en día, el 64% de todos los viajes realizados se hacen dentro de entornos urbanos y se espera que la cantidad total de kilómetros urbanos recorridos se triplique para 2050 (Audenhove, 2014). Las consecuencias son aumento de congestión vial y aumento en el tiempo de traslado, la demanda de viajes en transporte público excede al suministro de infraestructura, ocasionando que los usuarios se inclinen por el uso de vehículos particulares, etc.

Estos problemas se aseveran cuando se habla de países en desarrollo como los que conforman América Latina, en donde casi el 80% de la población vive en centros urbanos y se espera que esta proporción aumente hasta un 90% en las próximas décadas (CAF, 2013).

El Observatorio de Movilidad Urbana para América Latina realizó un estudio sobre movilidad en las principales urbes del continente, alguno de los datos que resaltan en la diferencia de viajes que realizan las ciudades de países desarrollados y las de países subdesarrollados, y se supone gracias al aumento de ingreso (CAF, 2010), ya que los habitantes de estas ciudades pasan a tener una red más compleja de actividades diarias, conectadas a su nuevo nivel de consumo (Vasconcellos, 2001).

Gráfica 1. Viajes promedió que un habitante hace en un día.



Fuente: Observatorio De Movilidad Urbana Para América Latina. Consultado: 20 de octubre de 2018

La mayoría de los países en desarrollo cubren el 75% de la demanda de viajes urbanos en sus ciudades (Gakenheimer, 1998).

Otro tema que está estrechamente relacionado con el problema de movilidad es la falta de cultura de los habitantes de las grandes urbes, refiriéndose a la cultura ciudadana como la asociación entre la convivencia, la búsqueda de objetivos en términos de bienestar colectivo, con proyectos que involucren el conocimiento, aceptación y cumplimiento voluntario de normas, (Duque, 2007). Este es un factor trascendente en el tema ya que el usuario necesita estar informado y hacer valer sus derechos como habitante de una urbe, con la autoridad moral que le concede el aplicar las leyes o reglas de convivencia en el entorno que le permite tener movilidad.

En general, y como conclusión de este apartado, se percibe al crecimiento poblacional y emigración hacia las zonas urbana, la preferencia por el uso de auto particular en lugar del transporte público, aumento de parque vehicular, y la poca conciencia ciudadana, como los principales factores que impiden tener una movilidad de calidad (para efectos de este estudio). Sin embargo, existen muchos otros, como el envejecimiento del parque vehicular público y privado, de la infraestructura, así como la mala planeación de esta, poca observación del cumplimiento de las leyes y reglas por parte del Estado para una mejor movilidad.

La primera obligación de la movilidad en la ciudad en desarrollo es acrecentar las funciones únicas y esenciales de la gran ciudad (Gakenheimer, 1998). Y todo con el objetivo de incorporar un sistema de transporte que garantice seguridad, que sea amable con el ambiente, más eficiente y más accesible; comprometido con la disminución de distancias y tiempos de viajes, además del cumplimiento en los horarios; y no menos importante, crear e impulsar campañas que promuevan una verdadera cultura colectiva (Banco Mundial, 2017).

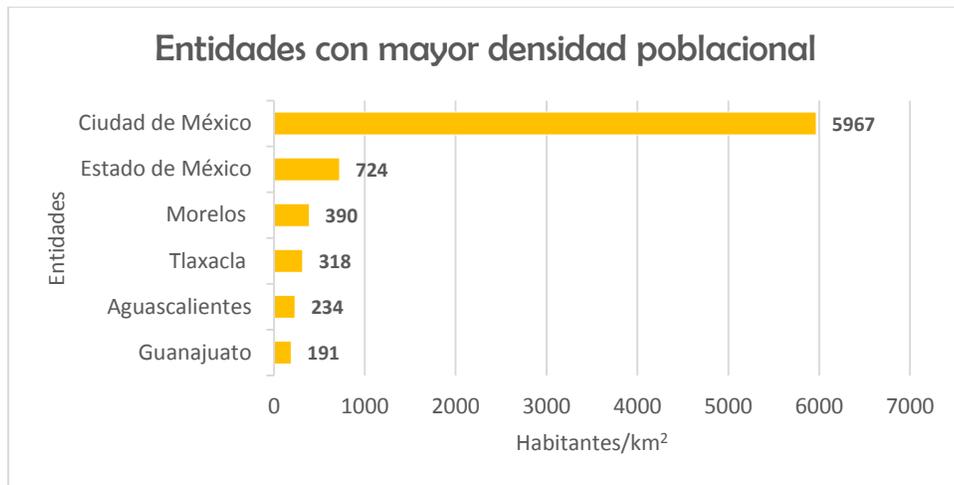
Para solucionar el problema de movilidad se han propuesto varias alternativas como el aumento en construcción de infraestructura, desarrollo de proyectos de transporte público y proyectos para la utilización de bicicletas. Sin embargo, se considera que el transporte público es una herramienta fundamental para solucionar los problemas de transporte urbano, ya que el transporte público es más eficiente que el privado en términos de pasajeros transportados por unidad de espacio (Pardo, 2009).

1.3.1 Movilidad urbana en la Ciudad de México

Desde hace más de cinco décadas la población ha presentado un crecimiento constante, seguida por un patrón de emigración donde la gente deja las zonas rurales para establecerse en las urbes del país provocando una distribución desigual. En 1950, poco menos de 43% de la población en México vivía en localidades urbanas, en 1990 era de 71% y para 2010, esta cifra aumentó a casi 78%.

De esta forma, la Ciudad de México (CDMX) se ha convertido, por mucho, en la entidad de mayor densidad poblacional del país con 5 957 hab/km², a pesar de tener la menor extensión territorial (INEGI, 2015). No obstante, la ocupación de territorio también se refleja en las regiones vecinas de la ciudad.

Gráfica 2. Entidades de México que presentan una mayor densidad poblacional.



Sin embargo, en los últimos años la Ciudad de México ha presentado un despoblamiento de las delegaciones centrales a pesar de ser las de mayor infraestructura urbana. Esta situación ha sido acompañada de un crecimiento masivo hacia las delegaciones aledañas y municipios del Estado de México, pero muchas de las actividades siguen dentro de la Ciudad, esto implica cambios en la movilidad, a mayor distancia mayor viajes (Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal).

La Zona Metropolitana del Valle de México está integrada por las 16 delegaciones de la CDMX., 58 municipios del Estado de México y 1 del Estado de Hidalg. Esta área está habitada por 19.38 millones de personas mayores de 5 años y poco más del 80% (15.63 millones) realiza al menos un viaje en un día entre semana (lunes a viernes). Esta proporción es del 84% en la CDMX y del 78% en los municipios conurbados (INEGI, 2018).

La encuesta Origen-Destino en hogares de la ZMVM del 2017, informó que diariamente se realizan 34.56 millones de viajes. Las causas principales de estos viajes son ir al trabajo o la escuela y aunque fueron tomadas en cuenta otras causas, éstas son mínimas.

Tabla 2. Tiempos de recorrido en la Zona Metropolitana del Valle de México.

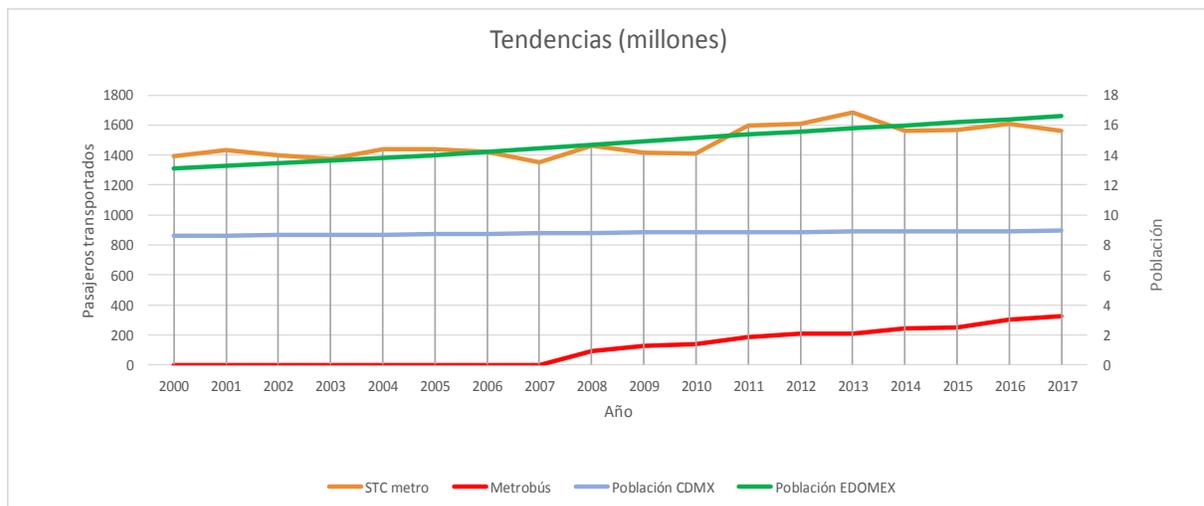
| Tiempo de recorrido (minutos) | Proporción de viajes ZMVM | Proporción de viajes CDMX | Municipios conurbados del EDOMEX y Tizayuca |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|---|
| Hasta 30 | 36.60% | 36.30% | 36.90% |
| Entre 30 y 120 | 58.10% | 60.30% | 55.90% |
| más de 120 | 5.30% | 3.10% | 7.20% |

Elaboración propia, 2018. Fuente: INEGI

En la Ciudad de México más del 60% de los habitantes, tarda entre 30 minutos y 2 horas en poder llegar a su destino. Utilizando como principal medio de transporte los autobuses, camiones o combis; el segundo más utilizado es STC, seguido del Metrobús, etc.

El uso de Sistema BRT (Metrobús) desde sus inicios, ha ido creciendo significativamente, y es dónde se cuestiona si es actualmente una competencia para el servicio de metro. En la gráfica 3 se realizó una comparación entre los pasajeros transportados por el STC y el Sistema BRT, además se incluyó el crecimiento poblacional dentro de la Ciudad de México y la entidad vecina, el Estado de México. La intención de este análisis es observar si el crecimiento de la población y de la movilidad, en materia de transportación de personas, es absorbido por el metro o el Metrobús.

Gráfica 3. Comparación entre crecimiento poblacional y pasajeros transportados por el STC y el Metrobús.



Fuente: Elaboración propia, 2018. Datos INEGI.

En la gráfica se observa un crecimiento constante de la población, un poco más prolongada en el Estado de México. El STC muestra cambios drásticos en el servicio y una disminución a partir del 2013, mientras que el Metrobús mantiene un rápido crecimiento, y además constante. Sin embargo, se le preguntó al ingeniero encargado del análisis estadístico de este tipo de información, el cual aseguró que el Sistema BRT en México, ha servido para desahogo de muchas líneas de metro, sobre todo en aquellos ejes viales y zonas concurridas, y no se señala como una competencia para el STC.

1.3.2 Necesidad de reducción del uso del automóvil

Las ciudades del mundo en desarrollo son dramáticamente distintas unas de otras, pero comparten ciertas características y problemas que las distinguen de las situaciones de movilidad del mundo desarrollado. La mayoría de ellas sufre problemas actuales e inminentes más serios de movilidad que sus contrapartes del mundo desarrollado (Gakenheimer, 1998).

Debido a la imagen creciente y atractiva en el mundo en desarrollo hacia un estilo de vida que tiene al automóvil por elemento esencial (Gakenheimer, 1998) ha provocado la pérdida de pasajeros a favor del transporte masivo por el uso de automóvil particular.

1.3.3 Transporte férreo

La Revolución Industrial trae consigo grandes necesidades de movilidad de mercancías y mano de obra, trayendo como consecuencia la creación de transporte de carga masiva, con el cual fue posible mover una mayor cantidad, con mayor facilidad a mayores distancias. La locomotora de vapor, por ejemplo, es el primer tipo de ferrocarril que existió y que puede ser considerado transporte masivo, llegando para solucionar el problema de velocidad y volumen de transportación vía terrestre.

Los proyectos de transporte masivo se caracterizan por ser acorde a las necesidades del estado, mejorar la calidad de vida urbana, incluyentes en el sector social y económico, y además, ser amables con el medio ambiente. Los beneficios derivados de este servicio son la disminución de tiempos de traslado y de enfermedades derivadas por estrés y contaminación; así como el ahorro de combustibles y una mejor calidad de vida.

Con la descripción anterior, se puede definir un transporte masivo como un sistema urbano, eléctrico, con gran capacidad de usuarios y una frecuencia de servicio, que puede ser; subterráneo, elevado, o sobre el nivel del suelo. Como lo es un sistema tipo “Metro”.

Un sistema tipo metro fue construido por primera vez en la ciudad de Londres, ya que desde el 1843 se presentaba un aumento poblacional en la Metrópolis Londinense. En 1945 el abogado y reformador urbano Charles Pearson presentó la idea de un transporte subterráneo, idea que en ese momento fue rechazada. A pesar de que los trenes funcionaban desde 1830, era casi imposible introducirlos en la ciudad ya que esta acción implicaría derribar una gran cantidad de casas. Fue hasta enero 1863 que se inaugura el primer subterráneo de la historia, el Metropolitan Railway. En ese mismo año, New York estrena el mismo medio de transporte.

Con base en la implementación exitosa en varias ciudades del mundo, un verdadero esfuerzo realizado por mejorar los sistemas de transporte público de América Latina fue la construcción de sistemas férreos en ciudades grandes para contrarrestar el impacto negativo del sistema público tradicional como se venía presentando en el continente (CEPAL, 2009).

En México se une al esfuerzo de abastecer esta demanda de servicio de transporte, y es así como el Gobierno del Distrito Federal (ahora Ciudad de México) aprueba y colabora en la construcción de un sistema de transporte eléctrico y masivo (Secretaría de Movilidad, s.f.), de aquí la existencia del ahora conocido Sistema de Transporte Colectivo coloquialmente llamado metro.

El STC es uno de los sistemas de transporte masivo más importantes a nivel internacional, y un ícono en la Ciudad de México ya que el servicio público que brinda es imprescindible en la movilidad en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Así mismo, el STC es una de las empresas públicas más importantes del país, con un valor neto de más de 239 mil millones de pesos (STC, 2017).

1.3 Sistema de Transporte Colectivo y su desarrollo

Desde la planeación del STC se tenían expectativas tales como: “Crecer en servicio a usuarios, para consolidar el Sistema como la columna vertebral del transporte público en la zona metropolitana” (Plan de empresa 2000 – 2006 STC). El Ingeniero Bernardo Quintana realiza los

estudios necesarios que permitan un anteproyecto y después un proyecto de un transporte alternativo, fuera del tráfico, que fuera masivo y rápido.

Es así que el 29 de abril de 1967 que se publica en el Diario Oficial de la Federación, el decreto presidencial que crea el Sistema de Transporte Colectivo como un organismo público descentralizado, para construir, operar y explotar un tren rápido subterráneo como parte del transporte público de la Ciudad de México.

Figura 1. Tren del STC metro.



Fuente: Noticias en línea UNOCERO (agosto 2017).

Etapas:

La primera etapa (1967-1972) comprende la inauguración del primer tramo de línea 1 y el inicio de la construcción de las líneas 1,2 y 3. Al final, la red contaba con 41.1kilometros y 48 estaciones.

En la segunda etapa (1977-1982) se amplió 9 estaciones de línea 3, se concluyó la línea 4, además se terminó la construcción de línea 5. Durante este periodo se construyeron un total de 38.72 kilómetros de líneas y 32 estaciones.

La tercera etapa (1983-1985) se caracteriza por la conclusión de las líneas 1, 2 y 3 y la construcción del primer tramo de línea 6 El rosario-Instituto del Petróleo, y 7 Tacuba- Barranca del Muerto. En total se construyeron 35.27 kilómetros de Red con 25 estaciones.

Para la cuarta etapa (1986-1988) se concluye la línea 9 Pantitlán-Tacubaya, la línea 6 en el tramo Instituto del Petróleo-Martín Carrera y línea 7 en el tramo Tacuba-El rosario. En este periodo se construyeron un total de 25.63 kilómetros de líneas y 20 estaciones

La quinta etapa (1989-1994), se concluyó en su totalidad la línea 8 y línea A, Garibaldi-Constitución de 1917 y Pantitlán-La Paz, respectivamente. En esta etapa un total de 37.26 kilómetros de líneas y 29 estaciones.

En la sexta etapa de construcción (1994-2000), se inicia y concluye la línea “B” Buenavista-Ciudad Azteca con lo cual se logra conectar a la CDMX con los municipios Nezahualcóyotl y Ecatepec del Estado de México.

Finalmente, en la última etapa se concluye con línea 12 en el tramo Tláhuac-Mixcoac inaugurada el 30 de octubre del 2012 con 25.10 kilómetros y 20 estaciones.

En la actualidad, la Red cuenta con 12 líneas integradas por 226 km de vías y 195 estaciones, de las cuales 44 son estaciones de correspondencia y 127 de paso. Por su tipo existen 115 estaciones subterráneas, 55 superficiales y 25 elevadas (STC, 2017). Actualmente el STC traslada a 1,623 millones de personas anualmente, equivalente a 4.9 millones de personas en día laborable. Y cuenta con un parque vehicular total de 388 trenes y 66 convoyes de reserva.

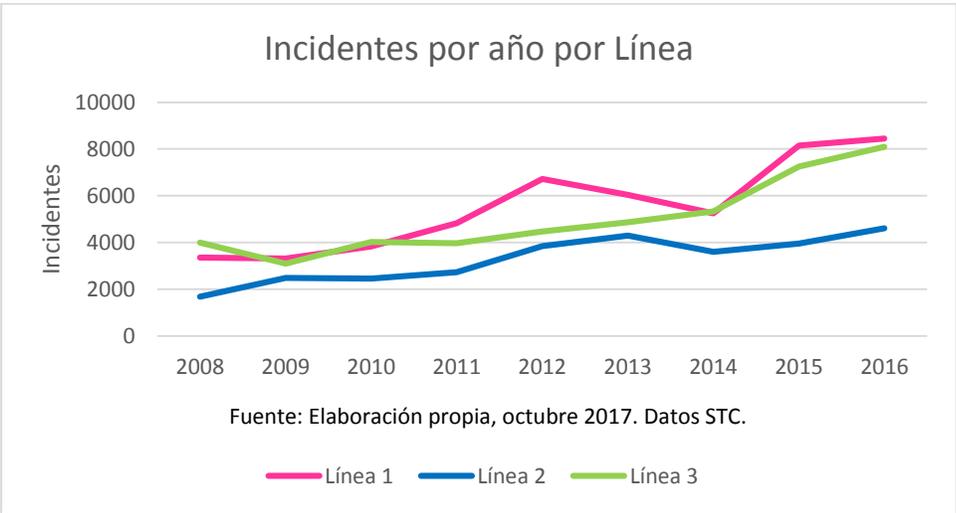
Las dos primeras líneas, las Rosa de metro (línea 1) y la Azul (línea 2) se construyeron pensando principalmente en dos grandes avenidas, donde las industrias, los comercios y las viviendas requerían conexiones eficaces, tiempos cortos de traslado y alta afluencia de personas (Sistema de Transporte Colectivo, 2014) pero con el paso del tiempo el servicio se ha vuelto más lento, mientras que la demanda de transporte está inevitablemente creciendo.

El diagnóstico 2017 del Sistema de Transporte Colectivo, informó que la problemática principal que causa insatisfacción en la calidad del servicio es el retraso en la circulación de los trenes lo cual se origina por la falta de material rodante (todo lo relacionado con los trenes) y las averías en los trenes y las instalaciones fijas (STC, 2017).

En lo que refiere a la afluencia de personas, Línea 1 es una de las más concurridas dentro del STC después de las líneas 2 y 3, en los últimos tres años ha sido la segunda con mayor afluencia (STC, s.f.). Pero también ha sido la que mayor número de incidentes presenta en comparación con las 12 líneas, además de mostrar el mayor tiempo de retraso, producto de tales incidentes.

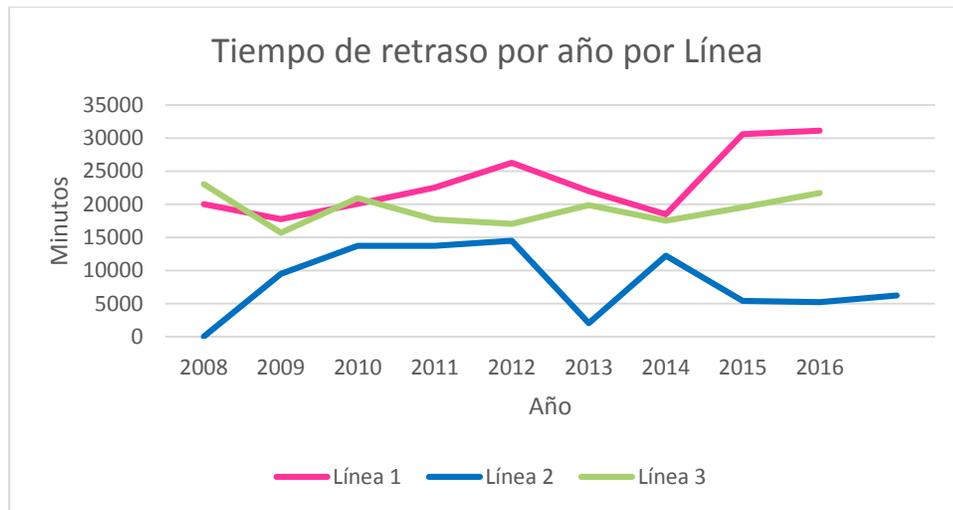
La gráfica 4 muestra el tiempo acumulado de retraso, en las 3 Líneas más demandadas del metro en un periodo de 9 años (del 2008 al 2016).

Gráfica 4. Acumulado de minutos de retardo por línea del 2008 al 2016.



En este análisis se muestra la frecuencia anual con que han ocurrido los incidentes. La Línea uno es la que más incidentes ha registrado en este periodo, seguida de Línea 3, una hipótesis que se podría plantear es si tiene que ver el envejecimiento de los trenes y las instalaciones con estos retrasos. Ya que no solo han aumentado en ocurrencia, sino también en tiempo, como lo muestra la gráfica 5.

Gráfica 5. Tiempo de retraso de líneas 1,2 y 3 por año.

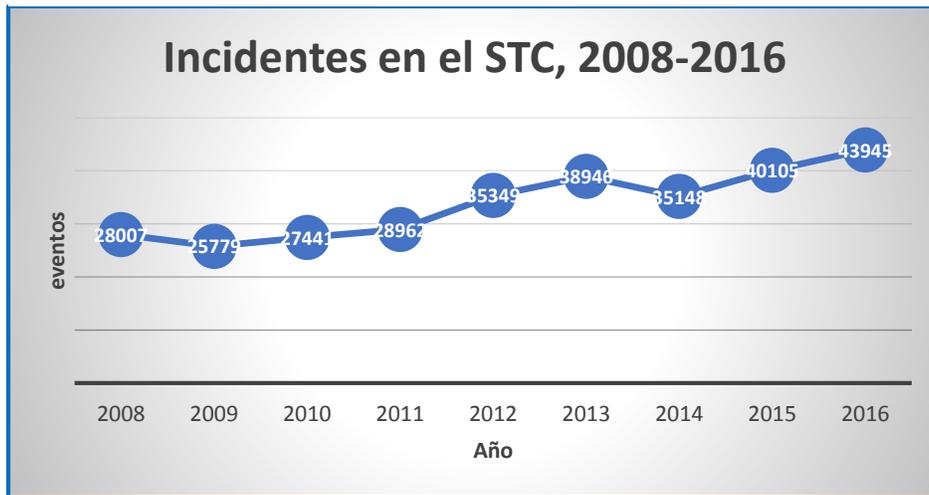


1.3.1 Incidentes en el STC

Un incidente es definido por la RAE como “algo que sobreviene en el curso de un asunto y tiene con este una relación”. En el STC es la palabra que se usa para referirse a un evento sucedido en el horario de servicio, y que provocó un retraso en el mismo. Estos incidentes pueden provocar demora en la operación de trenes y tomar un rango de tiempo que va desde un minuto de retraso hasta una hora o más, y en el peor de los casos dejar sin servicio una o más estaciones.

Para llevar un registro de los incidentes, el metro cuenta con el Puesto de Control Central (PCC) que es un sistema que recibe toda la información que ocurre en las líneas desde la circulación de trenes, como las condiciones que se encuentra la señalización e, incluso, si hay algún problema en las vías que dificulte el paso de los convoyes (Robles, 2015). En este lugar se opera con tableros de ocho metros de longitud que vigilan a distancia la operación de los trenes de cada una de las 12 líneas que integran el Sistema de Transporte Colectivo. Desde este lugar, los incidentes son registrados en un “Informe diarios de operación” para posteriormente ser catalogados y capturados en el área de Análisis Operativo para la creación de bases de datos anuales.

Gráfica 6. Incidentes registrados en el STC por año del 2008 al 2016.

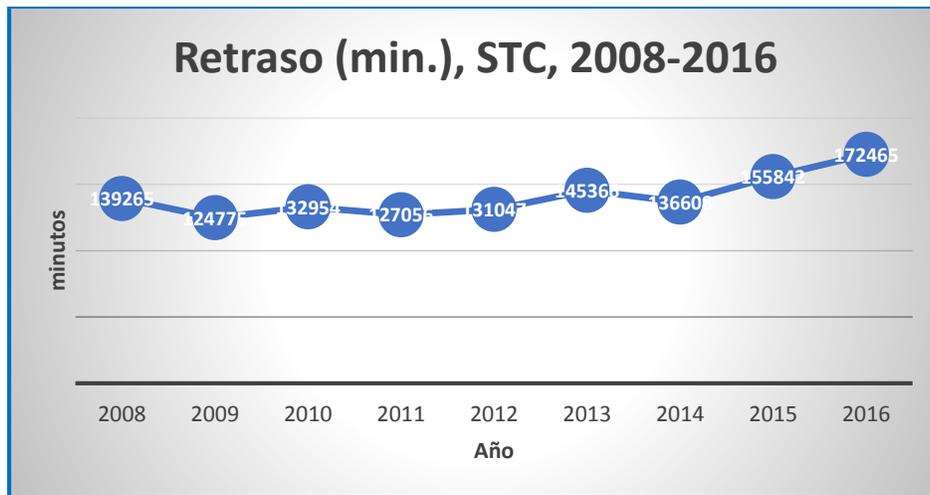


Fuente: Elaboración propia octubre 2017. Datos STC.

La información disponible para el análisis de este proyecto son bases de datos que contienen todos los eventos (incidentes) que retrasaron el servicio del 2008 al 2016. Cada incidente está descrito en: tiempo de inicio, de término, fecha y hora en que se suscitó, estación en dónde ocurrió y su correspondiente línea, e información sobre los trenes (en caso de que haya sido ocasionado por falla mecánica de algún convoy).

En la gráfica 6, se puede observar un aumento en los incidentes a lo largo de este periodo de tiempo, principalmente en los últimos siete años. Este comportamiento ascendente da lugar a cuestionamientos sobre las condiciones en que operan los trenes, los trabajadores y lo referente a seguridad de usuarios del STC. Además del aumento en el tiempo de retraso durante el servicio, gráfica 7.

Gráfica 7. Incidentes registrados en el STC por año del 2008 al 2016.



Sin embargo, la intención de este trabajo deja de lado la especulación y busca realizar un análisis minucioso sobre esta información. El análisis de los incidentes y de los posibles factores que afecten este aumento en tiempo y ocurrencia de eventos que retrasan el servicio de transportación dentro de uno de los sistemas de transporte público más importantes, en una de las ciudades más grandes del mundo.

1.4 Justificación

En los últimos años el país ha presentado notables cambios en la distribución de la población, tan solo la Ciudad de México es la entidad con menor extensión territorial pero la que más densidad poblacional presenta con 5,967 hab/km² seguida del Estado de México con 724 hab/km² (INEGI, 2015). Dentro de estos cambios notables, es importante mencionar que en las últimas décadas la Ciudad de México ha presentado una baja en su población, debida a la emigración hacia los alrededores, principalmente al Estado de México.

La mayor densidad poblacional dentro de la Ciudad de México se da en 1980, 1990 y 2000 al grado de presentar un serio problema de sobrepoblación (INEGI, 2006), pero en los últimos

años se ha presentado una despoblación notable en la Ciudad de México, esta situación ha sido acompañada de un expansión hacia las delegaciones del Estado de México (Secretaría de Movilidad, s.f.)

El crecimiento en la concentración poblacional en las áreas externas a la ciudad ha provocado una nueva necesidad de transporte para el traslado a los lugares de trabajo, estudio, convivencia social, esto es, que entre más dispersión el número de viajes aumenta significativamente. Otro factor importante es el crecimiento de autos en circulación en el Distrito Federal, tan solo del año 2004 al 2014 ha crecido el 82% el número de vehículos en circulación (INEGI, 2017) es por ello que obtener un medio de traslado que considere el factor costo/tiempo es importante para los usuarios de estos servicios.

El Sistema de Transporte Colectivo metro es una alternativa para aquellos que tienen la necesidad de traslado en mayores o menores distancias además de ser el principal transporte público en la urbe, pero el factor crecimiento poblacional, el envejecimiento de la infraestructura, la falta de cultura por parte de los usuarios, entre otros factores, han provocado una saturación en el Sistema, consecuencia de esto es un servicio más lento y estresante para los usuarios que afecta su calidad de vida.

Actualmente línea 1 es una de las líneas con mayor afluencia de las 12 existentes, cabe mencionar que las tres primeras líneas construidas dan servicio a casi el 50% del total de usuarios de toda la red. En línea 1 el número de clientes atendidos para el año 2016 fue de 260,544,843 usuarios (Afluencia de estación por Línea, enero-marzo 2016, STC metro), esta cantidad representa el 16.47% del total de pasajeros atendidos en ese año.

Existen diferentes trabajos de investigación que abordan la problemática del congestionamiento en el andén del metro buscando optimizar los recursos disponibles para este servicio, nuevas estrategias para el uso del servicio, modelos para entender el comportamiento, y de predicción, etc. Todo con el objeto de mejorar la calidad de vida de la población usuaria.

En el presente trabajo se pretende encontrar alternativas que permitan mejorar la rapidez del servicio, mediante un análisis minucioso de factores que expliquen las causas del aumento en el tiempo de retraso de los trenes, durante el horario de servicio, enfocado en una de las líneas de más demanda dentro del STC, como lo es Línea 1.

1.5 Objetivos General y Particulares

1.5.1 Objetivo General

Realizar un análisis de regresión múltiple que apoye a la toma de decisiones relacionadas con el tiempo de retraso en los trenes de línea 1 del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC).

1.5.2 Objetivos particulares

- Conocer el estado actual del sistema.
- Analizar las posibles variables que tengan un impacto sobre el tiempo de retraso de los trenes de línea 1.
- Verificar que las posibles variables cumplan con los supuestos para ser incluidas en el modelo.
- Validar el modelo y verificar que los resultados sean lógicos con la realidad.
- Identificar los factores que sean controlables por el sistema.
- Proponer estrategias de mejora para que apoyen la disminución del tiempo de retraso durante el servicio.

Capítulo 2

Marco Teórico y Metodológico de la investigación

En esta parte del proceso de investigación, se presenta el marco teórico (recolección y análisis de datos directos de la realidad) como sustento de este proyecto. Para finalmente describir la metodología que se utilizó (cómo y con qué se realizó la investigación).

2.1 Marco Teórico

En este apartado se desarrolla en breve la teoría sobre la cual se fundamenta este trabajo, la solución del problema bajo un enfoque sistémico, el cual contempla el todo y sus partes, además de las conexiones existentes entre ellas.

2.1.1 Sistémica transdisciplinaria

En la Teoría General de Sistemas, Von Bertalanffy propone reorientar el conocimiento en una sola teoría (TGS), esta reorientación tiene dos momentos teóricos importantes:

- 1 La aparición de la Teoría de Sistemas Abiertos.
- 2 La aplicación de expresiones y modelos matemáticos

La TGS trata de encontrar principios universales que sean aplicables a los sistemas en general es decir un “cambio general de la actitud científica y de sus concepciones” (Bertalanffy 1963:37). De esta manera se busca un enfoque organizador que incluya diferentes disciplinas para la resolución de un problema.

Dentro del desarrollo de este trabajo se ocupará un proceso epistemológico para la construcción un modelo conceptual del transporte urbano y posteriormente un modelo de líneas de espera,

esto con el fin de identificar los factores que intervienen en el problema como son: saturación en horas pico, exceso de costos, contaminación del ambiente, etc.

Para la resolución del problema se identifican los posibles factores que intervienen, además de sus interrelaciones con el fin de definir problemas concretos que hay que atacar, realizando un análisis estadístico de los datos buscando aquellos factores que no cumplan con los límites de control de calidad, optimizando los recursos disponibles para obtener resultados satisfactorios que mejoren la calidad de vida del usuario y el prestador de servicios.

Figura 2. Diagrama Marco Teórico



Elaboración propia. Octubre 2017

2.1.2 Ingeniería de Sistemas

La Ingeniería de Sistemas, que ha contribuido al desarrollo de técnicas de planificación, diseño y explotación de los sistemas de transporte, para hacerlos más eficientes y eficaces, al optimizarse los recursos disponibles. Esta disciplina, además, ha hecho posible la integración de los modos de transporte, mediante su interacción ordenada (transportación intermodal y multimodal), lo cual evita competencias inútiles y un mejor aprovechamiento de las características de cada uno de ellos.

El alto grado de desarrollo de las ciencias matemáticas relacionadas con la aplicación en la administración y ciencias sociales (por ejemplo, la Investigación de Operaciones, la Probabilidad y Estadística aplicada, los modelos de simulación para el transporte, etc.), constituyen una gran herramienta para el análisis de los problemas y la toma de decisiones (Rivera & Zaragoza, 2007).

2.1.3 Estadística

La real Academia define a la estadística como la rama de la matemática que utiliza grandes conjuntos de datos numéricos para obtener inferencias basadas en el cálculo de probabilidades. Teniendo como objetivo es recopilar información de orden cualitativa o cuantitativa, perteneciente a individuos, grupos, hechos o fenómenos, y mediante análisis de datos deducir respuestas a interrogantes, e incluso obtener proyecciones futuras.

La estadística se considera una de las ramas más antiguas de la matemática. En Egipto En el año 3050 antes de Cristo los faraones recopilaron información sobre las riquezas que poseía la población con el fin de saber la disponibilidad de recursos para reparar las pirámides. Y es en ese mismo territorio, Ramsés II realizó un censo sobre las tierras para realizar un nuevo reparto (Hernández, 2016).

Desde inicios de la década de los ochenta del siglo pasado y hasta lo que ha transcurrido del siglo XXI la industria estadounidense ha puesto una enorme atención en el mejoramiento de la calidad (Walpole, Myers, & Myers, 2012). Un acontecimiento destacado en Japón es conocido como el “Milagro Industrial”, Este éxito se atribuye Principalmente a métodos estadísticos. Es así, que en la actualidad la estadística es ocupada en métodos científicos que se utilizan para recolectar, organizar, resumir, presentar y analizar datos así como para obtener conclusiones válidas y tomar decisiones razonables con base en el análisis (Spiegel & Stephens, 2009).

2.1.3.1 *Algunos conceptos de estadística*

2.1.4 **Regresión Lineal Múltiple.**

Para el análisis del problema planteado, se propone un análisis de regresión múltiple ya que esta técnica permite extraer de grandes cantidades de datos las características principales de una relación que no es evidente.

El origen del término regresión se le atribuye a Francis Galton, científico inglés que planteó uno de un famoso ensayo¹ que, a pesar de la tendencia de los padres de estatura alta a procrear hijos altos y los padres de estatura baja, hijos bajos, la estatura promedio de los niños de padres de una estatura determinada tendía a desplazarse, o “regresar”, a la estatura promedio de la población total o a la media poblacional (Gujarati & Porter, 2009). Es en este punto donde nace “La ley de regresión universal de Galton” que fuera posteriormente confirmada por su amigo Karl Pearson, quien reunió más de mil registros de estaturas para realizar un estudio² de análisis estadístico en el cual descubrió que la estatura promedio de los hijos de un grupo de padres de estatura alta era menor que la estatura de sus padres, y que la estatura promedio de los hijos de un grupo de padres de estatura baja era mayor que la estatura de sus padres.

Las ideas modernas sobre regresión se originan en los trabajos de Legendre y Gauss, sobre el método de mínimos cuadrados, para ajustar los datos sobre las órbitas de cuerpos celestes (Castro, 2012). Con esta técnica de optimización buscaban encontrar la recta que mejor ajustara a los datos bivariantes buscando minimizar los errores cuadráticos, siempre y cuando los datos cumplan con algunas condiciones.

Con el paso de los años, el análisis de regresión ha tomado fuerza, debido en gran medida a los aportes realizados en biología, psicología, la econometría, y en un gran número de ciencias.

El análisis de regresión múltiple es utilizado cuando se estudia una posible relación causal de un conjunto de variables independientes (explicativas o predictoras) hacia una variable

¹ Francis Galton, “Family Likeness in Stature”, Proceedings of Royal Society, Londres, vol. 40, 1886, pp. 42-72.

² K. Pearson y A. Lee, “On the Laws of Inheritance”, Biometrika, vol. 2, noviembre de 1903, pp. 357-462.

dependiente (Explicada o de respuesta). Teniendo como objetivo estimar o predecir la media o valor promedio poblacional de la segunda en términos de los valores conocidos de las primeras.

Es importante aclarar que en un análisis de este tipo no necesariamente existe una relación causa-efecto, es decir, que no necesariamente un cambio en la variable explicativa X_i implica un cambio en la variable de respuesta Y .

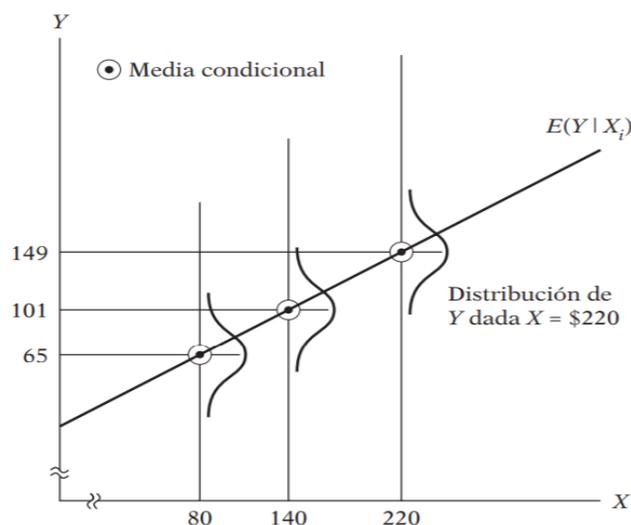
2.1.4.1 *Modelo lineal de regresión múltiple*

En este estudio se utilizará a la letra Y_i para referirse a la variable de respuesta (variable dependiente) y las X_{ij} para las variables explicativas (variables independientes), el subíndice ij denota la observación j –ésima de la variable X correspondiente a Y_i . Dónde se supone que la variable dependiente es estadística, aleatoria o estocástica, es decir, que tiene una distribución de probabilidad. Por otra parte, se asume que las variables explicativas tienen valores fijos. Donde el valor esperado de la distribución de Y dado X_i es una función lineal de X_i .

$$E[Y|X_i] = f(X_i) = B_0 + B_1X_i$$

Desde el punto de vista geométrico, una curva de regresión poblacional es tan sólo el lugar geométrico de las medias condicionales de la variable dependiente para los valores fijos de la(s) variable(s) explicativa(s) (Gujarati & Porter, 2009).

Gráfica 8. Curva de Regresión Lineal.



De donde se deduce que la Función de Regresión Poblacional (FRP) es de la forma

$$Y_i = B_0 + B_1X_i + u_i$$

Pero ya que normalmente no se cuentan con todos los datos poblacionales, se recurre a toma de muestras y es a partir de FRP en la cual se basa la línea de regresión poblacional, se desarrolla el concepto de Función de Regresión Muestral (FRM).

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_i + \varepsilon_i$$

Donde

y_i es el estimador de Y_i

x_i estima a X_i

β_0 y β_1 son estimadores de B_0 y B_1

Sean x_1, x_2, \dots, x_k k variables de predicción, las cuales pudieran tener influencia sobre la variable de respuesta y_i se supone el modelo de regresión múltiple lineal de la forma

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_{i1} + \beta_2x_{i2} + \dots + \beta_kx_{ik} + \varepsilon_i \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n$$

ε_i es el error asociado a y_i y hace referencia a la variabilidad que no se puede predecir, es un término que sustituye o representa a todas las variables omitidas o ignoradas que puedan afectar a las y_i pero que no se incluyen (o no pueden incluirse) en el modelo de regresión.

Los $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son $m = k + 1$ parámetros lineales desconocidos. La ecuación ____ recibe el nombre de *modelo lineal general* y da origen a lo que se conoce como *regresión lineal múltiple*.

2.1.4.2 *Supuestos del modelo*

- Las observaciones y_i son variables aleatorias independientes, normalmente distribuidas.

$$y_i \sim N(\mu, \sigma^2)$$

- Debe existir aleatoriedad en los residuos ε_i , normalmente distribuidos con media cero y varianza σ^2 .

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

Además:

La esperanza de los residuos es cero $E[\varepsilon_i] = 0$

No existe dependencia entre los residuos $cov(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ con $i \neq j$

- La única restricción que existe para el modelo de regresión múltiple es que sea lineal en los parámetros β_m .

2.1.4.3 *Interpretación del modelo de regresión lineal múltiple*

Con los supuestos antes mencionados, se puede deducir que, el valor condicional de y aplicado a ambos lados de la ecuación ____ se obtiene

$$E[y_i | x_1, x_2, \dots, x_k] = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik}$$

Lo que implica que la ecuación anterior nos da el valor esperado de y condicionado por los valores fijos de los x_k . Donde los coeficientes de regresión lineal se interpretan de la siguiente manera:

- β_0 : Es el valor medio de la variable de respuesta y cuando todas las variables explicativas valen cero.
- β_j con $j = 1, 2, \dots, k$: Mide el cambio en el valor medio de y por cambio de una unidad en x_i cuando todas las demás variables explicativas se mantienen constantes. Es decir, que los parámetros β_j representan un efecto parcial de su correspondiente x_i sobre la variable de respuesta.

El *coeficiente de determinación múltiple* nos permite conocer el porcentaje en que las variables independientes x_k incluidas en el modelo, explican la variación total en la variable de respuesta y , y es denotado por R^2 .

El valor de R^2 está comprendido entre 0 y 1, si es uno, el modelo explica en un cien por ciento la variación en y . Por otro lado, si toma el valor de cero, significa que el modelo no explica nada de las variaciones en y . En este sentido, se deduce que el ajuste del modelo es mejor mientras R^2 está más cerca de 1.

Una propiedad importante R^2 es ser una función no decreciente, lo que implica que a medida que aumente el número de variables en el modelo, el valor del coeficiente de determinación múltiple aumentará invariablemente. Lo que llevaría a pensar que entre más variables se incluyan en el análisis mejor será el resultado, sin embargo esto no necesariamente sucede.

Por este motivo, se incluye el término de R^2 *ajustada*, ya que su valor sí considera el aumento de variables al modelo, de hecho, a medida que el número de variables aumenta el valor de R^2 *ajustada* es cada vez menor que R^2 , incluso puede llegar a ser negativo (apéndice A). En este último caso, se toma como cero.

2.1.5 Calidad

La calidad se desarrolla en la actividad de una organización que genera productos o servicios y su objetivo es lograr cumplir con las características que satisfagan la necesidades o expectativas de los clientes (los consumidores).

Estos productos o servicios son resultado de algunos o algún proceso, el cual es un conjunto de actividades estrechamente relacionadas, que reciben insumos que son transformados en resultados. Estas variables de salida son valores que reflejan los resultados finales del proceso, y que a posteriori se analizan para determinar si se cumple con los requisitos que inicialmente se pretendían.

Así que se entiende por calidad a “el grado en que un conjunto de características inherentes a un objeto cumple con los requisitos” (Normalisation, 2015). Por lo tanto, la calidad es la medida en que el cliente queda satisfecho con el producto o servicio.

2.1.5.1 *Herramientas básicas para la calidad*

La calidad se auxilia de algunas herramientas para el análisis y control de sus resultados entre los que se encuentran el diagrama de Pareto, Estratificación y diagrama de Ishikawa.

El principio de Pareto conocido como la “Ley 80-20” o “Pocos vitales, muchos triviales”, define que el 80% de los resultados provienen del 20% de los esfuerzos. Este principio fue descubierto por un economista italiano llamado Vilfredo Pareto en 1897. El principio de Pareto es un gráfico especial de barras cuyo campo de análisis o aplicación son los datos categóricos, y tiene como objetivo ayudar a localizar el o los problemas vitales (Pulido, 2009).

El *diagrama de Pareto* es un gráfico especial de barras cuyo campo de análisis o aplicación son los datos categóricos, y tiene como objetivo ayudar a localizar el o los problemas vitales, así como sus principales causas. Es utilizado cuando se quiere mejorar un proceso o atender sus problemas, incluyendo todas las posibles causas a la vez, y con base en los datos e información aportados por un análisis estadístico.

De acuerdo con el principio de Pareto existen unos cuantos problemas vitales que son originados por pocas causas clave, pero resulta necesario identificarlos mediante análisis adecuados. Uno de estos análisis es la *estratificación o clasificación de datos*. Estratificar es analizar problemas, fallas, quejas o datos, clasificándolos o agrupándolos de acuerdo con los factores que se cree pueden influir en la magnitud de los mismos, a fin de localizar las mejores pistas para resolver los problemas de un proceso (Pulido, 2009).

Otra herramienta importante es diagrama de Ishikawa. Es un método gráfico que relaciona un problema o efecto con sus posibles causas. El nombre de diagrama de Ishikawa es en honor al doctor Kaoru Ishikawa (1915-1989), quien fue uno de los principales impulsores de la calidad en Japón y en todo el mundo, y que además empezó a usar de manera sistemática el diagrama de causa-efecto.

El *diagrama de causa-efecto o de Ishikawa* es un método gráfico que relaciona un problema o efecto con los factores o causas que posiblemente lo generan. La importancia de este diagrama radica en que obliga a buscar las diferentes causas que afectan el problema bajo análisis y, de esta forma, se evita el error de buscar de manera directa las soluciones sin cuestionar cuáles son las verdaderas causas. El uso del diagrama de Ishikawa, con las tres herramientas anteriores,

ayudan a no dar por obvias las causas, sino que se trate de ver el problema desde diferentes perspectivas.

2.2 Metodología de la investigación

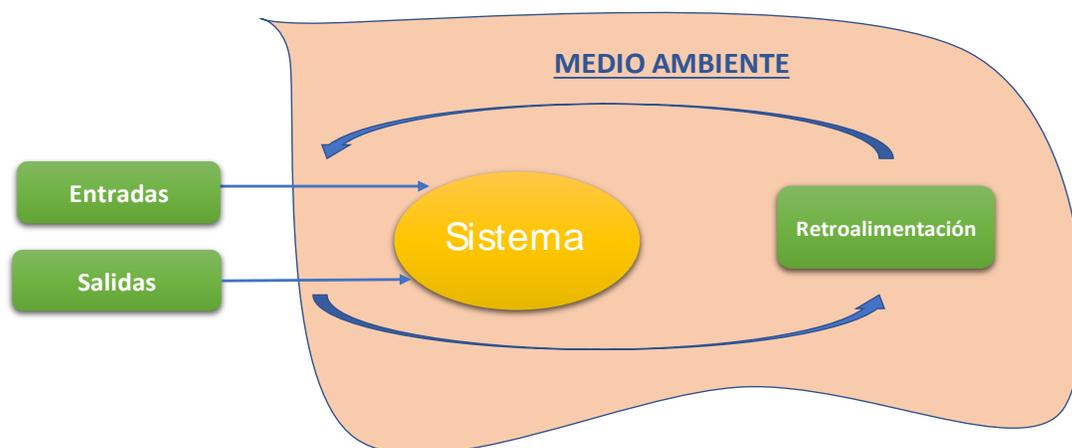
En este apartado se explica el mecanismo que se utilizó para el análisis de la problemática de investigación, tomando como base la “Guía metodológica en la línea de investigación de operaciones” y “Una metodología para el desarrollo para sistemas de información basado en computadoras”.

2.2.1 Fase I. Definición del problema

Mundo real: El problema se elige a partir de la realidad, es dónde se dan las primeras ideas para la investigación. En esta etapa es necesario definir el sistema u organización en el cual se pretende resolver el problema o elaborar una propuesta de mejora; determinar los subsistemas y sus relaciones, el entorno y su medio ambiente para finalmente, identificar los objetivos, las metas y los niveles de decisión con el objeto de determinar las expectativas de la investigación (Ortiz, 2006).

Conocimiento del medio ambiente. Obtención del medio ambiente general: organigrama, misión, visión y objetivos de la empresa. Obtención del medio ambiente particular: misión, visión y objetivos del área en donde se llevará a cabo el estudio, es decir, conocer y comprender la organización y los elementos que la componen. Identificación de las áreas relacionadas (Soria, 2001).

Figura 2. El sistema y su interacción



Fuente: Elaboración propia, 2018. Datos Curso sistemas de información, Capítulo 1.

1. *Observar el sistema:* Obtener los datos cualitativos y cuantitativos. Presentación de los procedimientos para la adquisición de información: registros, fichas, bitácoras, reportes estadísticos, cuestionarios, etc.
2. *Obtener el diagnóstico y/o problemática:* Se busca principalmente, identificar el problema u oportunidad de mejora, desmenuzando las partes que lo componen para intentar comprenderlo. Utilizando herramientas para obtener más datos y clasificarlos determinando la problemática y jerarquizarlos. Una herramienta sugerida es el análisis de Pareto o el diagrama de causa-efecto de Ishikawa.
3. *Información específica:* Obtener información específica sobre el problema a estudiar, indagando dentro y fuera de la organización, sobre la problemática.
4. *Determinar el estado del arte:* Investigar sobre qué se ha hecho sobre el tema, presentando la información con un enfoque sistémico. Información a nivel local, regional, regional, nacional e internacional, determinando los antecedentes y los pendientes hasta el momento sobre el tema.
5. *Planteamiento del problema de investigación.* Con base en la información recolectada y analizada, se plantean los objetivos (general y particulares) de la tesis, así como la justificación.

La finalidad de esta fase es obtener como producto principal, la problemática y el diagnóstico de los temas a estudiar.

2.2.2 Fase II. Construcción del modelo

El presente proyecto se enfoca en un modelo matemático, así que las actividades sugeridas son las siguiente:

1. *Determinación del marco teórico.* Formar el sustento de la investigación, explicando los conceptos necesarios sobre los temas que se abordarán en el desarrollo y construcción del modelo.
2. *Obtención de los datos confiables.* Si aún no se tiene los datos suficientes, consultar archivos, realizar cuestionarios o muestreos.

Analizar la información disponible mediante técnicas estadísticas u otras herramientas para análisis de datos.

3. *Definir las posibles variables que integrarán el modelo.* Para construir el modelo es necesario definir las variables que representen mejor la esencia del problema, así como sus restricciones. Finalmente, identificar los parámetros del modelo.
4. *Determinar el modelo diseñado.*

El producto final de esta fase es el modelo matemático construido.

2.2.3 Fase III. Simulación y/u Optimización

Esta fase se centra en la resolución del modelo matemático, es por ello que se debe identificar los recursos necesarios y disponibles para lograr el objetivo, cómo el software y el hardware para la obtención de resultados. La resolución de un modelo consiste en encontrar los valores de las variables o parámetros desconocidos, asociadas a las componentes controlables del sistema con el propósito de optimizar, si es posible, o cuando menos mejorar la eficiencia o la efectividad del sistema.

1. Identificar los recursos. Buscar el software correspondiente en un lenguaje adecuado.
2. Alimentar los datos del modelo al Programa y ejecutarlo hasta obtener la solución (soluciones) del modelo.
3. Validar del modelo: para saber que la construcción del modelo es la adecuada, es necesario hacer un número considerable de pruebas y las modificaciones necesarias para validarlo.
4. Interpretar los resultados de la solución del modelo, confrontándolos con la problemática y objetivos del sistema. Análisis de los manuales para interpretar los resultados.

Existen obstáculos que deben evitarse al usar modelos matemáticos. Un modelo es necesariamente, una idealización abstracta del problema, por lo que casi siempre se requieren aproximaciones y suposiciones de simplificación si se quiere que el modelo sea manejable (susceptible de ser resuelto). Por lo tanto, debe tener cuidado de que el modelo sea siempre una representación válida del problema.

Al finalizar esta fase, se debe obtener como producto: La Solución y Soluciones del Modelo Construido.

2.2.4 Fase IV. Evaluación

La intención de esta fase es ver que tan robusta es la solución (soluciones) del modelo, a diferentes cambios en los parámetros y estructura del modelo; es la fase de análisis de los resultados de la investigación.

1. Efectuar un análisis general de la solución y/o soluciones del modelo.
2. Efectuar análisis de sensibilidad a la solución, respecto a los datos de entrada.
3. Determinar los intervalos de control de los parámetro y datos de entrada.
4. Elegir la alternativa que da la solución que mejor se ajusta a los objetivos del sistema u organización.

Al finalizar esta fase, se debe obtener como producto: “Pruebas a la Solución”.

2.2.5 Fase V. Implementación

Una vez que se han hecho las pruebas necesarias a la solución del modelo, el siguiente paso es implantar los resultados e implicaciones y ver qué ocurre en el sistema estos cambios, para lo cual será necesario tomar en consideración los recursos humanos y la infraestructura del sistema.

1. Planeación para la instalación de solución.
2. Realizar un programa de trabajo para la conversión.
3. Realizar las predicciones lógicas y conclusiones.

Al finalizar esta fase, se debe obtener como producto: “Decisiones sobre el Sistema”.

2.2.5 Fase VI. Control y retroalimentación

En esta fase, la solución propuesta está operando y su funcionamiento debe ser evaluada por quien lo opera para detectar posibles errores y sus causas. Después de observar la operación, se pueden descubrir opciones que mejoren la eficiencia. Las actividades para esta fase son:

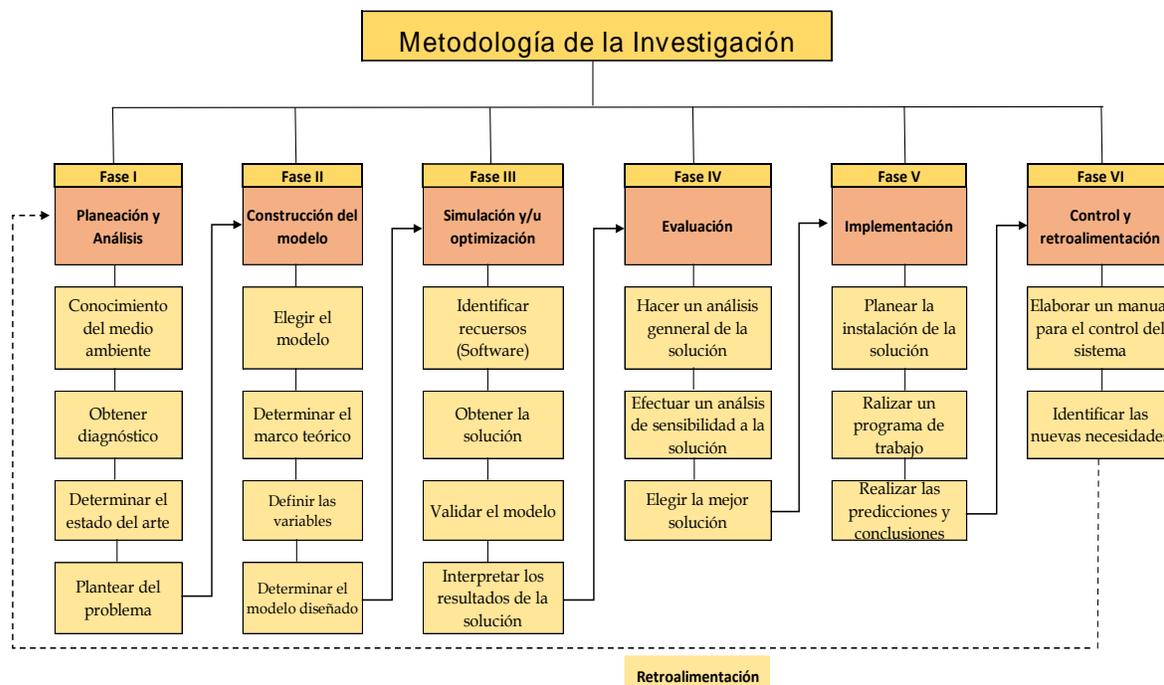
1. Elaborar un manual para el control del sistema, tomando en cuenta los recursos humanos de la organización.
2. Reestimación de los parámetros y verificación de los datos.
3. Definición de nuevas variables y/o eliminación de variables
4. Definición de nuevas restricciones y/o eliminación de restricciones.

5. Estructuración de la nueva problemática para el nuevo modelo.

Al finalizar esta fase, se debe obtener como producto: “Una Problemática Retroalimentada”.

La metodología antes expuesta es acorde al tipo de investigación, y se representa gráficamente en la siguiente figura:

Figura 3. Fases de la Metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración propia, noviembre 2018

Capítulo 3

Modelación

Una vez definida la metodología y todos aquellos conceptos necesarios para la construcción del modelo, se ubica el espacio físico, y se desarrolla la metodología propuesta teniendo como objetivo definir el sistema y subsistemas relacionados, además de identificar las variables, y diseñar el modelo.

4.1.1 Conocimiento del Medio Ambiente general y particular

Como parte del conocimiento del medio ambiente general, es importante ubicar el sistema, así como los elementos que lo componen. Conocer el compromiso u objetivo que tiene la empresa, así como el área en donde se desarrolla este proyecto. Posteriormente se definirá el problema

4.1.1.1 Contexto Organizacional del STC

Misión del STC: Proveer un servicio de transporte público masivo, seguro, confiable y tecnológicamente limpio. Con una tarifa accesible, que satisfaga las expectativas de calidad, accesibilidad, frecuencia y cobertura de los usuarios y se desempeñe con transparencia, equidad y eficiencia logrando niveles competitivos a nivel mundial.

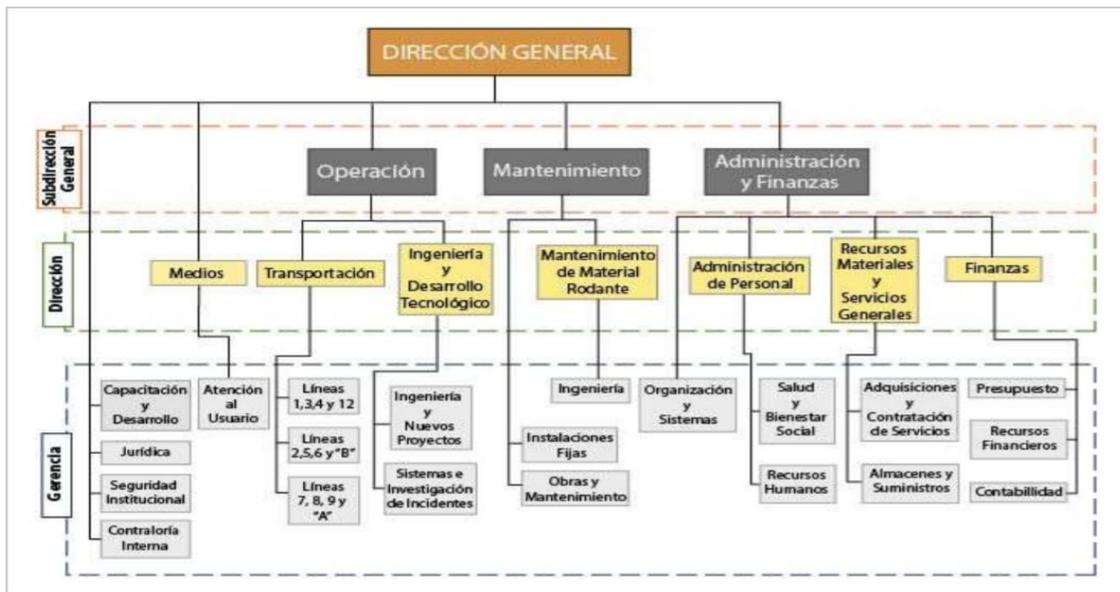
Visión del STC: Lograr un servicio de transporte de excelencia, que coadyuve al logro de los objetivos de transporte sustentable en la Zona Metropolitana del Valle de México, con un alto grado de avance tecnológico nacional, con cultura, vocación industrial y de servicio a favor del interés general y el mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos.

Función del STC: Transportar gente en la Ciudad de México y Área Metropolitana.

Objetivo del STC: Construir, operar y explotar un tren rápido de recorrido subterráneo y superficial, movido por energía eléctrica en la Ciudad de México y Área Metropolitana.

Estructura orgánica

Figura 1. Estructura orgánica del STC



La Dirección de ingeniería y nuevos Proyectos tiene como objetivos:

- Establecer oportunamente las directrices y lineamientos para la elaboración de programas en materia de ingeniería, investigación, desarrollo, transferencia e innovación tecnológica, gestión de la calidad y planeación estratégica, operativa e informática técnica, de conformidad con los plazos establecidos en el STC para tal efecto.
- Promover oportunamente el desarrollo de estudios y análisis orientados a la solución de problemas técnico operativos, investigación y seguimiento de incidentes ocurridos en los equipos e instalaciones que conforman la infraestructura operativa de la red de servicio.

El Sistema de Transporte Colectivo metro cuenta con en el área de Análisis Operativo dentro de la Dirección de Ingeniería y Desarrollo Tecnológico, misma que se encarga del análisis estadístico de los diferentes factores que afectan de manera directa e indirecta el servicio de transportación en las 12 líneas del metro.

El área de Análisis Operativo realiza en periodos semestrales o anuales un análisis de averías en toda la red con el objetivo de identificar los incidentes más frecuentes que se presentan en el horario de servicio. Estos eventos que generan retraso (incidentes), se caracterizan en ocho

distintas áreas: Gerencia de Líneas (GL), Situación Ajena al STC (SA), Seguridad Industrial e Higiene (SH), Situación Indeterminada (SI), Subdirección de Obra (SO), Vigilancia (VG), Material Rodante (MR) e Instalaciones Fijas (IF).

Dicho análisis se construye con base en los Informes Diarios de Operación: reportes que muestran los incidentes ocurridos en cada una de las líneas del STC a lo largo del día; tales reportes proporcionan información detallada como: fecha, línea, estación, área, tiempo de retardo y la hora en que éstos ocurren, en algunos casos también la zona o vía (sentido del recorrido).

En inicio del análisis, identificó a línea 1 como objeto de estudio ya que no solo presenta el mayor número de incidentes, sino también una tendencia creciente muy marcada en tiempo de retraso y frecuencia incidentes.

Nota importante: En esta primera etapa del análisis se tomaron dos criterios de medición, el primero es el tiempo de retraso por evento y el segundo es la frecuencia de cada evento.

Gráfica 9. Minutos acumulados de retardo por línea.



Fuente: elaboración propia octubre 2017. Datos: STC

Línea 1 es la que muestra un mayor tiempo de retraso, aproximadamente 23203 minutos por año. Si se considera que el servicio operado por el STC se ofrece los 365 días del año, con un horario en días laborables de 5:00 a 00:00 horas; los sábados de 06:00 a 00:00 horas, y los

domingos y días festivos de 7:00 a 00:00 horas. Entonces, línea 1 ha dejado de funcionar 20.35 días (considerando horario de días laborables) referente al acumulado de tiempo de retraso de 8 años.

Así, se ubica como objeto para el análisis, los incidentes ocurridos de 2008 a 2016 en Línea 1 del Sistema de Transporte colectivo metro.

Línea 1: Contexto

Figura 5. Información general sobre línea 1



LA LÍNEA 1

Longitud total de vía : 18 Kilómetros con 828 metros.

Estaciones totales: 20

Estaciones de correspondencias: 7

Estaciones de paso: 12

Tipo de construcción: Subterránea y superficie.

El el 2015, el número de pasajeros transportados fue de 267,604,987, esta cantidad representa el 16.5% del total de viajes que se hicieron en ese año en toda la red de metro.

Estaciones

Casi todas las estaciones que conforman esta línea son subterráneas, excepto la estación observatorio. Lo que permite descartar a la “lluvia” como cómo uno de los eventos que más retrasan el servicio, como suele ser común en otras líneas, evitando que los datos de tiempo se vean afectados por factores que no son controlables por el sistema.

Figura 6. Estaciones de línea 1 del STC.



Recolección y análisis de datos

Como una primera orientación para la elección de las variables, se analizaron los datos obtenidos para saber que incidentes retrasan significativamente el servicio, utilizando la herramienta de Pareto por cada año en el periodo de 2008 a 2016.

Las siguientes gráficas muestran un análisis de Pareto para cada catálogo de incidentes que se tenía en ese momento, no todas coinciden con los eventos o incidentes registrados que más retrasan el servicio. Es importante mencionar que los catálogos se han ido actualizando con el tiempo, ajustándolos a las nuevas necesidades de registro. Por otro lado, existen eventos que no coinciden con la gran mayoría de los años, ya ha habido factores que han favorecido a la disminución o aumento de estos. Sin embargo, en el apéndice se adjuntan los catálogos de cada año.

Gráfica 10. Gráfico de Pareto de retrasos del 2018.



Gráfica 11. Gráfico de Pareto de retrasos del 2009.



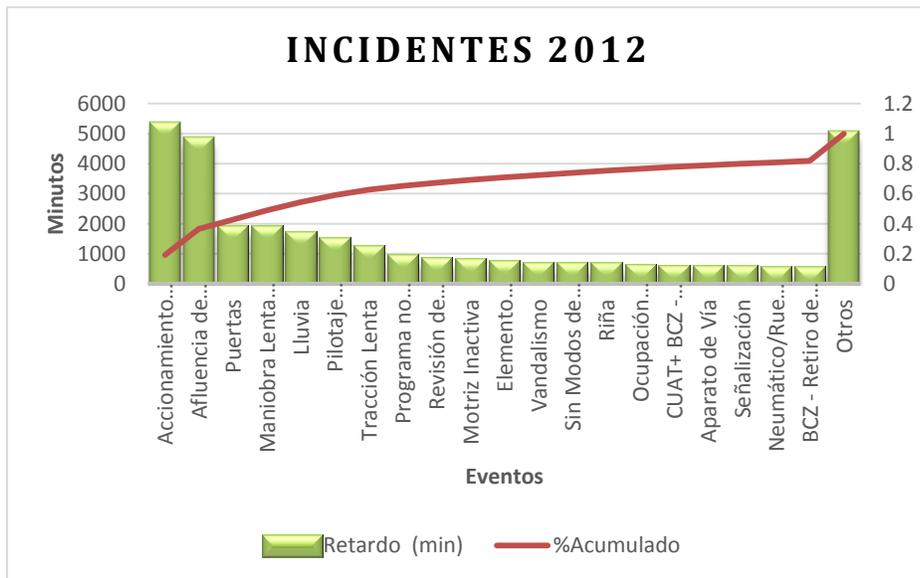
Gráfica 12. Gráfico de Pareto de retrasos del 2010.



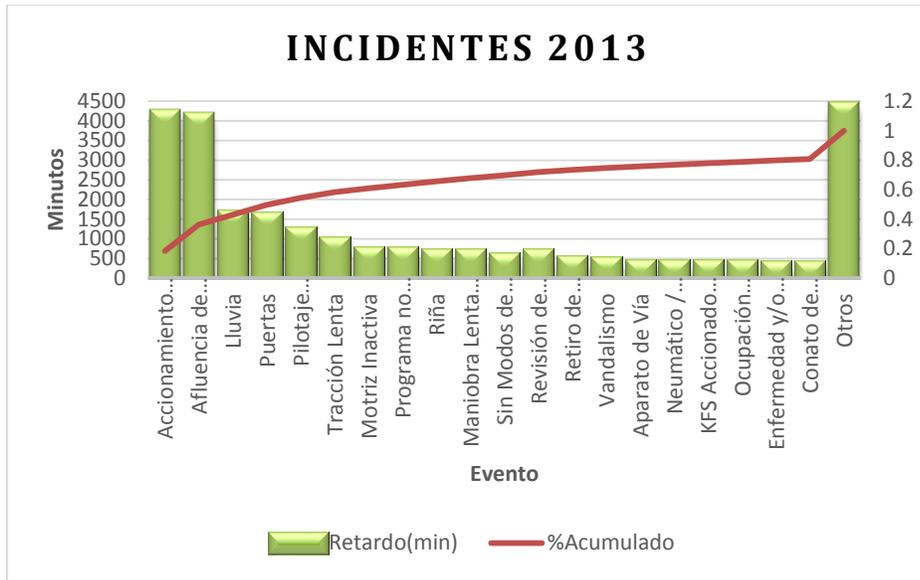
Gráfica 13. Gráfico de Pareto de retrasos del 2011.



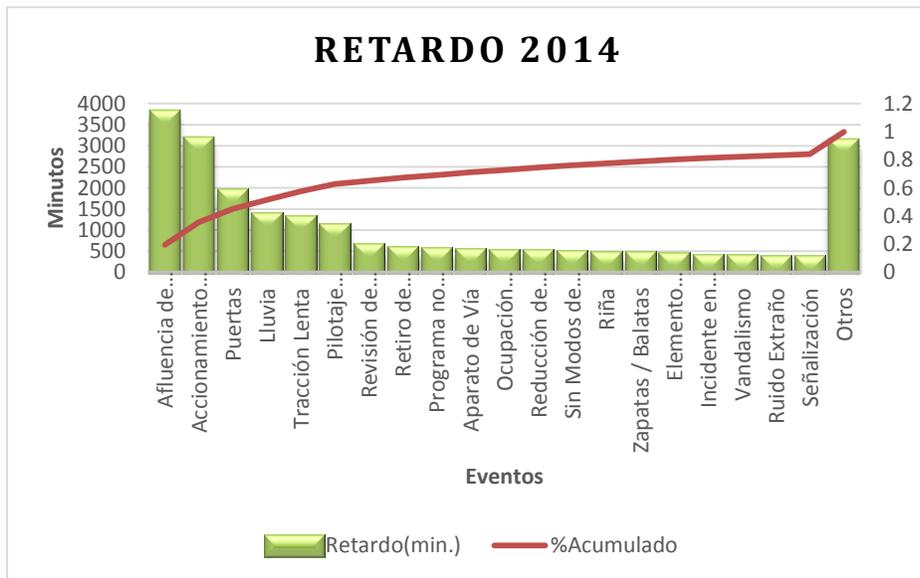
Gráfica 14. Gráfico de Pareto de retrasos del 2012.



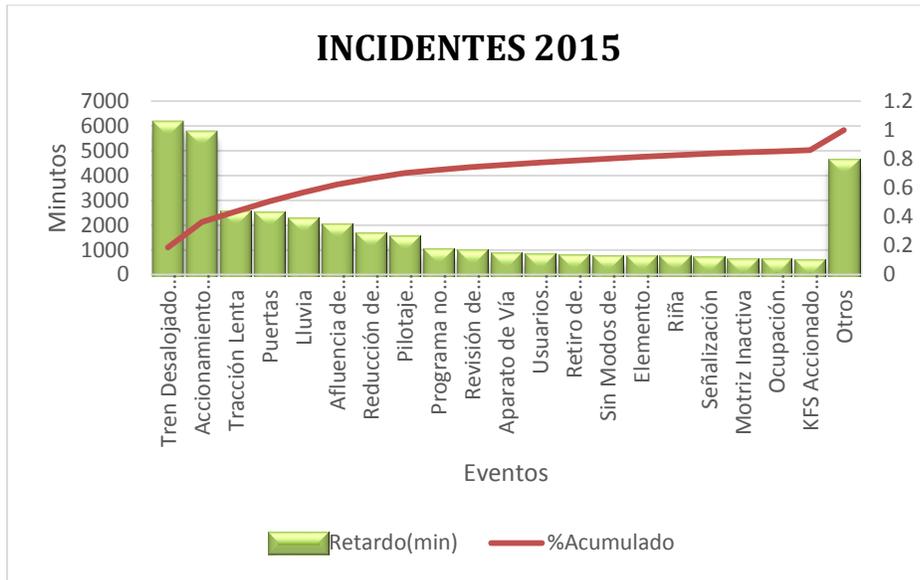
Gráfica 15. Gráfico de Pareto de retrasos del 2013.



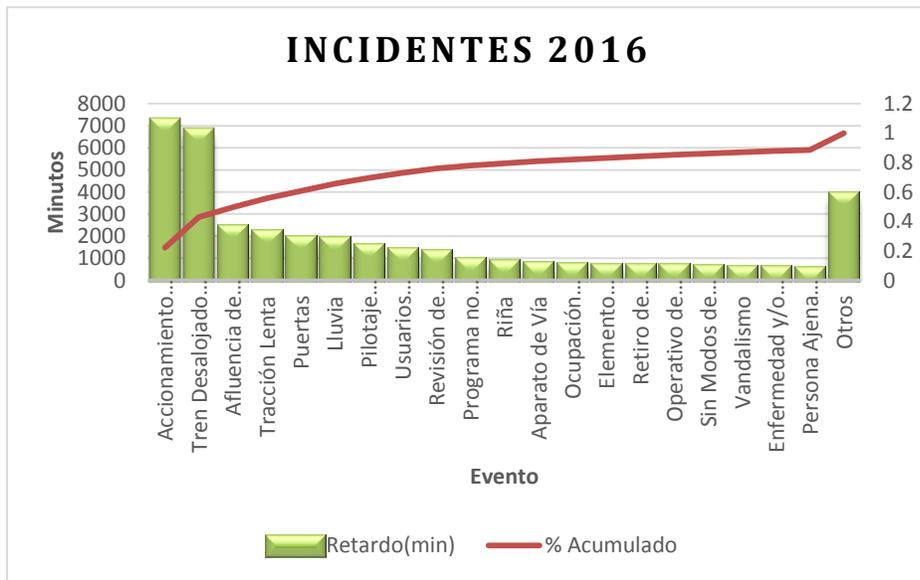
Gráfica 16. Gráfico de Pareto de retrasos del 2014.



Gráfica 17. Gráfico de Pareto de retrasos del 2015.



Gráfica 18. Gráfico de Pareto de retrasos del 2016.



Se obtuvo que el *Accionamiento de palanca de emergencia (KFS)* es el evento que más ha atrasado el servicio, además de presentar un aumento importante con respecto a cada año que antecede. Este evento se registra cuando se ha accionado alguna de las palancas de emergencia que se encuentra dentro del tren, a un costado de cada puerta, sin que se sepa el motivo del accionamiento.

En segundo lugar está *La afluencia de usuarios*, este evento se registra cuando hay gran cantidad de usuarios en los andenes, y estos no permiten un rápido descenso o ascenso al convoy. La *Lluvia* es el tercero más significativo, sin embargo, en línea 1 es un problema que solo se presenta en la estación Observatorio y además es un factor no controlable por el sistema. Los eventos de “*Puertas*”, “*Tracción Lenta*” y “*Pilotaje automático*” se relacionan con la funcionalidad del tren, apertura y cierre de las puertas de usuarios, sistema de tracción y frenado, y el principal modo de conducción del tren, respectivamente. Por último, “*Tren desalojado para satisfacer demanda*”, mantiene una relación con el primer evento mencionado, ya que se desalojan trenes que están en servicio y se mandan a estaciones que presentan problemas por el exceso de usuarios, todas estas maniobras requieren de tiempo y es el que se registra como retraso.

Las bases de datos de los KPI’s se analizaron, con el criterio de saber que eventos causaban un mayor retraso de tiempo. Los resultados que arrojó el análisis de Pareto para cada año, se muestran en la tabla 3 identificando siete casusa relevantes. Estos eventos son los que retrasan de forma significativa el servicio en el periodo 2010-2016. Cabe mencionar que, a pesar de tener datos de más años, se usaron estos últimos siete años con la intención de homologar la información contenida en estas bases de datos, ya que la clasificación de los incidentes ha sido modificada según la ocurrencia de eventos en años anteriores.

Tabla 3. Incidentes relevantes que retrasan el servicio en línea 1

| AÑO | Accionamiento de palanca de emergencia (KFS) | Afluencia de usuarios | Lluvia | Puertas | Tren desalojado para satisfacer demanda | Tracción Lenta | Pilotaje Automático | TOTAL (min) |
|--------------|--|-----------------------|---------------|---------------|---|----------------|---------------------|---------------|
| 2010 | 1,806 | 1,293 | 1,150 | 1,999 | 1,555 | 1,004 | 1,500 | 8,807 |
| 2011 | 3,475 | 1,285 | 1,452 | 2,002 | 3,516 | 1,340 | 1,494 | 13,070 |
| 2012 | 5,047 | 4,557 | 1,427 | 1,633 | 32 | 953 | 1,228 | 13,649 |
| 2013 | 4,047 | 3,968 | 1,464 | 1,444 | 4 | 818 | 1,069 | 11,745 |
| 2014 | 2,986 | 3,620 | 1,176 | 1,748 | 9 | 1,120 | 936 | 10,659 |
| 2015 | 5,390 | 1,672 | 1,899 | 2,155 | 5,774 | 2,184 | 1,170 | 19,074 |
| 2016 | 6,901 | 2,101 | 1,536 | 1,603 | 6,439 | 1,856 | 1,228 | 20,436 |
| Total | 29,652 | 18,496 | 10,104 | 12,584 | 17,329 | 9,275 | 8,625 | 97,440 |

Fuente: elaboración propia octubre 2017. Datos: STC

Elección de las variables

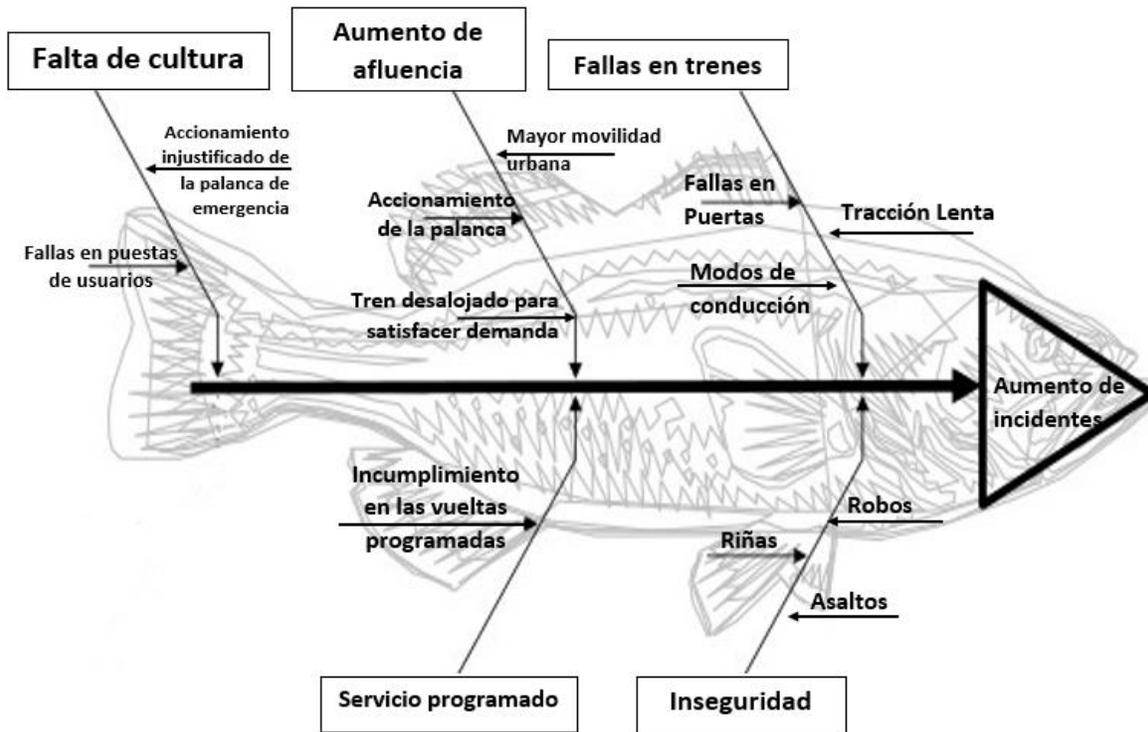
Este primer resultado y la información presentada en el primer capítulo, permitió para realizar un análisis de Ishikawa que facilitara la identificación de las causas principales, que a su vez serían las posibles variables del modelo de regresión múltiple lineal.

La figura 5 muestra los posibles factores que expliquen el tiempo de retardo en el servicio de los trenes de línea 1. La clasificación de las causas entre primarias y secundarias se logró por medio de un análisis de estratificación, tomando en cuenta a qué área pertenecía cada incidente relevante, ya que como se mencionó, estos eventos son clasificados por área, la cual es responsable de planear y aplicar el mantenimiento o estrategias necesarias para la resolución de problemas.

Los resultados de la tabla 3 se categorizaron de la siguiente manera:

Los eventos puertas y pilotaje automático (que es un modo de conducción), se clasifican en el área de Material Rodante, esta área se relaciona directamente con el funcionamiento del tren por lo que se engloban en *Fallas en trenes*. Las riñas, robos y asaltos son clasificados como *Inseguridad* dentro de las instalaciones, ya que pertenecen al área de Vigilancia. El aumento de afluencia es causado principalmente el aumento de movilidad como ya se ha mostrado en el primer capítulo, sin embargo, el accionamiento de la palanca de emergencia es evento que más ha retrasado el avance de los trenes (tabla 3), ya que al accionar la palanca, el conductor debe salir de la cabina e identificar la palanca accionada para desactivarla y el tren pueda seguir su recorrido.

Figura 6. Diagrama de Ishikawa de las causas que provocan el aumento de incidentes.



Fuente: Elaboración propia, junio 2018.

Construcción del modelo

El diagrama de Ishikawa permitió englobar las causas secundarias en causas más concretas. Estas causas primarias o de prioridad, tienen valores que han sido obtenidos para ser incluidos en el modelo de regresión múltiple, quedando como variables explicativas contempladas en el diseño: Afluencia, Fallas de trenes, Inseguridad, Vueltas realizadas; que se espera expliquen en aumento en el tiempo de retardo.

Tabla 4. Variables por considerar en el modelo.

| Año | RETARDO (min) y | Afluencia x_1 | Fallas en trenes x_2 | inseguridad x_3 | Vueltas realizadas x_4 |
|-------|--------------------|------------------|----------------------------|--------------------|------------------------------|
| 2008 | 139,265 | 230,589,007 | 1,548 | 3 | 158,033 |
| 2009 | 124,775 | 206,523,406 | 1,614 | 6 | 162,300 |
| 2010 | 132,954 | 212,308,906 | 1,696 | 60 | 118,277 |
| 2011 | 127,056 | 221,710,730 | 1,809 | 80 | 160,091 |
| 2012 | 131,047 | 238,592,224 | 1,822 | 111 | 159,820 |
| 2013 | 145,366 | 241,194,894 | 1,725 | 150 | 160,932 |
| 2014 | 136,608 | 223,114,670 | 1,768 | 83 | 160,840 |
| 2015 | 155,842 | 230,750,349 | 2,292 | 118 | 160,531 |
| 2016 | 172,465 | 238,386,027 | 1,908 | 168 | 160,768 |
| Total | 1,265,378 | 2,043,170,213 | 16,182 | 779 | 1,401,591 |

Fuente: Elaboración propia, junio 2018

Construcción del modelo

Lo que se busca es obtener un modelo de regresión múltiple que incluya las variables que mejor explique el aumento del tiempo de retraso de los trenes de línea 1. Si se toma como base los resultados obtenidos anteriormente, el modelo de regresión múltiple que se propone es:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + \beta_4 x_{4i} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, 9$$

Donde:

| Variables | Unidades: |
|--|-------------------------|
| Variable de respuesta (variable dependiente). y_i = Es el tiempo total de retraso para el año i | Minutos |
| Variables explicativas (independientes). x_{1i} = Afluencia de usuarios en el año i | N° de personas / año |
| x_{2i} = Fallas que se presentan en el tren en el año i | N° de fallas/año |
| x_{3i} = Inseguridad (robos y riñas) en el año i | N° de robos y riñas/año |
| x_{4i} = Vueltas realizadas de los trenes en el año i | N° de vueltas /año |

Interpretación de los resultados

Para la resolución del modelo se utilizará el software *StatGraphics*, posteriormente se analizarán con MINITAB, y finalmente se utilizará el modo matricial para modelos de regresión múltiple lineal, este último se resuelve el Wolfram Mathematica.

Los valores de la Tabla 4 se introdujeron en el paquete estadístico *StatGraphics* para la realización del análisis de regresión múltiple. Los resultados se muestran a continuación:

Regresión Múltiple - Retardo

Variable dependiente: Retardo (min.)

Variabes independientes:

- Afluencia
- Fallas en trenes
- Inseguridad
- Vueltas realizadas

Tabla 5. Regresión con las cuatro variables propuestas.

| | | <i>Error</i> | <i>Estadístico</i> | |
|-----------------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimación</i> | <i>Estándar</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
| CONSTANTE | 15302.9 | 152333. | 0.100457 | 0.9248 |
| Afluencia de usuarios | 0.4108 | 0.704602 | 0.583025 | 0.5912 |
| Fallas en trenes | 19.7149 | 31.0851 | 0.634224 | 0.5604 |
| inseguridad | 79.4892 | 161.269 | 0.492897 | 0.6479 |
| vueltas realizadas | -0.06609 | 0.420824 | -0.157049 | 0.8828 |

Análisis de Varianza

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1.01617E9 | 4 | 2.54042E8 | 1.19 | 0.4358 |
| Residuo | 8.55553E8 | 4 | 2.13888E8 | | |
| Total (Corr.) | 1.87172E9 | 8 | | | |

R-cuadrada = 54.2906 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 8.58115 porciento

Error estándar del est. = 14624.9

Error absoluto medio = 7268.61

Estadístico Durbin-Watson = 0.760866 (P=0.0209)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.364542

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Retardo y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Retardo} = 15302.9 + 0.4108 * \text{Afluencia} + 19.7149 * \text{Fallas en trenes} + 79.4892 * \text{inseguridad} - 0.06609 * \text{vueltas realizadas}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0.05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.8828, que corresponde a vueltas realizadas. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar vueltas realizadas del modelo.

Los resultados del modelo muestran que las tres primeras variables mantienen una relación directa con el retardo de los trenes, es decir, si aumenta la afluencia de usuarios o las fallas de los trenes o la inseguridad, el tiempo de retraso también aumentará. Mientras que la última variable muestra una relación inversa con respecto a la variable de respuesta, es decir, si el número de vueltas que dan los trenes de línea 1 aumenta, el tiempo de retaso disminuye.

El valor de la R-cuadrada indica que las cuatro variables independientes, explican en un 54% el tiempo de retraso en el servicio. Sin embargo, el valor de R- cuadrada ajustada muestra que solo es explicado en un 8.6%.

Para no redundar en el modelo poniendo variables innecesarias, el análisis propone quitar la variable *Vueltas Realizadas*, ya que se considera que no aporta mucho en la explicación del tiempo de retraso.

Ya que se han observado algunas discrepancias en los resultados como los valores de R-cuadrada y R-Ajustada, y el valor de variable *Inseguridad*, ya que es un valor muy alto en el aumento del tiempo por cada acontecimiento que se presente en un año. Además, el estadístico Durbin-Watson evidencia una posible tendencia de los residuos, lo que implicaría error en los resultados ya que los datos de entrada pudieron haber sido manipulados.

Por lo tanto, se realizó un segundo análisis del modelo en la paquetería MINITAB, resultando lo siguiente:

Resumen del modelo

| S | R-cuad. | R-cuad. (ajustado) | R-cuad. (pred) |
|---------|---------|--------------------|----------------|
| 14625.0 | 54.29% | 8.58% | 0.00% |

Coefficientes

| Término | Coef | EE del coef. | Valor T | Valor p | VIF |
|------------------|----------|--------------|---------|---------|------|
| Constante | 15306 | 152338 | 0.10 | 0.925 | |
| Afluencia | 0.000411 | 0.000705 | 0.58 | 0.591 | 2.72 |
| Fallas en trenes | 19.7 | 31.1 | 0.63 | 0.560 | 1.67 |
| inseguridad | 79 | 161 | 0.49 | 0.648 | 3.22 |
| vuelatas | -0.066 | 0.421 | -0.16 | 0.883 | 1.32 |

Ecuación de regresión

| | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
|---|---------|-----------|------------------|-------------|----------|----|----|----|
| | Retardo | Afluencia | Fallas en trenes | inseguridad | vuelatas | | | |
| 1 | 139265 | 230589007 | 1548 | 3 | 158033 | | | |
| 2 | 124775 | 206523406 | 1614 | 6 | 162300 | | | |
| 3 | 132954 | 212308906 | 1696 | 60 | 118277 | | | |
| 4 | 127056 | 221710730 | 1809 | 80 | 160091 | | | |
| 5 | 131047 | 238592224 | 1822 | 111 | 159820 | | | |
| 6 | 145366 | 241194894 | 1725 | 150 | 160932 | | | |
| 7 | 136608 | 223114670 | 1768 | 83 | 160840 | | | |
| 8 | 155842 | 230750349 | 2292 | 118 | 160531 | | | |
| 9 | 172465 | 238386027 | 1908 | 168 | 160768 | | | |

El cuadro de abajo muestra los datos que se introdujeron para el análisis, mientras que en el cuadro de arriba están los resultados del análisis de regresión.

Como se observa, los resultados de ambos softwares son muy similares. Así que se recurrió al Modelo Matricial de Regresión Múltiple para realizar el análisis de forma más detallada. El procedimiento es el siguiente:

Para un modelo de k variables con n observaciones de la forma

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_k x_{1k} + \varepsilon_1 \\
 Y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_k x_{2k} + \varepsilon_2 \\
 &\vdots \\
 Y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_k x_{nk} + \varepsilon_n
 \end{aligned}$$

El modelo general se puede expresar de forma matricial como sigue:

donde

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix}.$$

Entonces para sacar el valor de los parámetros se opera de la siguiente manera

$$Y = XB \rightarrow X^t Y = X^t X B \rightarrow Y(X^t X)^{-1} = B$$

Utilizando la forma matricial, los datos se operaron el software *Wolfram Mathematica*. Marcado con amarillo se muestra el resultado obtenido para el vector de incógnitas, es decir, el valor de los parámetros β_i .

```

Sin título-1 * - Wolfram Mathematica 10.3 (Depurar)
Archivo Edición Insertar Formato Celda Gráficos Evaluación Paletas Ventana Ayuda

(Depurar) In[47]:=
x = {{230 589 007, 1548, 3, 158 033}, {206 523 406, 1614, 6, 162 300},
      {212 308 906, 1696, 60, 118 277}, {221 710 730, 1809, 80, 160 091},
      {238 592 224, 1822, 111, 159 820}, {241 194 894, 1725, 150, 160 932},
      {223 114 670, 1768, 83, 160 840}, {230 750 349, 2292, 118, 160 531},
      {238 386 027, 1908, 168, 160 768}}
yt = {{139 265, 124 775, 132 954, 127 056, 131 047, 145 366, 136 608, 155 842, 172 465}}
xt = Transpose[x]
      |transposición
y = Transpose[yt]
      |transposición
xtx = xt.x
N[w = Inverse[xtx]]
      |valor... |matriz inversa
N[m = w.xt.y]
      |valor numérico

(Depurar) Out[53]=
{{0.00047327}, {21.2602}, {67.2137}, {-0.07001}}
  
```

Los valores son muy próximos, y en algunos casos iguales a los obtenidos anteriormente con *StatGraphics* y *MINITAB*. Por lo tanto, los resultados de los coeficientes de regresión obtenidos en el análisis son válidos a pesar de no tener una interpretación lógica real.

Interpretación de los datos de la solución

El resultado obtenido en StatGraphics, sugiere quitar del modelo a la variable Vueltas, ya su valor-p está por encima del 0.05 y es el valor más alto con respecto a las otras variables esto se reduce a decir que su aportación no es significativa para explicar el tiempo de retraso de los trenes, y que puede ser eliminada del modelo de regresión. En la siguiente se muestra el análisis realizado a las tres variables restantes, una vez más con StatGraphics.

Regresión Múltiple - Retardo

Variable dependiente: Retardo (min.)

VARIABLES INDEPENDIENTES:

Afluencia (miles)

Fallas en trenes

inseguridad

Tabla 6. Regresión con solo tres de las variables propuestas.

| | | <i>Error</i> | <i>Estadístico</i> | |
|------------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimación</i> | <i>Estándar</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
| CONSTANTE | 17529.7 | 136077. | 0.128822 | 0.9025 |
| Afluencia | 0.360777 | 0.563874 | 0.639818 | 0.5505 |
| Fallas en trenes | 18.7453 | 27.3333 | 0.685804 | 0.5233 |
| inseguridad | 86.1978 | 139.52 | 0.617819 | 0.5637 |

Análisis de Varianza

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1.01089E9 | 3 | 3.36964E8 | 1.96 | 0.2389 |
| Residuo | 8.60829E8 | 5 | 1.72166E8 | | |
| Total (Corr.) | 1.87172E9 | 8 | | | |

R-cuadrada = 54.0087 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 26.414 porciento

Error estándar del est. = 13121.2

Error absoluto medio = 7490.82

Estadístico Durbin-Watson = 0.804537 (P=0.0087)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.345077

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Retardo y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Retardo} = 17529.7 + 0.360777 * \text{Afluencia} + 18.7453 * \text{Fallas en trenes} + 86.1978 * \text{inseguridad}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0.05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.5637, que corresponde a inseguridad. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar inseguridad del modelo.

Se observa que el valor de R-cuadrada no varía mucho con respecto al modelo de cuatro variables, sin embargo 54% es un valor bajo.

Validar el modelo

En esta fase se muestra el resultado de una ardua búsqueda por obtener las variables que mejor describan la problemática.

En la tabla ___ se mostraron las posibles variables a considerar, sin embargo, se observa que los valores en la columna de inseguridad oscilan entre 3 y 168 eventos anuales, siendo la media de 87, y si se observan los dos primeros valores que son 3 y 6 mientras los posteriores a este, son mayores a 60, lo que da pauta a pensar en un posible error en la toma de datos. Es situación se podría corroborar con el valor obtenido en la sección ___(interpretación de los resultados), con el valor del estadístico Durbin-Watson, como se menciona en esa sección. Es por ello que en este apartado se realizaron cambios en la toma de datos.

1. Aplicación del modelo. Con base en lo anterior escrito, se descartaron los datos del 2008 y 2009. Se realizó una vez más el análisis en el software de regresión obteniendo los siguientes resultados:

Regresión Múltiple - min. de retardo

Variable dependiente: min. de retardo

Variables independientes:

Afluencia

Fallas en trenes

Inseguridad

Vueltas realizadas

| | | <i>Error</i> | <i>Estadístico</i> | |
|---------------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimación</i> | <i>Estándar</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
| CONSTANTE | 367524. | 126456. | 2.90633 | 0.1008 |
| Afluencia | -0.00144741 | 0.000664565 | -2.17799 | 0.1613 |
| fallas en trenes | 24.4192 | 14.2817 | 1.70982 | 0.2294 |
| inseguridad | 674.771 | 159.684 | 4.22566 | 0.0517 |
| vuelatas realizadas | -0.0778839 | 0.248833 | -0.312997 | 0.7839 |

Análisis de Varianza

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1.49549E9 | 4 | 3.73873E8 | 9.11 | 0.1013 |
| Residuo | 8.2057E7 | 2 | 4.10285E7 | | |
| Total (Corr.) | 1.57755E9 | 6 | | | |

R-cuadrada = 94.7985 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 84.3954 porciento

Error estándar del est. = 6405.35

Error absoluto medio = 2823.59

Estadístico Durbin-Watson = 3.00687 (P=0.8391)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.543127

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre min. De retardo y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

min. De retardo = 367524. - 0.00144741*Afluencia + 24.4192*fallas en trenes + 674.771*inseguridad - 0.0778839*vuelatas realizadas

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es mayor o igual que 0.05, no existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.7839, que corresponde a vueltas realizadas. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar vueltas realizadas del modelo.

Interpretación de los resultados: Los resultados del modelo muestran que la variable Afluencia tiene una relación inversa al Tiempo de Retraso, es decir, que si aumenta la afluencia de usuario en la línea 1, el tiempo de retraso disminuye, lo que permite decir, que el aumento de clientes para el STC no ha sido un factor que realmente provoque que el servicio sea más lento.

Las dos siguientes variables mantienen una relación directa con el retardo de los trenes, es decir, si aumentan las fallas de los trenes o la inseguridad, el tiempo de retraso también aumentará. Mientras que la última variable muestra una relación inversa con respecto a la variable de respuesta, es decir, si el número de vueltas que dan los trenes de línea 1 aumenta, el tiempo de retaso disminuye, lo que tiene cierta lógica, ya que los trenes tienen un numero de vueltas programadas anualmente, si se cumpliera ese servicio programado, se satisfaría a todos los usuarios.

De manera más detallada, el modelo permite decir que, si la afluencia aumenta mil personas por año, el tiempo de retraso disminuirá 1.4 minutos anuales; además que, cada falla en los trenes que se presenten en un año, el tiempo de retaso aumentará 24.4min. anuales; por cada robo o riña que se presente en un año de servicio, el tiempo de retraso amentará 674 minutos de retraso; por último, por cada 100 vueltas de servicio se aumente en un año, el retraso disminuirá casi 8 minutos.

El valor de la R-cuadrada indica que las cuatro variables independientes, explican el 94.4% el tiempo de retraso en el servicio. Además, el valor de R- cuadrada ajustada muestra que solo es explicado en un 84.4%.

Para no redundar en el modelo poniendo variables innecesarias, el análisis propone quitar la variable *Vueltas Realizadas*, ya que es el valor-p más alto y se puede considerar que su aportación en el modelo de regresión puede no ser significativa. El siguiente cuadro muestra los resultados en el software:

Regresión Múltiple – min. De retardo

Variable dependiente: min. De retardo

Variables independientes:

Afluencia

Fallas en trenes

Inseguridad

vueltas realizadas

| | | <i>Error</i> | <i>Estadístico</i> | |
|--------------------|-------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| <i>Parámetro</i> | <i>Estimación</i> | <i>Estándar</i> | <i>T</i> | <i>Valor-P</i> |
| CONSTANTE | 367524. | 126456. | 2.90633 | 0.1008 |
| Afluencia | -0.00144741 | 0.000664565 | -2.17799 | 0.1613 |
| fallas en trenes | 24.4192 | 14.2817 | 1.70982 | 0.2294 |
| inseguridade | 674.771 | 159.684 | 4.22566 | 0.0517 |
| vueltas realizadas | -0.0778839 | 0.248833 | -0.312997 | 0.7839 |

Análisis de Varianza

| <i>Fuente</i> | <i>Suma de Cuadrados</i> | <i>Gl</i> | <i>Cuadrado Medio</i> | <i>Razón-F</i> | <i>Valor-P</i> |
|---------------|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------|----------------|
| Modelo | 1.49549E9 | 4 | 3.73873E8 | 9.11 | 0.1013 |
| Residuo | 8.2057E7 | 2 | 4.10285E7 | | |

| | | | | | |
|---------------|-----------|---|--|--|--|
| Total (Corr.) | 1.57755E9 | 6 | | | |
|---------------|-----------|---|--|--|--|

R-cuadrada = 94.7985 porciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 84.3954 porciento

Error estándar del est. = 6405.35

Error absoluto medio = 2823.59

Estadístico Durbin-Watson = 3.00687 (P=0.8391)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.543127

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre min. De retardo y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

Minutos de retardo = 367524. - 0.00144741*Afluencia + 24.4192*fallas en trenes + 674.771*inseguridad - 0.0778839*vueltas realizadas

Conclusiones

Por lo tanto, se concluye que un modelo de regresión lineal Múltiple puede explicar el aumento en el tiempo de retraso del recorrido de trenes de línea 1. Además:

- El STC presenta un aumento significativo en el tiempo de retraso en el servicio de línea 1, siendo esta línea una de las que más usuarios transporta.
- Los eventos que podrían disminuir el tiempo de retraso son los relacionados con las fallas en los trenes, que es un área controlable por el sistema.
- Existen eventos que no son controlados por el sistema, como afluencia de usuarios, la descomposición de las puertas de usuarios y el accionamiento injustificado de las palancas de emergencia. Estos y otros, son debido a la falta de cultura para el uso de las instalaciones por parte de los usuarios.
- El modelo sistémico propuesto en este trabajo, explica en más de 80% las causas que retrasan el servicio, por lo tanto, su uso para toma de decisiones es confiable.

Glosario

Densidad poblacional: La relación entre un espacio determinado y el número de personas que lo habitan

Conurbación: Conjunto de varios núcleos urbanos inicialmente independientes y contiguos por sus márgenes, que al crecer acaban formando una unidad funcional

Viajes: el recorrido de un lugar de origen a uno de destino, con un propósito específico, en que se usa uno o varios medios de transporte o se camina.

Parque vehicular: número de vehículos de motor registrados en circulación.

Megalópolis: ciudad gigantesca o gran concentración urbana.

Averías: evento que se presenta durante el transcurso o trayectoria de algo, entorpeciendo la acción.

Instalaciones fijas

Referencias

- AFS Analytics. (2016). *Metros del Mundo*. Recuperado el 24 de Octubre de 2018, de Guía Mundial de Metros organizados por ciudades, países y continentes: Metros del mundo: <http://www.metrodelmundo.com.ar/>
- American Public Transportation Association. (28 de Mayo de 2011). *Transit Benefits: Public Transportation*. Recuperado el 24 de Octubre de 2018, de ENVIRONMENT: <http://www.publictransportation.org:80/benefits/environment.asp>
- Audenhove, F.-J. V. (junio de 2014). *The Future of Urban Mobility 2.0*. Obtenido de Business Wire: https://www.uitp.org/sites/default/files/members/140124%20Arthur%20D.%20Little%20%20UITP_Future%20of%20Urban%20Mobility%202%200_Full%20study.pdf
- Banco Mundial. (2017). *Movilidad*.
- CAF. (2010). *Observatorio de Movilidad Urbana para América Latina*. Panamericana Formas e Impresos S.A.
- CAF. (22 de agosto de 2013). *Banco de desarrollo de América Latina*. Obtenido de Qué es Movilidad urbana: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2013/08/que-es-movilidad-urbana/?parent=14062>
- Cascales, G. M., & Jiménez Gómez, P. (2016). Estudio del arte de indicadores de movilidad urbana sostenible. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, 54-57.
- Castro, A. E. (2012). Algunas notas históricas sobre la correlación y regresión y su uso en el aula. *Números*, 81, 5-14.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2016). *Movilidad, vivienda y Derechos Humanos*. Ciudad de México. doi:ISBN: 978-607-729-314-9
- Duque, F. B. (2007). Derecho a la movilidad. La experiencia de Bogotá. *Bogotá D.C., X(20)*, 169-181.
- Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal. (s.f.). *Problemas de Movilidad en la Ciudad de México*. Ciudad de México.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal . (2014). *Ley de Movilidad de la Ciudad de México*. Ciudad de México.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2002). *Ley de Transporte y Vialidad del Distrito Federal*. Ciudad de México. Obtenido de <http://www.aldf.gob.mx/archivo-18b25984124e5b832406deb1ea65c408.pdf>
- Gakenheimer, R. (1998). Los problemas de la movilidad. *EURE Santiago*, 24(72), 33-52. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71611998007200002>
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2009). *Econometría* (Quinta Edición ed.). México: The McGraw-Hill.

- Gutiérrez, A. (2012). ¿Qué es la movilidad? *Bitácora Urbano Territorial*, 2(21), 61-74.
- Hernández, G. J. (2016). *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Medellín: Fondo editorial.
- INEGI. (2006). *Distribución de la población mexicana y su economía sectorial*. Ciudad de México. Recuperado el 30 de Octubre de 2018
- INEGI. (2015). *INEGI, Encuesta intercensal 2015*. Recuperado el 16 de octubre de 2018, de Densidad Poblacional: <http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/densidad.aspx?tema=P>
- INEGI. (2017). *Banco de México*. Obtenido de Transportes: Banco de México: <http://www.beta.inegi.org.mx/app/indicadores/#divFV1011000057>
- INEGI. (2018). *Comunicado de prensa: Encuesta de Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México 2017*. Ciudad de México. Recuperado el 18 de octubre de 2018
- Normalisation, O. I. (2015). *ISO*. Obtenido de ISO 9000: 2015 (es): <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es>
- ONU. (10 de julio de 2014). *Naciones Unidas*. Obtenido de Departamento de Asuntos Económicos y Sociales: Naciones Unidas
- Ortiz, E. M. (2006). Guía metodológica en la línea de investigación de operaciones para elaborar con calidad tesis y tesinas. *Noveno congreso nacional de ingeniería electromecánica y de sistemas*.
- Pardo, C. F. (2009). *Los cambios en los sistemas integrados de transporte masivo en las principales ciudades de América Latina*. Santiago: Publicación de las Naciones Unidas.
- Pulido, H. G. (s.f.). Conceptos básicos de la calidad. En H. G. Pulido, *Control Estadístico de la Calidad y Seis Sigma* (Segunda Edición ed.). México: The Mc Graw-Hill.
- Rivera, V. M., & Zaragoza, M. L. (2007). *Análisis de los sistemas de transporte*. Querétaro.
- Robles, J. (13 de Octubre de 2015). "Cerebro" del Metro, detenido en los años 70. *El Universal*. Obtenido de <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/df/2015/08/13/cerebro-del-metro-detenido-en-los-anos-70#imagen-1>
- Roca, F. A. (2005). Los medios de transporte. En F. A. Roca, *Trámites y documentos en materia aduanera* (págs. 125-137). México: Ediciones especial ISEF.
- Secretaría de Movilidad. (s.f.). *Secretaría de Movilidad CDMX*. Recuperado el 23 de octubre de 2018, de Historia del transporte en la Ciudad de México: http://data.semovi.cdmx.gob.mx/wb/stv/cinco_siglos_de_transporte_en_la_ciudad_de_mexico_.html
- Sistema de Transporte Colectivo. (2014). *El metro es de todos*. Ciudad de México: Gobierno del Distrito Federal. Recuperado el 29 de Octubre de 2018
- Sistema de Transporte Colectivo. (s.f.). *Organismo: Sistema de Transporte Colectivo*. Recuperado el 23 de octubre de 2018, de <https://www.metro.cdmx.gob.mx/organismo/acerca-de>

- Spiegel, M. R., & Stephens, L. (2009). *Estadística* (Cuarta edición ed.). México: The McGraw-Hill.
- STC. (2017). *Diagnóstico sobre el servicio y las instalaciones del Sistema de Transporte Colectivo 2013-2018*. Ciudad de México. Recuperado el 30 de Octubre de 2018
- STC. (s.f.). *Sistema de Transporte Colectivo*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2018, de Cifras de operación: STC: <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/afluencia-de-estacion-por-linea/afluencia-de-estacion-por-linea-2017>
- Tomtom Traffic. (2016). *Tomtom Traffic*. Recuperado el 25 de Octubre de 2018, de About Tomtom City: https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-news/about
- Universidad Nacional de Educación a Distancia. (2009). *Innova UNED*. Recuperado el 6 de Noviembre de 2018, de Historia del mundo contemporáneo: UNED: http://ocw.innova.uned.es/epica/his_contempo/contenidos/html/unidad2/unidad001_4.htm
|
- Urban transportation research & USDOT Federal Transit Administration. (s.f.). *National BRT Institute*. Recuperado el 24 de Octubre de 2018, de BRT Basics: National BRT Institute: <https://nbrti.org/learn/>
- Vasconcellos, E. A. (2001). *Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas*. São Paulo: Conselho Editorial.
- Walpole, R. E., Myers, R., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. (Novena edición ed.). México: Pearson.