



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelo de simulación discreta
como herramienta para el análisis
del comportamiento de la Línea 3
del Metro de la CDMX en
condiciones normales y de falla**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Industrial

P R E S E N T A

Francisca Jimena Torres Villa

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Armando Moisés Pérez Silva



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Ingresada 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado MODELO DE SIMULACION DISCRETA COMO HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA LINEA 3 DEL METRO DE LA CDMX EN CONDICIONES NORMALES Y DE FALLA que presenté para obtener el título de INGENIERA INDUSTRIAL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

FRANCISCA JIMENA TORRES VILLA
Número de cuenta: 318067454

Índice

Capítulo I. Introducción	4
Introducción	4
Justificación	5
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
Pregunta de investigación general	6
Pregunta de investigación particular	6
Alcances y limitaciones	6
Alcances del trabajo:	6
Limitaciones del trabajo:	7
Estructura de la tesis:	7
Capítulo II. Estado del arte y marco teórico	8
2.1. Estado del arte	8
2.2. Marco teórico	9
2.2.1. Modelos de simulación	9
2.2.2. Tipos de modelos de simulación	10
2.2.3. Conceptos básicos de un modelo de simulación	10
2.2.4. Ventajas y desventajas de los modelos de simulación	11
2.2.5. Programas especializados en simulación	12
2.2.6. Sistemas de transporte público	13
2.2.6.1. Tipos de sistemas de transporte público	14
2.2.6.2. Modelación de transporte	15
2.2.7. Fallas del STC Metro	17
2.2.7.1. Fallas operativas	17
2.2.7.2. Fallas técnicas	17
Capítulo III. Metodología	18
3.1. Recolección de datos	18
3.1.1. Recolección de datos documental	18
3.1.2. Recolección de datos experimental de datos	28
3.2. Procesamiento de datos	31
3.3. Definición de variables	34
3.4. Diseño conceptual	35

3.4.1. Definición del alcance del modelo.....	37
3.4.2. Descripción de la dinámica e interacción las entidades del sistema	37
Capítulo IV. Desarrollo del modelo de simulación.....	38
4.1. Construcción del modelo.....	38
4.1.1. Elementos del modelo.....	39
4.2. Implementación del modelo	40
4.2.1. Generación de usuarios.....	40
4.2.2. Generación de trenes	44
4.2.3. Programación de los Paths.....	46
4.3. Validación del modelo	47
4.3.1. Desarrollo iterativo del modelo.....	47
4.3.2. Resultados	49
4.4. Escenarios de simulación para identificar cuellos de botella	54
4.4.1. Simulación de diferentes escenarios con horas pico.....	58
4.4.2. Simulación de diferentes escenarios con horas valle	59
4.5. Análisis de resultados	59
4.5.1. Propuestas	60
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones	62
5.1. Conclusiones.....	62
5.2. Recomendaciones	63
Bibliografía	64
Anexo A.....	68
Anexo B.....	86

Resumen

El Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México es esencial para la movilidad urbana, transportando diariamente a millones de usuarios de la capital y zonas conurbanas. La línea 3 conecta el norte con el sur de la CDMX, es una de las líneas más transitadas y también de las que registra un mayor número de fallas operativas, lo que afecta principalmente un gran número de personas, destacando a estudiantes y trabajadores que dependen de este servicio para llegar a Ciudad Universitaria.

El presente trabajo tiene como objetivo modelar el comportamiento operativo de la línea 3 del metro ante distintos escenarios de alta afluencia de usuarios para identificar posibles soluciones que mejoren la calidad del servicio. La metodología incluyó una investigación de campo para identificar los horarios de mayor afluencia y las fallas más frecuentes del sistema. La información recabada se desarrolló un modelo de simulación en el software Simio que emula las condiciones de operación de la línea, permitiendo observar el impacto de las distintas variables en el desempeño del sistema.

A partir de los resultados obtenidos por el modelo de simulación se observó que los horarios de mayor afluencia de usuarios coinciden con el incremento de fallas operativas. Asimismo, se determinaron las estaciones propensas a ser puntos críticos, entre estas, en la línea 3 del metro.

Palabras clave: modelo de simulación, STC metro, fallas en operación, retrasos.

Abstract

The Mexico City Metro public transport system is essential for urban mobility, transporting millions of users daily in the capital and surrounding areas. Line 3, which connects the north and south of Mexico City, is one of the busiest lines and one of those with the highest number of operational failures, mainly affecting students and workers who depend on this service.

The objective of this study is to model the operational behavior of metro Line 3 under different scenarios including high passenger volume to identify potential solutions that improve service quality. The methodology included field research to identify peak hours and the most frequent system failures. The information gathered enabled the development of a simulation model in Simio software that replicates the line's actual operating conditions, allowing the evaluation and the impact of different variables on system performance.

The results showed that peak times coincide with an increase in operational failures. It also identified the stations that are at risk of to being critical points on Metro line 3.

Keywords: simulation model, subway, operational failures, delays.

Capítulo I. Introducción

Introducción

El Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC Metro) de la Ciudad de México (CDMX) fue el primer sistema de Metro en América Latina, inaugurado en 1969. Se diseñó para conectar diversos puntos estratégicos de la ciudad. Este medio de transporte moviliza diariamente a 5 millones de personas, siendo una herramienta clave para la movilidad urbana.

A lo largo de sus más de cinco décadas en operación, el STC Metro ha crecido hasta contar con 12 líneas y 195 estaciones, las cuales se clasifican por su uso.

La Figura 1 ilustra las tres líneas con mayor afluencia de usuarios del STC Metro: la línea 1, que va de Pantitlán a Observatorio, la línea 2, que conecta Cuatro Caminos con Tasqueña, y la línea 3, que opera entre Indios Verdes y Universidad.

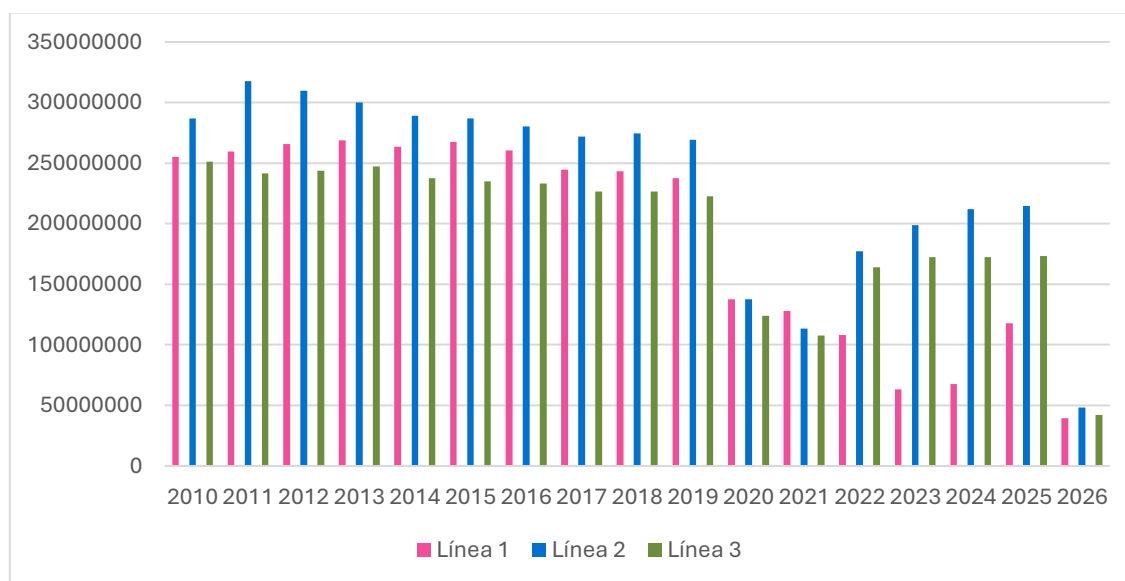


Figura 1. Afluencia anual de pasajeros en las tres líneas con mayor demanda del STCM, 2010–2026.

Los datos de la Figura 1 muestran una disminución significativa en el 2020 debido a la pandemia de COVID-19. Posteriormente, la afluencia presenta una recuperación parcial; sin embargo, la línea 1 continúa siendo la más afectada debido al cierre parcial de estaciones por trabajos de modernización. Cabe señalar que los datos correspondientes a 2026 abarcan únicamente el periodo de enero a marzo.

Para el presente trabajo se seleccionó la línea 3 debido a que representa uno de los casos más críticos dentro de la red del STC Metro. Como se ilustra en la Figura 2, esta línea conecta el norte y el sur de la CDMX con una extensión de 23.6 kilómetros. De acuerdo con los datos reportados por el STC Metro (2024), la Línea 3 registró 188 fallas durante el año 2024, posicionándola como una de las líneas con mayor número de incidencias operativas del sistema. Asimismo, de acuerdo con datos de la SEMOVI (2019), su relación demanda-capacidad era de 1.03, lo que indica que desde entonces opera prácticamente al límite de su capacidad. La línea opera con trenes modelo NM-79, cada tren está compuesto por nueve

vagones. Asimismo, esta estación dispone de 54 trenes en operación, tiene una capacidad máxima de 2,500 usuarios por unidad y transporta aproximadamente 3 millones de personas al mes.

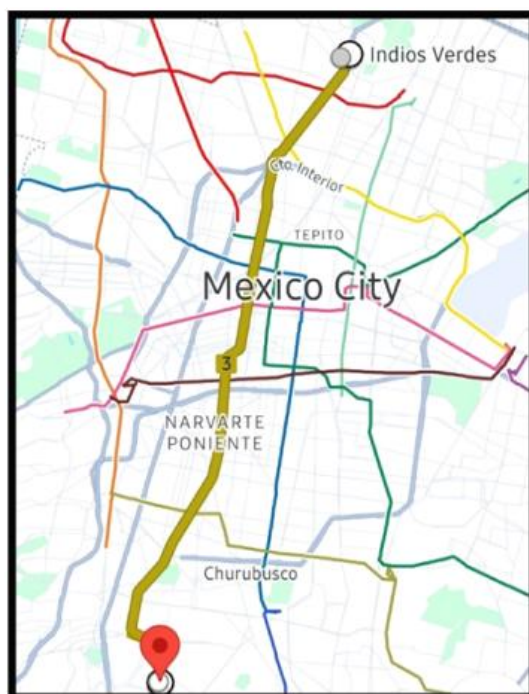


Figura 2. Línea 3 del STC Metro. Fuente: Google Maps ,2025.

A través de la recolección de datos históricos y de campo, se identificaron diversos problemas relacionados con el exceso de usuarios y fallas operativas que provocan retrasos en la línea 3. Con el objetivo de proponer mejoras en el servicio del metro, se desarrolló un modelo de simulación para analizar los procesos aleatorios del STC Metro.

Justificación

La línea 3 del STC Metro desempeña un rol fundamental en la movilidad diaria de miles de personas que conectan el norte y el sur de la CDMX. Como se observa en la Figura 1, esta línea se encuentra entre las tres con mayor afluencia de usuarios del sistema. Sin embargo, a diferencia de las líneas 1 y 2 que han recibido mantenimiento reciente, la línea 3 registró 188 fallas durante el año 2024 (STC Metro, 2024), posicionándola como una de las más problemáticas operativamente. A esto se suma que opera con una relación demanda-capacidad de 1.03 (SEMOVI, 2019), lo que indica que la demanda supera su capacidad ofrecida. Entre los factores que afectan su funcionamiento se encuentran las fallas técnicas en andenes y vagones, el mantenimiento deficiente y el exceso de usuarios. Siendo estos últimos quienes generan constantes interrupciones y retrasos en el servicio.

Con el fin de identificar los puntos críticos de la operación y evaluar el impacto de distintos escenarios sobre el desempeño del servicio, el desarrollo de un modelo de simulación permite analizar el comportamiento del sistema en condiciones normales y de alta demanda.

Objetivo general

Analizar el comportamiento operativo de la línea 3 del STC Metro en condiciones de alta afluencia y escenarios de falla, mediante un modelo de simulación, para identificar puntos críticos en la operación del sistema.

Objetivos específicos

- Recolectar datos de tiempos operativos de la línea 3 del STC Metro, incluyendo tiempos de arranque, cierre de puertas y ascenso y descenso de pasajeros, mediante observación directa en campo realizada de lunes a viernes en días hábiles, con el fin de registrar el comportamiento del sistema ante la alta afluencia de usuarios en distintos horarios a lo largo del día.
- Modelar el comportamiento de la línea 3 del STC Metro en condiciones normales de operación.
- Simular horarios de servicio con diferente nivel de demanda de usuarios de la línea 3 del STC Metro con la finalidad de identificar las estaciones que actualmente generan cuellos de botella y aquellas que presentan mayor riesgo de generarlos en el futuro.
- Simular y analizar escenarios de variación operativa en la línea 3 del STC Metro, modificando la frecuencia de salida de trenes y la afluencia de usuarios en estaciones de baja demanda. Lo anterior con la finalidad de evaluar su impacto en el desempeño del sistema.

Pregunta de investigación general

¿Cómo puede un modelo de simulación representar el comportamiento operativo de la línea 3 del STC Metro bajo distintos escenarios de demanda?

Pregunta de investigación particular

1. ¿Cómo puede un modelo de simulación representar el comportamiento operativo de la línea 3 del STC Metro bajo distintos escenarios de demanda y escenarios de falla?
2. ¿Cómo varía el desempeño de la línea 3 ante los distintos horarios de demanda de usuarios y qué estaciones presentan posibles cuellos de botella?
3. ¿Cómo impacta la modificación de la frecuencia de salida de trenes y el incremento de afluencia en estaciones de baja demanda sobre el desempeño operativo de la Línea 3?

Alcances y limitaciones

Alcances del trabajo:

El presente trabajo abarca el análisis del comportamiento operativo de la línea 3 del STC Metro mediante un modelo de simulación. El modelo contempla los elementos clave de la operación de la línea, incluyendo la generación de trenes y usuarios, los horarios de hora pico y hora valle, los tiempos de arranque, ascenso y descenso de usuarios en cada estación, la capacidad máxima de los trenes y el flujo de usuarios por estación. Asimismo, se simulaban escenarios con distintas frecuencias de salida de trenes.

Limitaciones del trabajo:

El modelo de simulación se limitó exclusivamente a la línea 3, debido a que el STC Metro está constituido por 12 líneas que en conjunto abarcan más de 195 estaciones. La recolección de datos en campo se realizó únicamente en días hábiles de lunes a viernes, por lo que el modelo no representa el comportamiento del sistema en fines de semana ni días festivos.

La precisión de la simulación dependió de la calidad y disponibilidad de los datos históricos de la línea 3 del STC Metro, así como de la capacidad de la licencia estudiantil del software Simio utilizada para su desarrollo.

Estructura de la tesis:

El presente trabajo de investigación se divide en cinco capítulos:

Capítulo I. Introducción. Se abordan los antecedentes del trabajo como lo son la historia, el contexto actual de la línea 3 del STC Metro, la problemática de la operación del STC Metro, y la importancia del presente trabajo para sus usuarios.

Capítulo II. Estado del arte y marco teórico. Se describen los conceptos encontrados en la literatura académica relacionados con los sistemas, transporte público, modelos de simulación y modelos de localización de redes de transporte público, que pueden ayudar a resolver el problema principal. Asimismo, se documenta la literatura encontrada sobre las fallas operativas del STC Metro.

Capítulo III. Metodología. Se describe a detalle la metodología utilizada para el desarrollo del modelo de simulación.

Capítulo IV. Desarrollo del modelo de simulación. Se describe el modelo de simulación realizado, sus elementos, y funcionalidad.

Capítulo V. Análisis de resultados. Se analizan los escenarios de demanda, horarios y fallas operativas para identificar modificaciones menores en los procedimientos operativos actuales del STC Metro que resulten en mejoras significativas del servicio.

Capítulo VI. Propuestas y trabajo futuro. Se emiten las conclusiones generales, y se proponen líneas de trabajo futuro orientadas a la ampliación del modelo, y su aplicación en otras líneas del sistema.

Capítulo II. Estado del arte y marco teórico

2.1. Estado del arte

Chen et al. (2025) proponen un sistema de simulación de eventos discretos para estimar la afluencia de usuarios del metro urbano de Nanjing. El modelo de simulación consideró aspectos como estaciones, trenes y usuarios. El resultado del modelo demostró que, para el 88.44 % de los pasajeros, el tiempo de viaje simulado tuvo un error menor al 30% respecto a su tiempo de viaje real, lo que demuestra la eficacia en los modelos de simulación de eventos discretos para representar el comportamiento general y la distribución del flujo de usuarios dentro del metro. Este trabajo resulta útil como antecedente ya que demuestra la validez de los modelos de simulación para el análisis de sistemas de transporte urbano como el metro.

Alcaide Fernández (2024) desarrolló un modelo de simulación de las líneas 5 y 6 del metro de Madrid. El objetivo principal de su trabajo fue evaluar el comportamiento operativo de ambas líneas en diferentes escenarios, este trabajo considero variables como: la afluencia de usuarios y la frecuencia de trenes para proponer mejoras en la operación del sistema y aumentar su eficiencia. En el modelo de simulación se consideraron aspectos como la frecuencia de paso de los trenes, el tiempo de espera entre estaciones, el flujo de usuarios, la capacidad de los trenes, y la demanda diferentes horarios. El resultado principal de la simulación permitió identificar una programación en la que los trenes reducen los tiempos de espera, lo que permite mejorar la distribución del flujo de usuarios. Este trabajo es esencial ya que se emplea a la simulación como herramienta para la planificación operativa del transporte urbano.

Vera Morales (2017) desarrolló un modelo de simulación enfocado en mejorar los mecanismos de evacuación en el STC Metro. El objetivo del modelo fue reducir los tiempos de evacuación en estaciones con alto afluencia de usuarios. En su trabajo utilizó técnicas de simulación discreta para evaluar tiempos de respuesta ante contingencias bajo diferentes escenarios. Como resultado, se observó que bajo ciertas variaciones en el flujo de personas se presentaron reducciones de hasta un 15 % en los tiempos de evacuación. Debido a su enfoque específico en el STC Metro mediante técnicas de simulación. Este trabajo es fundamental para integrar metodologías aplicadas a modelos que buscan mejorar la respuesta operativa o de gestión de crisis de este medio de transporte urbano.

Ramírez Javier (2016) realizó el análisis operativo de la línea B del STC Metro. El objetivo de este trabajo fue estudiar los patrones de demanda de usuarios y su congestión. Para lo anterior, empleó herramientas como teoría de colas, y simulación en el software SIMIO, donde consideró aspectos como la interacción entre trenes, estaciones y usuarios. Entre los resultados obtenidos, se estimó el número mínimo de trenes necesarios para satisfacer la demanda bajo escenarios con posibles contingencias. Este trabajo resulta útil como antecedente ya que presenta un caso empírico relacionado con el STC Metro, y emplea la herramienta de simulación en SIMIO para el análisis de la propuesta y la validación de resultados.

Schmaranzer et al. (2016) desarrollaron un modelo de simulación para la red de metro de Viena con el propósito de analizar y planificar el flujo de usuarios. El modelo de simulación se desarrolló en AnyLogic, y consideró aspectos como la demanda horaria estocástica basada en matrices origen-destino, capacidad de estación, número de vagones, flujo de usuarios y tiempos de viaje direccionales. El principal resultado obtenido a partir del modelo de simulación fue la detección de cuellos de botella en distintos escenarios que fueron de utilidad para determinar los intervalos de llegada de los trenes, y mejorar la planificación del servicio del metro. Este trabajo resulta útil como antecedente ya que presenta un caso relacionado con un sistema de transporte metro, y emplea la herramienta de simulación para el análisis del sistema y su planificación operativa.

García & Flores de la Mota (2012) en su artículo de investigación desarrollaron un modelo de simulación para identificar los cuellos de botella del flujo de usuarios de la estación Constitución de 1917 de la línea 8 del STC Metro durante horas pico. El modelo de simulación se desarrolló en SIMIO y consideró aspectos como el tiempo de llegada de trenes, el flujo peatonal dentro de la estación, y la capacidad de las áreas de espera y andenes. El principal resultado de la investigación fue que la estación trabaja al límite de su capacidad durante las horas de mayor afluencia de usuarios, esto refuerza la importancia de ajustar las frecuencias del servicio para que el sistema funcione eficientemente. Este trabajo resulta útil como antecedente ya que presenta un caso relacionado con el STC Metro, y emplea la herramienta de simulación en SIMIO para el análisis del sistema.

Mendoza Flores (2006) desarrolló un modelo de simulación con el lenguaje GPSS/H para analizar la operación de la línea 3 del STC Metro. El objetivo de este trabajo fue ajustar el número de trenes en circulación para reducir tiempos de espera. El modelo consideró aspectos como los tiempos de viaje, frecuencia de trenes, y la capacidad de los vagones. Como resultado principal se obtuvo el número de trenes para permite mejorar la fluidez del servicio y evitar congestiones. Este trabajo es relevante como antecedente ya que estudia la misma línea del presente trabajo. Sin embargo, a diferencia de Mendoza Flores, el presente trabajo actualiza el análisis de la línea 3 considerando las condiciones operativas actuales, incorpora datos recolectados directamente en campo y analiza distintos escenarios de demanda para identificar las estaciones propensas a generar cuellos de botella, mediante el uso del software Simio.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Modelos de simulación

Un modelo de simulación puede definirse como un conjunto estructurado de unidades de análisis complejas que operan mediante relaciones de representación y estructuras algorítmicas (Durán, 2020). Asimismo, puede entenderse como un concepto abstracto que describe las relaciones, interacciones y transformaciones dinámicas entre las entidades de un sistema (Alvarado, 2022). Marquez et al. (2012) define a la simulación como una técnica que imita el comportamiento de un sistema del mundo real conforme evoluciona en el tiempo. Asimismo, Aguilar & Heredia (2013) definen a la simulación como la acción de imitar la

operación de un sistema real, mediante modelos matemáticos que describen el comportamiento de las variables del sistema y sus interrelaciones.

En esencia, un modelo de simulación permite representar de manera simplificada un sistema para recrear el comportamiento e interacción de los elementos que lo conforman, permitiendo realizar experimentos en diferentes escenarios de manera virtual para comprobar supuestos del mundo real. Lo anterior permite anticipar situaciones futuras, y facilitar la toma de decisiones.

2.2.2. Tipos de modelos de simulación

De acuerdo con las características de los modelos de simulación, se pueden clasificar como (Marquez et al., 2013):

- **Simulación dinámica.** Representación de un sistema que evoluciona a través del tiempo.
- **Simulación determinista.** Representación de un sistema que no contempla variables aleatorias.
- **Simulación aleatoria.** Representación de un sistema que contempla variables aleatorias.
- **Simulación continua.** Representación de un sistema cuyo comportamiento cambia de forma continua a través del tiempo.
- **Simulación discreta.** Representación de un sistema cuyo comportamiento cambia solo en instantes del tiempo.

2.2.3. Conceptos básicos de un modelo de simulación

Para comprender mejor los componentes de un modelo de simulación, es fundamental definir primero sus conceptos básicos (García et al., 2013):

- **Sistema.** Un conjunto de elementos, con un objetivo, y que se interrelacionan entre sí para funcionar como un todo.
- **Entidad.** Es el elemento responsable de que el estado del sistema cambie. Se puede entender como la representación de los flujos de entrada y salida en un sistema.
- **Estado del sistema.** Es la condición en la que se encuentra un sistema en un momento determinado.
- **Eventos.** Es un cambio en el estado actual del sistema.
- **Recursos.** Son los eventos necesarios para llevar a cabo una operación.
- **Atributos.** Son todos aquellos elementos necesarios para llevar a cabo una operación.
- **Variables.** Son condiciones cuyos valores se crean y modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas.
- **Réplica o corrida.** Es una ejecución individual del modelo con los mismos parámetros y condiciones iniciales, pero con diferentes números aleatorios.
- **Estado transitorio.** Es la fase o momentos iniciales de una simulación en el que las condiciones del sistema aún no reflejan su comportamiento a largo plazo.

- **Estado estable.** Se refiere a la fase de la simulación en la que las variables de salida del sistema se comportan de manera constante de forma estadística, lo que refleja el desempeño usual del sistema bajo condiciones operativas regulares.
- **Números aleatorios.** Los números aleatorios son valores generados de forma que no siguen un patrón predecible y que permiten introducir variabilidad dentro de los eventos del modelo. Son fundamentales para representar comportamientos inciertos o estocásticos del sistema simulado.
- **Variable aleatoria.** Son aquellas que tienen un comportamiento probabilístico en la realidad.
- **Distribución de probabilidad.** Es aquella que se utiliza para modelar el comportamiento aleatorio de las variables que afectan el sistema.

2.2.4. Ventajas y desventajas de los modelos de simulación

A pesar de que la simulación es una herramienta versátil que permite analizar el comportamiento de los sistemas bajo diferentes condiciones, su uso implica tanto ventajas como desventajas que deben ser consideradas antes de utilizarla.

A continuación, se citan las ventajas y desventajas del uso de los modelos de simulación (Duarte & Fernández, 2005, García et al., 2013):

Ventajas

- Permite el estudio del sistema completo, sin necesidad de llevarlos a cabo en la realidad.
- Permite el modelado físico completo.
- Permite analizar los efectos que provocan las variaciones en los parámetros y propiedades de las variables sobre el comportamiento del sistema.
- Mejora el conocimiento del proceso bajo estudio ya que permite observar el comportamiento del modelo bajo diferentes escenarios.
- Permite el estudio de variaciones probabilísticas y estadísticas del diseño del sistema.
- Es más económico realizar un estudio de simulación que hacer muchos cambios en los procesos reales.

Desventajas

- La solución del problema implica elaborar un modelo simplificado en el cual pueden omitirse variables y parámetros importantes a la hora de evaluar el comportamiento global del sistema.
- Aunque diversos programas especializados de simulación permiten obtener el mejor escenario a partir de una combinación de variaciones posibles, la simulación no es una herramienta de mejora.
- El éxito del modelo será directamente proporcional al grado de conocimiento del sistema, así como de los fenómenos que intervienen en él.
- Cuando la simulación no se estructura de manera correcta, puede convertirse en un proceso lento y costoso.

2.2.5. Programas especializados en simulación

Los programas especializados en simulación permiten interactuar de manera virtual con el entorno. Los programas de simulación son considerados como una herramienta útil para el aprendizaje de las ciencias experimentales y de las ingenierías ([Aguilar & Heredia, 2013](#)).

Entre los softwares de especializados de simulación más utilizados se encuentran:

Anylogic. Plataforma de simulación multiparadigma que permite modelar, analizar y mejorar sistemas complejos utilizando simulación de eventos discretos, dinámica de sistemas y modelado basado en agentes dentro de la misma plataforma ([AnyLogic, 2025](#)).

SIMIO. Es una plataforma de simulación de eventos discretos orientada a objetos, diseñada para crear Gemelos Digitales de Procesos Adaptativos Inteligentes. Estos modelos replican con precisión el comportamiento de procesos operativos reales y se integran perfectamente con los datos y sistemas empresariales. Simio combina simulación y programación para respaldar la transformación digital en la Industria 4.0, permitiendo diseñar, analizar y mejorar modelos de simulación para mejorar la eficiencia operativa y apoyar la toma de decisiones ([Simio, 2025](#)).

Arena. Es un software de simulación para eventos discretos que fue desarrollado por la empresa *Rockwell Automation*. Permite realizar modelado, análisis y mejorar procesos complejos mediante la creación de modelos visuales que representan el flujo de entidades a través de procesos y recursos ([Rockwell Automation, 2025](#)).

FlexSim. Software de simulación 3D orientado a objetos, especializado en modelar, y analizar sistemas complejos mediante simulación de eventos discretos. Permite crear representaciones virtuales de procesos industriales, logísticos y de servicios ([FlexSim, 2025](#)).

ProModel. Es un software de simulación con animación y optimización que permite crear modelos de diversos sistemas, como manufactura, logística, servicios, centros de llamadas y manejo de materiales. ProModel integra un módulo de optimización, SimRunner, el cual facilita el encontrar soluciones óptimas de manera rápida y confiable, evitando el método de prueba y error ([ProModel, 2025](#)).

A continuación, en la Tabla 1 se presenta la comparación entre los programas de simulación anteriormente descritos.

Tabla 1. Tabla comparativa entre programas de simulación especializados

Característica	Simio	Arena	FlexSim	Promodel	AnyLogic
Modelado de eventos discretos	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Modelado de eventos continuos	Sí	No	Sí	No	Sí
Modelado basado en agentes	No	No	No	No	Sí
Integración SIG	Parcial	No	Parcial	No	Parcial
Simulación de transporte público	No	No	Parcial	No	Sí
Visualización 3D	Sí	No	Sí	Sí	Sí
Interfaz intuitiva	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Accesibilidad Económica	Sí	Sí	No	No	No
Desarrollador	Simio LLC	Rockwell Automation	FlexSim Software	ProModel Corporation	AnyLogic Company

Como se observa en la Tabla 1, cada software presenta características distintas en términos de capacidades de modelado, visualización y accesibilidad económica. Para el presente trabajo se seleccionó Simio debido a que combina las características necesarias para representar adecuadamente el sistema de transporte estudiado: permite el modelado de eventos discretos, cuenta con visualización 3D, tiene una interfaz intuitiva y es económicamente accesible.

2.2.6. Sistemas de transporte público

Los sistemas de transporte público son esenciales para la interconexión de zonas urbanas, ya que más de la mitad de la población mundial vive en ellas. Y la tendencia sigue en aumento, especialmente en países en vías de desarrollo, donde un gran número de personas se traslada a las ciudades en busca de mejores oportunidades ([United Nations, 2018](#)). Se espera que para el año 2050 el 70% de la población mundial viva en zonas urbanas. Ante esta situación, no es posible para las ciudades recibir a todos los nuevos residentes, obligando a muchos de ellos a vivir en áreas ubicadas afuera, o en la frontera, de las grandes metrópolis ([Hoornweg y Pope, 2017](#)). Lo anterior da lugar a desplazamientos de quienes viven en estos espacios, lo que hace que la demanda de transporte aumente considerablemente.

Considerando lo anterior, en México más del 58.1% de personas que viven fuera de la CDMX, principalmente en el Estado de México y Tizayuca, se transportan diariamente a la CDMX invirtiendo desde hora y media hasta dos horas por trayecto ([INEGI, 2018](#)). Esta pérdida de tiempo en el transporte público se debe principalmente al volumen excesivo de usuarios que dependen de estos servicios, lo que provoca que los sistemas operen por encima de su capacidad ([Greenpeace México, 2019](#)). Esta sobrecarga genera fallas frecuentes y, por consiguiente, retrasos significativos en los traslados de las personas.

Una gran parte de la población mundial utiliza el transporte público, este sistema moviliza diariamente a millones de usuarios. Incluso en aquellos países con “altos niveles de vida”, una elevada cantidad de automóviles y una gran proporción de vehículos por habitante, el volumen

de personas transportadas mediante servicios públicos representa un factor clave para el desarrollo económico de una nación (Bonnafous, 1996). De ahí la importancia que tiene la correcta operación y un control adecuado del transporte urbano público de usuarios (TUPP) por parte de las autoridades gubernamentales.

2.2.6.1. Tipos de sistemas de transporte público

La CDMX cuenta con una extensa red de transporte público que atiende diariamente a millones de habitantes, ofreciendo múltiples alternativas para cubrir las necesidades de desplazamiento a través de su territorio (Ortuya, 2023).

La diversidad de opciones responde tanto a la evolución histórica del transporte urbano como a las diferentes necesidades de la población, considerando factores como distancia, accesibilidad, capacidad y costo. Esta multiplicidad de alternativas constituye una robusta red de transportes para poder transportar diariamente a millones de personas que por la CDMX (Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, 2019).

Dentro de las alternativas de transporte público que la CDMX ofrece, se encuentran:

Trolebús. Es el más antiguo de todos los transportes públicos de la capital. Este fue el sucesor de los tranvías en 1951. Actualmente, cuenta con 8 líneas y una flota de 360 trolebuses que operan por toda la CDMX (Sociedad del Movimiento, 2020). La eficiencia de la red de este medio de transporte se refleja en su extensa cobertura conformada por 12 líneas de trolebuses que garantizan la conexión de una gran parte de la ciudad, facilitando el acceso al transporte público a los residentes de áreas urbanas y suburbanas. Esta distribución equitativa contribuye a reducir la congestión vehicular y promover una movilidad más fluida y ordenada en toda la ciudad (Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México, 2025).

Metro. El STC Metro de la CDMX fue el primer sistema de metro en América Latina, inaugurado en 1969. Se diseñó para conectar diversos puntos estratégicos de la ciudad. Este medio de transporte moviliza diariamente a aproximadamente 5 millones de personas, siendo un elemento clave para la movilidad urbana.

En sus más de cinco décadas en operación, el STC Metro ha crecido hasta contar, actualmente, con 12 líneas y 195 estaciones las cuales se clasifican por su uso, ya sean estaciones con transbordo, las cuales permiten cambiar entre diferentes líneas del metro, y estaciones sin transbordo, que pertenecen a una sola línea.

Metrobús. Metrobús es un modo de transporte BRT (*Bus Rapid Transit*) que combina estaciones, vehículos, servicios y alta tecnología en un sistema integral con una identidad positiva (Metrobús, 2025).

Tren ligero. Forma parte de la red del Servicio de Transportes Eléctricos de la CDMX, el cual opera en el Sur de la Ciudad de México. Ofrece un servicio de transporte no contaminante a las alcaldías de Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco. La línea cuenta con 16 estaciones y 2 terminales a lo largo de un recorrido de 13.04 kilómetros. Actualmente, opera con 20 trenes dobles, cada uno con doble cabina de mando y una capacidad máxima de 374 usuarios por unidad. (Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México, 2025).

RTP. También conocida como la Red de Transporte de Usuarios de la Ciudad de México, esta red opera 103 rutas de autobuses organizadas en 7 módulos, lo que le permite cubrir una mayor extensión del territorio capitalino. Debido a su diseño, la RTP puede acceder a zonas donde otros medios de transporte, como el metro, metrobús, tren ligero y trolebús, no tienen cobertura ([Sociedad del Movimiento, 2020](#)). Entre los RTP que brindan servicios especiales se encuentran son:

- *Atenea.* Atiende solo a mujeres para evitar la violencia de género
- *Expreso.* Tiene solo paradas específicas en su ruta, para traslados más rápidos
- *Ecobús.* Es menos contaminante
- *Nochebús.* Provee servicio nocturno

ECOBICI. El un sistema de bicicletas públicas de la CDMX. Este sistema empezó en 2010 con 84 cicloestaciones y 1,200 bicicletas. Actualmente, cuenta con más de 480 cicloestaciones y más de 6,800 bicicletas, 340 de ellas son parte del nuevo sistema de bicicletas eléctricas de pedaleo asistido que facilitan los traslados más largos ([Sociedad del Movimiento, 2020](#)).

Microbuses y combis. Este medio de transporte cumple una función complementaria dentro del sistema de movilidad, ya que permite completar el trayecto de los usuarios hacia sus destinos finales. Es común que, después de utilizar medios masivos como el metro, metrobús, trolebús o tren ligero, los usuarios recurran a combis o microbuses para llegar a zonas de difícil acceso donde otros servicios no operan. Las tarifas de estos vehículos varían según la ubicación. En la Ciudad de México, el costo suele ser más bajo, con una tarifa mínima de 9 pesos, mientras que en el Estado de México puede alcanzar los 12 pesos ([Expansión Digital, 2022](#)).

2.2.6.2. Modelación de transporte

La simulación de eventos discretos y la teoría de colas son herramientas fundamentales para el análisis de sistemas de transporte. La elección de estos enfoques responde a la necesidad de analizar en profundidad las fallas operativas y técnicas de sistemas complejos como el metro desde diferentes perspectivas.

Estos modelos complementarios permiten recrear con precisión el comportamiento del sistema, incorporando tanto la variabilidad estadística de las fallas como la secuencia temporal de eventos y la formación de colas en puntos críticos. La combinación de estas metodologías proporciona una visión integral del funcionamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas y escenarios de falla.

Teoría de filas

Una línea de espera es aquella hilera formada por uno o varios clientes que aguardan para recibir un servicio, las líneas de espera se forman a causa de un desequilibrio temporal entre la demanda de un servicio y la capacidad del sistema para suministrarlo. El análisis de problemas de líneas de espera comienza con una descripción de los elementos básicos de la situación, existen cuatro elementos comunes a todas ellas ([Perez, 2024](#)):

1. Insumo o población de clientes que genera clientes potenciales
2. Una línea o fila de espera formada por los clientes
3. La instalación de servicio, constituida por una persona(s), máquina(s) requerida(s) para proveer el servicio al cliente
4. Una regla de prioridad para atender al siguiente cliente que será atendida por la instalación de servicio.

Teniendo en cuenta lo anterior se desarrolló un modelo basado en la teoría de filas en el que se observará el comportamiento de los usuarios existentes en los andenes de cada estación, tomando como servidores a los trenes y como clientes a los usuarios. Lo anterior, con la finalidad de observar el desequilibrio que causan las fallas en los servidores, o el exceso de clientes, para poder calcular los tiempos de espera, longitudes de cola, así como su capacidad.

Simulación de eventos discretos

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias – dentro de los límites impuestos por un cierto o un conjunto de ellos- para el funcionamiento del sistema ([Banerjee, S., & Kalavathy, S. 2020](#)).

Dentro de las ventajas de la simulación se encuentra que es sencillo y flexible, se puede utilizar para analizar situaciones complejas del mundo real que no se pueden resolver con modelos convencionales de análisis cuantitativo, en muchas ocasiones cuando el riesgo es muy alto es el único método posible y estudia los efectos de las interacciones de los componentes o las variables para determinar cuáles son importantes. Una vez construido el modelo de simulación, puede ser usado varias veces para analizar toda clase de diferentes situaciones y es un método disponible y conveniente para descomponer un sistema complicado en subsistemas para su estudio. ([Perez,2024](#)).

Se podrá lograr la simulación con ayuda de datos obtenidos tales como la frecuencia de llegada de trenes a las estaciones, descenso y ascenso de usuarios del tren, tiempo de arranque del tren, y tiempo total del recorrido de Indios Verdes a Universidad. Estos datos permiten representar los eventos y cambios de estado que ocurren durante la operación de la línea 3, tales como la llegada y salida de trenes, la acumulación de usuarios en andenes y las variaciones en los tiempos de espera.

A través de la simulación de eventos discretos es posible:

- Representar el comportamiento dinámico del sistema a lo largo del tiempo
- Analizar la interacción entre trenes, estaciones y usuarios
- Evaluar la variabilidad en la demanda de usuarios durante hora pico y hora valle
- Identificar estaciones con posibles cuellos de botella
- Analizar el impacto de escenarios de falla y modificaciones en la frecuencia de trenes

2.2.7. Fallas del STC Metro

En el metro se presentan diversas fallas tanto operativas como técnicas. Estas fallas afectan directamente la calidad del servicio hacia los usuarios generando una mala experiencia, ya que provocan aglomeraciones en andenes y vagones, lo que tiene como consecuencia retrasos considerables en los tiempos de viaje. Las interrupciones imprevistas del servicio obligan a los usuarios a buscar rutas alternas, frecuentemente menos eficientes y más costosas, lo que impacta su economía personal.

2.2.7.1. Fallas operativas

Son aquellas fallas que se suelen presentar debido a la falta de mantenimiento a las instalaciones del STC Metro y a la falta de recursos económicos ([Huitron, 2024](#)). Entre las fallas más comunes se encuentran en el mecanismo del sistema de cierre de puertas, debido al desgaste continuo y uso intensivo. El metro cuenta con un sistema de piloto automático (PA), cuya principal función es garantizar una distancia de 200 metros entre cada convoy, lo que facilita la circulación y ayuda a agilizar su paso ([Mora, 2024](#)), pero debido a que el STC Metro lleva más de 5 décadas en funcionamiento y no se le da un mantenimiento adecuado al PA este suele presentar fallas constantes. La línea 12, que sufrió el desplome de un tramo elevado en mayo de 2021, fue sometida a reparaciones y reabrió a inicios de 2024 con mejoras en el sistema, entre las que se incluyó la incorporación del PA. Como resultado, esta línea es una de las pocas que no presenta retrasos frecuentes en el servicio ([CDMX, 2024](#)). De manera similar, la línea 1 continúa en reparaciones para su reapertura total, por lo que se esperan mejoras en su servicio ([CDMX, 2022](#)).

Lamentablemente en más de 5 décadas estas dos líneas son las únicas a las que se les ha dado mantenimiento, una por fallas graves que ocasionaron el mantenimiento forzoso, mientras que la otra lo requería por el tiempo que lleva dando servicio, pero si el propósito es dar un servicio de calidad a los usuarios estos mantenimientos deben ser más constantes a todas las líneas sin afectar directamente la movilidad de los usuarios.

2.2.7.2. Fallas técnicas

Las fallas externas normalmente van de la mano con las internas, ya que la alta afluencia de los usuarios suele provocar el retraso de cierre de puertas y por consiguiente hay un retraso en el servicio.

Igualmente existen accidentes más graves directamente provocados por los usuarios del metro, lo cual, en situaciones extremas, provoca la evacuación total de las estaciones o interrupción del servicio.

En otras ocasiones, se suele activar la palanca de emergencia sin que exista una emergencia, lo cual por protocolo en metro debe realizar un paro total de la marcha e inspeccionar cuál fue la razón de la activación de la palanca. En ocasiones cuando si se presenta una emergencia se llegan a desalojar a los usuarios del metro o de un vagón para la correcta intervención de la persona ([Hernández, 2025](#)). Cabe recalcar que también suelen presentarse problemas de energía eléctrica, generalmente relacionados a terceros, debido a que los usuarios suelen arrojar objetos a las vías del tren.

Capítulo III. Metodología

En esta sección se describe la metodología utilizada para el desarrollo del modelo de simulación propuesto. La Figura 3 muestra el esquema del proceso metodológico seguido en el presente trabajo de investigación.

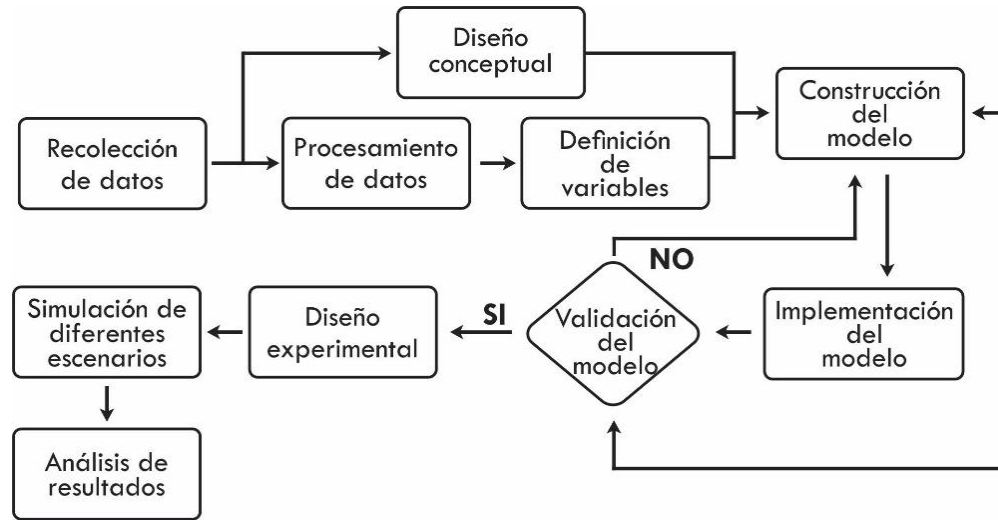


Figura 3. Metodología propuesta para el desarrollo del modelo de simulación.

Basado en Gardt et al. (2024)

El proceso metodológico ilustrado en la Figura 3 se desarrolló en dos etapas. La primera etapa comprendió la recolección y procesamiento de datos, documentales y experimentales, necesarios para alimentar el modelo de simulación. La segunda etapa consistió en el diseño, construcción, validación e implementación del modelo, utilizando simulación de eventos discretos y teoría de colas como enfoques metodológicos. La simulación de eventos discretos permite representar el comportamiento dinámico del sistema a lo largo del tiempo modelando la interacción entre trenes y usuarios en cada estación, mientras que la teoría de colas permitió analizar el flujo de usuarios y los tiempos de espera en los andenes de cada estación. Para el desarrollo del modelo se utilizó el software Simio, seleccionado por su capacidad para modelar eventos discretos, su interfaz intuitiva, y su accesibilidad estudiantil, como se describió en la sección 2.6. Cada una de estas etapas se describe a detalle en las secciones siguientes.

3.1. Recolección de datos

3.1.1. Recolección de datos documental

Esta fase comprendió la selección, diseño y aplicación de herramientas y técnicas específicas para la recolección de datos cuantitativos y cualitativos, en función de la demanda registrada en los distintos horarios. El objetivo fue asegurar una representación fiel del comportamiento del servicio y de los usuarios a lo largo de los diferentes horarios del día. Asimismo, en esta fase se recolectaron los datos iniciales requeridos para alimentar y validar el modelo de simulación.

La información fue obtenida a través de observaciones directas, análisis de registros históricos proporcionados en fuentes oficiales del STC Metro.

Entre los datos recolectados con mayor importancia se encuentran:

- **La afluencia anual y diaria, resumidas para la línea 3, se presentan en la Tabla 2**

Tabla 2. Afluencia de usuarios de la línea 3 del STC Metro.

Estación	Afluencia Anual	Promedio Diario
Indios Verdes	29,859,194	81,806
Deportivo 18 de Marzo	9,453,739	25,901
Potrero	4,465,441	12,234
La Raza	9,428,172	25,831
Tlatelolco	5,024,119	13,765
Guerrero	2,737,056	7,499
Hidalgo	4,400,870	12,057
Juárez	5,194,260	14,231
Balderas	6,056,327	16,593
Niños Héroes/PJCDMX	6,398,570	17,530
Hospital General	5,888,424	16,133
Centro Médico	5,375,430	14,727
Etiopía/Plaza de la Transparencia	7,939,065	21,751
Eugenia	4,342,498	11,897
División del Norte	4,474,022	12,258
Zapata	5,987,397	16,404
Coyoacán	8,678,323	23,776
Viveros/Derechos Humanos	6,230,936	17,071
Miguel Ángel de Quevedo	10,694,043	29,299
Copilco	11,420,379	31,289
Universidad	18,267,530	50,048

La Tabla 2, muestra el número de usuarios que utilizaron cada una de las estaciones de la línea 3 del STC Metro durante el 2024. La columna de afluencia anual muestra el número total de usuarios por cada estación a lo largo del año ([Sistema de Transporte Colectivo, 2024](#)). Asimismo, la columna de promedio diario muestra la afluencia diaria en cada estación. El promedio diario fue obtenido al dividir la afluencia anual entre 365 días.

Esta información es útil para realizar el análisis sobre la demanda de usuarios, y frecuencia de trenes.

- **Indicadores de desempeño**

Dentro de los indicadores de desempeño con mayor relevancia se encuentran:

- Eficiencia de usuarios transportados/programados (% de cumplimiento), la cual fue del 92.97% ([Sistema de Transporte Colectivo, 2024](#)). Este valor indica que hubo una disminución respecto al número de usuarios planeados, posiblemente por factores como fallas técnicas, demoras, bajas en la demanda, o suspensión parcial del servicio. Esta situación puede estar relacionada con las 188 fallas

registradas en la línea 3 durante el año 2024, las cuales ocasionaron suspensiones temporales del servicio, posicionándola como una de las líneas con mayor número de incidencias operativas en el sistema (Sarabia, 2025).

- Usuarios transportados con boleto pagado, el cual fue del 87.97% (Sistema de Transporte Colectivo, 2024).
- Usuarios con acceso gratuito, el cual fue del 12.03% (Sistema de Transporte Colectivo, 2024).

Los indicadores anteriores proporcionan el porcentaje de usuarios que utilizan el servicio bajo el esquema de tarifa estándar, así como a las personas con acceso gratuito, como adultos mayores, personas con discapacidad, estudiantes, o trabajadores del sistema. Estos datos permiten conocer a las diferentes entidades que se deberán contemplar en el modelo de simulación.

- **Intervalos entre trenes de la línea 3**

Según el (Sistema de Transporte Colectivo, 2024), el intervalo de llegada entre trenes de la línea 3, es de 4 min. Este dato se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Intervalos de tiempos entre trenes de las diferentes líneas del STC Metro. Fuente: Sistema de Transporte Colectivo, 2019.

Otros datos provenientes de medios de comunicación reportan un tiempo promedio de espera de 5 a 7 minutos. Sin embargo, usuarios del STC Metro han reportado tiempos de espera de hasta 15 y 20 minutos en estaciones como Indios Verdes y Universidad (El Financiero, 2024, Sánchez, 2024).

Asimismo, según (Rangel, 2024), y de acuerdo con información proporcionada por la dirección del STC Metro, la frecuencia de paso de los trenes se mantiene constante cada 2 minutos durante los periodos de mayor afluencia de usuarios.

Los datos anteriores son congruentes con los reportados por (SEMOVI, 2019). Estos datos se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de operación del STC Metro. Fuente: SEMOVI, (2019)

Línea	Origen-destino	Frecuencia de paso máxima (min)	Frecuencia de paso mínima (min)	Tiempo promedio por vuelta (min)	Velocidad commercial (km/h)	Pasajeros por kilómetro recorrido (pax/km)
1	Pantitlán-Observatorio	01:55	10:00	68	32.23	47.25
2	Cuatro Caminos-Tasqueña	02:25	07:15	80	33.44	51.28
3	Indios Verdes-Universidad	02:05	08:00	82	33.45	41.45
4	Santa Anita-Martín Carrera	05:50	15:00	37	36.05	23.29
5	Politécnico-Pantitlán	03:50	11:00	51	39.22	36.02
6	El Rosario-Martín Carrera	04:00	09:30	41	38.65	26.31
7	El Rosario-Barranca del Muerto	03:45	12:00	56	40.42	33.39
8	Garibaldi-Constitución de 1917	02:50	14:10	64	36.58	32.24
9	Pantitlán-Tacubaya	02:20	10:00	48	36.8	35.02
12	Tláhuac-Mixcoac	03:05	09:20	59	33.72	41.19
A	Pantitlán-La Paz	03:20	10:05	76	35.27	34.98
B	Ciudad Azteca-Buenavista	02:50	11:00	85	36.62	25.07

La Tabla 3 refleja los tiempos estimados entre la llegada de trenes de las distintas líneas del STC Metro. Los datos de la Tabla 3 servirán para alimentar al modelo de simulación y obtener resultados más cercanos a la realidad. Cabe considerar que los datos de la Tabla 3 son valores promedio y que pueden verse afectados por factores como la hora pico, la afluencia de usuarios, imprevistos técnicos o incluso condiciones externas, como la lluvia, que influyen en avance y velocidad de los trenes.

- **Horas pico del STC Metro**

Según reportes de medios, los periodos de mayor afluencia en esta línea suelen ser (Rangel, 2024):

- Mañanas: 7:30 a las 9:30 horas
- Tardes: 16:00 a las 20:00 horas

Otros datos provenientes de la Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) (INEGI, 2018), se ilustran en la Tabla 4.

Tabla 4. Viajes por hora de inicio según propósito. Fuente: INEGI (2018)

Hora de inicio del viaje	Total (miles)	Propósito del viaje			
		Ir a trabajar	Ir a estudiar	Ir al hogar	Otro propósito
Viajes entre 5:00 y 21:59 h	33,753	7,372	4,085	15,848	6,448
05:00 – 05:59	942	683	172	9	77
06:00 – 06:59	2,885	1,349	1,153	49	334
07:00 – 07:59	4,479	1,783	1,612	218	866
08:00 – 08:59	2,651	1,412	165	563	512
09:00 – 09:59	1,542	690	72	282	498
10:00 – 10:59	1,459	385	48	335	691
11:00 – 11:59	1,360	193	38	532	597
12:00 – 12:59	2,530	184	144	1,384	817
13:00 – 13:59	3,082	178	485	1,836	583
14:00 – 14:59	2,452	148	93	1,801	411
15:00 – 15:59	1,621	98	45	1,194	284
16:00 – 16:59	1,416	86	26	1,099	204
17:00 – 17:59	1,485	51	16	1,215	202
18:00 – 18:59	2,470	44	11	1,305	103
19:00 – 19:59	1,447	35	3	1,305	103
20:00 – 20:59	1,206	30	1	1,110	64
21:00 – 21:59	727	23	0.2	679	25

En la Tabla 4 se muestra que los horarios con mayor saturación del STC Metro se da desde las 6:00 hasta las 8:59 a.m. En este horario se aprecia la mayor actividad de viajes hacia los centros laborales y escolares. Asimismo, en el horario vespertino, se observa que en el horario de 18:00 a 18:59 horas se da el mayor número de retornos al hogar. Otro horario que muestra mayor actividad es el de las 12:00 a las 14:59, este horario coincide con los horarios de entrada a las escuelas y centros de trabajo en los horarios vespertinos

- Mañanas: 6:00 a las 8:59 horas
- Tardes: 12:00 a las 14:59 horas
- Tardes: 18:00 a las 18:59 horas

Los datos anteriores son importantes para la formulación del modelo de simulación, ya que permiten establecer escenarios realistas de demanda, y comparar los resultados obtenidos en la simulación con el comportamiento observado para la validación y calibración del modelo.

• Afluencia diaria de las estaciones de la línea 3

Como se observa en la Figura 5, según reportes del ([Portal de la CDMX, 2025](#)), la afluencia acumulada desde el 1 de enero del 2010 al 20 de noviembre del 2025 revela que las estaciones terminales Indios Verdes (24,620,903 usuarios) y Universidad (16,705,296 usuarios) concentran la mayor demanda de la línea 3. En cambio, estaciones ubicadas en la zona central como División del Norte (332,173 usuarios) y

Juárez (388,845 usuarios) registran los niveles más bajos de afluencia. Este patrón sugiere que la línea opera predominantemente como un corredor de transporte para viajes de origen-destino de larga distancia, conectando principalmente las zonas norte y sur de la ciudad.

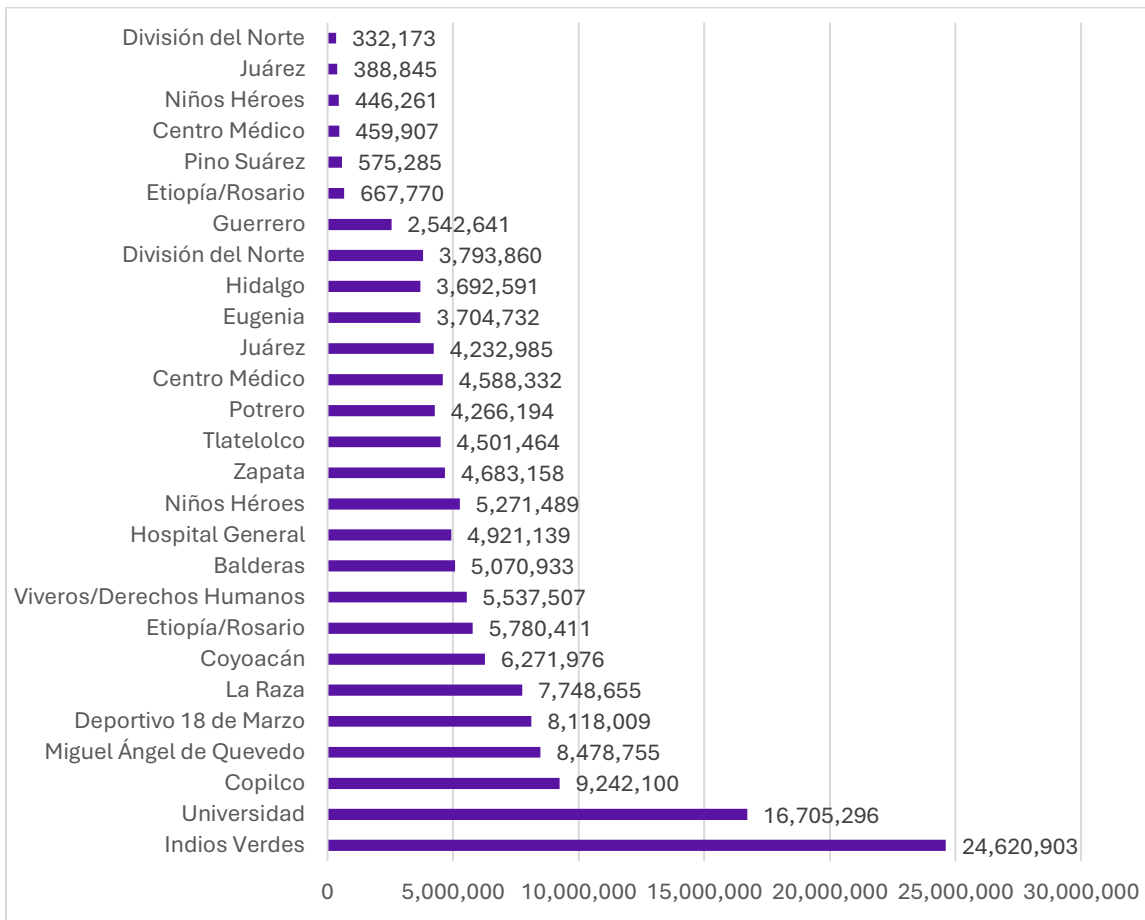


Figura 5. Afluencia de usuarios por cada estación de la línea 3.

- Capacidad y características de los trenes del STC Metro**

Acorde con los datos de (SEMOVI, 2019), el parque vehicular del STC Metro está conformado por 390 trenes. La capacidad unitaria de los trenes varía dependiendo del número de vagones (Tabla 5).

Tabla 5. Capacidad unitaria de los trenes del STC Metro. Fuente: SEMOVI (2019)

Vagones	Capacidad	Sentados	De pie
6	1,020	240	780
7	1,475	336	1,139
9	1,530	360	1,170

En la Tabla 5 se observa la capacidad total por cada tipo de tren, es decir por la cantidad de vagones que tienen, así mismo se menciona la cantidad de usuarios que pueden ir

sentados y los que van de pie. Con estos datos se determino la capacidad máxima de un tren de 9 vagones que es el que se utiliza para la línea 3.

Las características del parque vehicular, así como el número de trenes, y la asignación a las diferentes líneas del STC Metro se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Características del parque vehicular del STC Metro. Fuente: SEMOVI (2019)

trenes	Modelo	Líneas	Vida útil a 2019
45	MP68 - M	5 y B	20
6	MP68 - R93	5 Y 7	5
7	MP68 - R96	1 Y B	5
4	NM - 73AR	5 Y 6	11
37	NM73 - M	4, 5, 6, y 7	20
3	NM - 73BR	4	11
44	NM - 79	3, 6, 7, 8 y 9	12
14	NM - 79RH	3, 6, 7 y 9	17
9	MP - 82	8	17
16	MP - 82RH	8	22
20	NC - 82	9	15
30	NM - 83A	1,3 y 7	17
25	NM - 83B	1 y 9	15
13	FM - 86	A	20
16	NE - 92	1	20
11	FM - 95A	A	5
45	MN - 02	2 y 7	20
9	FE - 07	A	35
30	FE - 10	12	28
6	NM - 16	1	50

Los datos de la Tabla 5 y 6 permite determinar cuántos usuarios pueden ser transportados según la capacidad de 6, 7 o 9 vagones. Asimismo, son de utilidad para identificar posibles saturaciones en horas pico. Finalmente, permiten conocer los tipos de trenes asignados a la línea 3. Los modelos asignados a la línea 3 NM – 79, NM – 79RH, y NM – 83A, tienen una capacidad unitaria de 9 vagones.

- **Trenes en operación por línea del STC Metro**

En la Figura 6, se muestra que las líneas 1, 2, 3 y B concentran el 46% del total de la flota de trenes del sistema, mientras que las líneas 4 y 6 cuentan únicamente con el 4% de los trenes cada una. Entre las líneas con mayor cantidad de trenes en operación, la línea 12 opera con flota nueva, la línea 2 con flota renovada, y la línea 8 destaca por el mantenimiento óptimo de sus unidades. Aunque las líneas 4, 5, 6 y 7 operan con menos del 60% de su flota asignada, mantienen reservas suficientes para garantizar un servicio adecuado. En contraste, las líneas 2, 12, A y B representan casos críticos al carecer de

trenes de reserva, lo que compromete su capacidad para responder a incrementos súbitos en la demanda.

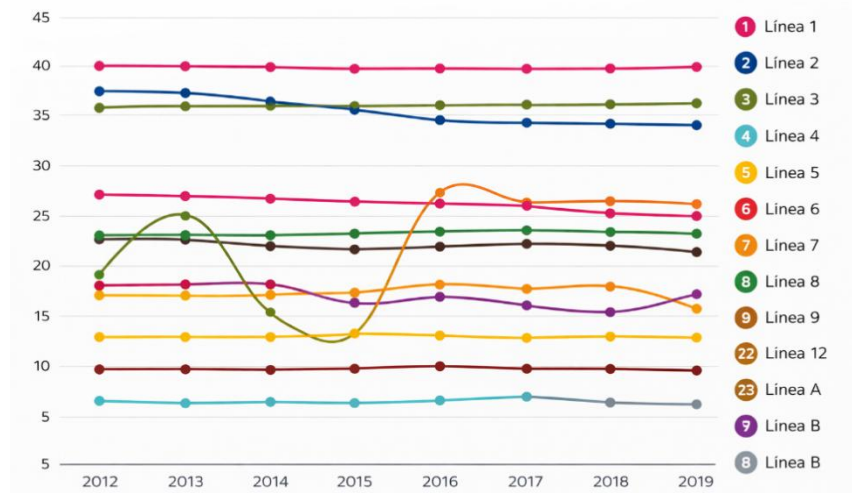


Figura 6. Trenes en operación por línea del STC Metro. Fuente: STC Metro, 2019.

- **Tiempos de traslado promedio para viajes en transporte público masivo relacionados a la ciudad de México por modo de transporte**

De acuerdo con datos de la [Encuesta Origen-Destino 2017 \(INEGI, 2018\)](#) y el Diagnóstico Técnico de Movilidad de la Secretaría de Movilidad ([SEMOVI, 2019](#)), los tiempos de traslado promedio en transporte público masivo dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México varían según el modo utilizado (Tabla 7). Los usuarios del metro registran un tiempo promedio de traslado de aproximadamente 88 minutos por viaje.

Este dato es relevante, ya que permite estimar los patrones de descenso de los usuarios, lo cual es clave para la formulación del modelo de simulación.

Tabla 7. Tiempos de traslado promedio para viajes en transporte público masivo relacionados a la Ciudad de México por modo de transporte. Fuente: Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, (2019)

Modo de transporte	General (min)	Hombres (min)	Mujeres (min)
Transporte masivo	86	88	83
STC Metro	88	91	86
Metrobus	75	77	76
Tren ligero	102	107	98
Ferrocarril suburbano	96	97	95

- **Porcentaje de ascensos y descensos por línea del STC Metro**

La ([SEMOVI, 2019](#)) proporciona la matriz de flujos que muestra el porcentaje de ascensos y descensos por línea del STC Metro (Tabla 8). En esta matriz se observa que la línea 3, la línea 1 y la línea B concentran altos porcentajes de ascensos y descensos. Esta información es importante para la formulación del modelo de simulación, ya que permite asignar con mayor precisión los flujos de usuarios entre estaciones.

Tabla 8. Matriz de flujos origen-destino en la red del STC Metro por la línea de ascenso y descenso, 2017 (% respecto al total de viajes). Fuente: Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, (2019).

		Línea de descenso												% Total de ascensos
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	A	B	
Línea de ascenso	1	4.4	2.3	1.5	0.2	0.4	0.2	0.7	0.5	0.6	0.2	0.1	0.5	11.5
	2	1.4	5.8	1.5	0.0	0.1	0.2	1.0	0.5	0.5	0.4	0.1	0.2	11.8
	3	2.5	3.0	5.8	0.1	0.4	0.7	1.1	0.5	0.8	0.6	0.1	0.4	15.9
	4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	1.6
	5	1.1	0.7	0.7	0.1	0.7	0.2	0.3	0.2	0.5	0.1	0.1	0.4	5.0
	6	0.3	0.3	0.4	0.1	0.2	0.6	0.7	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	3.2
	7	0.7	0.9	0.7	0.1	0.1	0.4	1.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	5.4
	8	1.2	1.6	0.9	0.2	0.1	0.2	0.4	2.7	0.5	0.4	0.1	0.4	8.6
	9	1.3	1.3	1.1	0.1	0.3	0.1	0.7	0.3	1.1	0.1	0.1	0.2	6.6
	12	0.7	1.4	1.6	0.1	0.1	0.4	0.9	0.6	0.3	2.8	0.1	0.1	8.7
	A	1.9	1.5	1.1	0.1	0.8	0.2	0.6	0.4	1.0	0.1	1.4	0.3	9.5
	B	2.0	1.4	1.5	0.1	0.8	0.3	0.4	0.7	0.4	0.1	0.1	4.1	12.2
% Total de descensos		17.8	20.4	17.0	1.4	4.2	3.4	8.6	6.9	6.1	5.1	2.3	6.9	

- Comparación de velocidades operativas entre modos de transporte masivo en la Ciudad de México**

La Tabla 9 muestra la duración, distancia y velocidad de operación estimadas para diferentes sistemas de transporte masivo en la Ciudad de México durante tres periodos del día: promedio general, hora pico matutina (6-9 h), hora valle (10-13 h) y hora pico vespertina (18-20 h). Los datos permiten comparar el desempeño operativo de cada modo de transporte en términos de velocidad promedio y tiempo de recorrido. Se observa que las velocidades varían considerablemente entre sistemas, desde los 11.7 km/h del Mexicable hasta los 42.9 km/h del Ferrocarril Suburbano en promedio. Esta información resulta útil para analizar la eficiencia. Esta información resulta útil para sustentar los parámetros de velocidad que se programarán en el modelo de simulación, permitiendo que este refleje las condiciones operativas reales del sistema de transporte.

Tabla 9. Duración distancia y velocidades de operación estimadas de los tramos de viaje en transporte masivo 2017. Fuente: INEGI 2018.

	Modo de Transporte	STC Metro	Metrobus	Tren Ligero	Ferrocarril Suburbano	Mexibus	Mexicable
Promedio	Duración (min)	40.0	33.0	27.0	26.0	32.0	17.0
	Distancia (km)	11.8	7.3	7.7	18.6	10.3	3.3
	Velocidad (km/h)	17.7	13.3	17.0	42.9	19.3	11.7
Hora pico (6-9 h)	Duración (min)	40.0	33.0	28.0	26.0	32.0	19.0
	Distancia (km)	11.8	7.5	8.0	18.5	10.3	3.4
	Velocidad (km/h)	17.7	13.6	17.1	42.7	19.3	10.6
Hora valle (10-13 h)	Duración (min)	35.0	28.0	27.0	24.0	30.0	14.0
	Distancia (km)	10.6	6.1	7.3	18.3	9.3	3.1
	Velocidad (km/h)	18.2	13.1	16.2	45.8	18.6	13.2
Hora pico (18-20 h)	Duración (min)	43.0	37.0	30.0	26.0	36.0	17.0
	Distancia (km)	12.3	7.7	7.9	18.4	11.7	2.8
	Velocidad (km/h)	17.1	12.5	15.8	42.3	19.5	10.0

- **Relación demanda capacidad del STC Metro**

La Tabla 10 refleja la relación demanda-capacidad, en 2019 el sistema tenía una ocupación del 86%, lo que indica un uso intensivo que no llega a la saturación. De hecho, la ocupación bajó un 4% respecto a lo reportado en el año 2013 (PUEC-UNAM, 2013). A pesar del descenso global en la saturación del sistema, se mantienen condiciones de saturación en la operación de algunas líneas. Esto es un indicador de déficit en la disponibilidad de trenes para atender la demanda. La línea 2 opera con un 27% de sobredemanda mientras que la línea 3 lo hace con un 3%. En el extremo opuesto, la línea 4 tiene una subutilización del 69%.

Tabla 10. Relación demanda capacidad del STC Metro. Fuente: SEMOVI, (2019).

Línea	Origen – Destino	Demanda	%	Capacidad ofrecida	%	Relación D/C
1	Pantitlán-Observatorio	726,262	14.3	763,470	12.9	0.95
2	Cuatro Caminos-Tasqueña	810,228	16.0	639,540	10.8	1.27
3	Indios Verdes-Universidad	696,720	13.7	679,320	11.5	1.03
4	Santa Anita-Martín Carrera	87,106	1.7	279,990	4.7	0.31
5	Politécnico-Pantitlán	264,760	5.2	374,850	6.4	0.71
6	El Rosario-Martín Carrera	158,075	3.1	282,846	4.8	0.56
7	El Rosario-Barranca del Muerto	349,365	6.9	405,450	6.9	0.86
8	Garibaldi-Constitución de 1917	404,499	8.0	514,080	8.7	0.79
9	Pantitlán-Tacubaya	351,401	6.9	602,820	10.2	0.58
12	Tláhuac-Mixcoac	427,255	8.4	480,420	8.1	0.89
A	Pantitlán-La Paz	341,879	6.7	382,724	6.5	0.89
B	Ciudad Azteca-Buenavista	454,834	9.0	497,250	8.4	0.91
	STC Metro	5,072,384	100.0	5,902,760	100.0	0.86

- **Distribución de estaciones por tipo y uso en el STC Metro**

La Tabla 11 presenta la distribución de estaciones del STC Metro (Sistema de Transporte Colectivo, 2019) clasificadas según su tipo de conexión entre líneas. El sistema cuenta con un total de 195 estaciones, de las cuales 123 son estaciones de paso (sin transbordos), 48 son estaciones de correspondencia (que permiten transbordo entre dos o más líneas), 12 estaciones tienen correspondencia directa con otra línea específica, y 12 estaciones operan sin correspondencia con otras líneas. Las líneas 2, 3 y B concentran el mayor número total de estaciones (24 y 21), mientras que las líneas 4 y A presentan la menor cantidad (10 estaciones cada una). Esta información resulta útil para comprender la estructura de conectividad del sistema y sustentar los parámetros de flujo de usuarios y tiempos de transbordo que se programarán en el modelo de simulación.

Tabla 11. Estación por uso y tipo. Fuente: STC Metro, (2019).

Líneas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	12	Total
Sin correspondencia	1	2	2	0	1	1	1	1	0	1	2	1	12
Con correspondencia	1	0	0	2	1	2	1	1	2	1	0	1	12
De paso	12	16	12	4	7	7	9	12	7	8	14	15	123
De correspondencia	6	6	7	4	4	2	3	5	3	0	5	3	48
Total	20	24	21	10	13	11	14	19	12	10	21	20	195

3.1.2. Recolección de datos experimental de datos

La recolección de datos experimental se llevó a cabo mediante observación directa en campo, realizando recorridos en la línea 3 del STC Metro de lunes a viernes en días hábiles. Con base en los tiempos obtenidos en la Tabla 4 y en la investigación de campo realizada, se determinó la distribución de horarios que se presenta en la Tabla 12, bajo la cual se organizó la recolección de información.

Tabla 12. Horas valle y horas pico

Hora valle	Total de horas	Hora pico	Total de horas
5:00 a 5:59 horas	1	6:00 a 8:59 horas	3
9:00 a 11:59 horas	3	12:00 a 14:59 horas	3
15:00 a 17:59 horas	3	18:00 a 19:59 horas	2
20:00 a 24:00 horas	4		
Total	11 horas		8 horas

La Tabla 12 muestra la distribución de los horarios clasificados como hora valle y hora pico, los cuales fueron utilizados como base para la recolección de datos y la construcción del modelo de simulación. Esta clasificación facilitó la planeación del trabajo de campo y aseguró la obtención de información representativa de la operación del sistema.

Durante cada recorrido se registraron manualmente los tiempos, con ayuda de un cronómetro, más de 2,000 datos distribuidos entre todas las estaciones de la línea, correspondientes a tres variables operativas:

- el tiempo de arranque del tren tras el cierre de puertas
- el tiempo de ascenso y descenso de usuarios medido desde la apertura hasta el cierre de puertas
- el tiempo de traslado entre estaciones consecutivas

La totalidad de los registros individuales se presenta en el Anexo A, clasificados por horario, junto con su conversión de unidades en el Anexo B. La Tabla 13 presenta los promedios resultantes.

Tabla 13. Tiempos promedio de la línea 3 del metro.

Tiempos	Estación	Hora valle	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle	Hora pico	Hora valle
		5:00 a 5:59	6:00 a 8:59	9:00 a 11:59	12:00 a 14:59	15:00 a 17:59	18:00 a 19:59	20:00 a 24:00
	Indios Verdes							
Arranque		0.12	0.15	0.06	0.11	0.88	0.02	0.05
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo	3.28	3.35	3.11	3.27	2.62	3.44	2.8
Ascenso y Descenso		0.14	0.29	0.09	0.12	0.17	0.15	0.1
Arranque		0.08	0.22	0.11	0.17	0.58	0.22	3.24
Tiempo próxima estación	Potrero	2.22	2.06	2.04	2.06	1.7	2.94	2.58
Ascenso y Descenso		0.11	0.12	0.08	0.12	0.12	0.09	0.06
Arranque		0.16	2.15	0.16	0.2	0.34	0.26	0.2

Tiempo próxima estación	La Raza	1.61	2.53	1.77	1.6	2	2.74	1.45
Ascenso y Descenso		0.11	0.27	0.13	0.14	0.13	0.07	0.04
Arranque		0.18	0.34	0.53	0.18	0.55	1.01	0.24
Tiempo próxima estación	Tlatelolco	2.12	1.9	2.81	2.22	1.67	3.94	2.1
Ascenso y Descenso		0.11	0.35	0.1	0.11	0.17	0.1	0.05
Arranque		0.07	0.59	0.28	0.14	0.73	1.24	0.17
Tiempo próxima estación	Guerrero	1.34	1.33	1.86	1.33	1.15	2.28	1.2
Ascenso y Descenso		0.16	0.21	0.15	0.14	0.12	0.09	0.15
Arranque		0.1	0.35	0.54	0.14	0.33	2.6	0.4
Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.1	1.34	1.13	1.14	0.98	1.33	0.8
Ascenso y Descenso		0.14	0.13	0.12	0.82	0.16	0.13	0.09
Arranque		0.11	0.19	0.33	0.22	0.28	0.57	0.92
Tiempo próxima estación	Juarez	0.65	0.65	0.46	0.59	0.59	0.97	0.79
Ascenso y Descenso		0.1	0.33	0.37	0.09	0.22	0.07	0.11
Arranque		0.1	1.51	0.3	0.13	0.27	0.17	0.46
Tiempo próxima estación	Balderas	1.46	1.16	1.18	1.16	1.01	1.48	1.93
Ascenso y Descenso		0.15	0.95	0.95	0.11	0.36	0.2	0.05
Arranque		0.12	0.3	1.1	1.32	0.47	0.68	1.38
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.12	1.11	1.12	1.21	1.09	1.29	1.88
Ascenso y Descenso		0.1	0.13	0.45	0.14	0.2	0.08	0.08
Arranque		0.1	0.3	0.1	0.17	0.35	0.64	0.74
Tiempo próxima estación	Hospital General	1.06	1.06	1.07	1.07	0.95	1.43	2.09
Ascenso y Descenso		0.15	0.14	0.09	0.49	0.19	0.08	0.05
Arranque		0.08	0.08	0.3	0.12	0.25	0.15	0.13
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.16	1.19	1.2	1.15	0.95	1.19	1.29
Ascenso y Descenso		0.15	0.15	0.19	0.2	0.38	0.1	0.04
Arranque		0.1	0.15	0.15	0.18	0.28	0.16	2.65
Tiempo próxima estación	Etiopia	1.57	1.39	1.48	1.36	1.3	1.49	1.79
Ascenso y Descenso		0.12	0.42	0.1	1.36	1.53	0.07	0.05
Arranque		0.1	0.13	0.36	0.13	0.85	0.32	3.67
Tiempo próxima estación	Eugenia	1.25	1.36	1.28	1.21	1.01	1.3	1.28
Ascenso y Descenso		0.11	0.09	0.09	0.31	0.24	0.13	0.08
Arranque		0.08	0.24	0.16	0.11	0.15	0.74	0.23
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.21	1.13	1.11	1.02	0.85	1.16	1.1
Ascenso y Descenso		0.11	0.81	0.09	0.18	0.4	0.09	0.05
Arranque		0.09	0.1	0.29	0.16	0.31	0.17	4.08
Tiempo próxima estación	Zapata	1.19	1.21	1.18	1.11	0.86	1.17	1.2
Ascenso y Descenso		0.16	0.14	0.12	0.19	1.3	0.09	0.06
Arranque		0.09	0.26	0.15	0.12	0.37	1.96	0.29

Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.42	1.42	1.49	1.35	1.23	1.61	1.44
Ascenso y Descenso		0.11	0.99	0.1	0.18	0.34	0.06	0.04
Arranque		0.08	0.3	0.09	0.1	0.56	2.2	3.26
Tiempo próxima estación	Viveros	1.24	1.26	1.27	1.5	1.18	1.43	1.29
Ascenso y Descenso		0.12	0.18	0.07	0.14	0.33	0.08	0.11
Arranque		0.14	0.09	0.09	0.1	0.62	0.95	0.14
Tiempo próxima estación	Quevedo	1.23	1.27	1.23	1.31	1.04	1.19	1.21
Ascenso y Descenso		0.14	0.56	0.1	0.19	0.32	0.09	0.11
Arranque		0.09	0.14	0.09	0.1	0.52	0.8	0.7
Tiempo próxima estación	Copilco	1.64	2.71	1.62	1.63	1.43	1.53	1.57
Ascenso y Descenso		0.97	0.17	0.26	0.24	0.25	0.07	0.05
Arranque		0.08	0.2	0.12	0.09	0.78	0.45	0.27
Tiempo próxima estación	Universidad	2.62	2.52	2.16	3.09	1.94	2.3	2.34
Arranque		0.08	0.08	0.08	0.13	0.19	0.08	0.08

Como se observa en la Figura 7, diagrama de flujo del modelo, el proceso de abordaje y descenso de usuarios es uno de los elementos clave del modelo, ya que determina el flujo de usuarios en cada estación a lo largo del recorrido. Para representar este comportamiento de manera realista, los porcentajes de ascenso y descenso de cada estación se determinaron a partir de los datos recolectados durante la investigación de campo en cada una de las estaciones de la línea 3. Dichos porcentajes se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Porcentaje de ascensos y descensos que hay en cada estación de la línea 3.

Estación	Ascensos	Descensos
Indios Verdes	75%	0%
Deportivo 18 de Marzo	15%	32%
Potrero	8%	2%
La Raza	25%	11%
Tlatelolco	8%	2%
Guerrero	75%	25%
Hidalgo	52%	40%
Juárez	8%	8%
Balderas	16%	11%
Niños Héroes/PJCDMX	6%	8%
Hospital General	20%	14%
Centro Médico	60%	45%
Etiopía/Plaza de la Transparencia	8%	6%
Eugenia	8%	6%
División del Norte	9%	7%
Zapata	60%	60%
Coyoacán	6%	45%
Viveros/Derechos Humanos	5%	8%

Miguel Ángel de Quevedo	11%	35%
Copilco	9%	80%
Universidad	0%	100%

Los porcentajes presentados en la Tabla 14 fueron incorporados al modelo de simulación para representar el comportamiento de los usuarios en cada estación, lo cual permitió una representación más cercana a las condiciones reales de operación de la línea 3 del STC Metro.

3.2. Procesamiento de datos

En esta fase se realizó el procesamiento de los datos con el objetivo de organizar, depurar y estructurar los datos recolectados.

La Tabla 15 muestra la estimación de afluencia por hora en cada estación de la línea 3 del metro CDMX, considerando rangos en horarios pico (60–80%) de la afluencia diaria y no pico (20–40%) del día.

Para lograr un acercamiento más realista se consideró un porcentaje representativo del 70% de la demanda diaria para horas pico y del 30% para horas valle. Asimismo, se consideró la duración total de los periodos pico y valle (Tabla 12) para calcular la cantidad de usuarios por hora correspondiente a cada categoría.

Ejemplo:

Para estimar la afluencia promedio por hora en cada estación, se distribuyó el promedio diario de usuarios considerando que el 70% de la demanda diaria se concentra en horas pico y el 30% restante en horas valle, porcentajes determinados con base en los patrones de movilidad reportados por la (SEMOVI, 2019) y el (INEGI, 2018). Posteriormente, este valor se dividió entre el número total de horas correspondientes a cada periodo (8 horas pico y 11 horas valle, según la Tabla 12), obteniendo así una estimación del promedio de usuarios por hora en cada tipo de horario. Estos valores son datos promedio y sirven como insumo para la generación de usuarios en el modelo de simulación.

- Indios Verdes

$$Hora\ pico = \frac{0.70 * 81806}{8} = 7158.025$$

$$Hora\ valle = \frac{0.30 * 81806}{11} = 2231.073$$

Tabla 15. Porcentaje de afluencia de usuarios por tipo de hora (pico o valle).

Estación	Promedio Diario	Hora pico	Hora valle
Indios Verdes	81806	7158.03	2231.07
Deportivo 18 de Marzo	25901	2266.34	706.39
Potrero	12234	1070.48	333.65
La Raza	25831	2260.21	704.48
Tlatelolco	13765	1204.44	375.41
Guerrero	7499	656.16	204.52
Hidalgo	12057	1054.99	328.83
Juárez	5194	454.48	141.65
Balderas	16593	1451.89	452.54
Niños Héroes/PJCDMX	17530	1533.88	478.09
Hospital General	16133	1411.64	439.99
Centro Médico	14727	1288.61	401.65
Etiopía/Plaza de la Transparencia	21751	1903.21	593.21
Eugenia	11897	1040.99	324.46
División del Norte	12258	1072.58	334.31
Zapata	16404	1435.35	447.38
Coyoacán	23776	2080.40	648.44
Viveros/Derechos Humanos	17071	1493.71	465.57
Miguel Ángel de Quevedo	29299	2563.66	799.06
Copilco	31289	2737.79	853.34
Universidad	50048	4379.20	1364.95

Para complementar la información de la Tabla 15 y poder hacer un modelo cercano a la realidad, con la afluencia en horas (pico y valle) se calculó la afluencia por ascensos y descensos en cada estación.

Lo primero fue calcular la afluencia: se calculó la demanda que hay en cada hora con ayuda de la Tabla 15, se multiplicó el total en hora pico por el porcentaje de ascensos o descensos (Tabla 14).

Ejemplo:

- Indios verdes

Se conocen los siguientes datos:

Estación	Ascensos	Descensos	Hora pico	Hora valle
Indios Verdes	75%	0%	7158.025	2231.07

Para conocer la afluencia que equivale en cada hora valle o pico se hace lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Ascensos hora pico} &= 7158.02 * 75\% \\ \text{Ascensos hora pico} &= 5368.52 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ascensos hora valle} &= 2231.07 * 75\% \\ \text{Ascensos hora valle} &= 1673.30 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Descensos hora pico} &= 7158.02 * 0\% \\ \text{Descensos hora pico} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Descensos hora valle} &= 2231.07 * 0\% \\ \text{Descensos hora valle} &= 0 \end{aligned}$$

A continuación, en la Tabla 16 se muestran los resultados de la afluencia de usuarios ya sea por hora valle u hora pico.

Tabla 16. Afluencia de usuarios por ascenso y descenso para cada tipo de hora (valle o pico).

Estación	Hora pico	Ascensos hora pico	Descensos hora pico	Hora valle	Ascensos hora valle	Descensos hora valle
Indios Verdes	7158.03	5368.52	0.00	2231.07	1673.30	0.00
Deportivo 18 de Marzo	2266.34	339.95	725.23	706.39	105.96	226.05
Potrero	1070.48	85.64	21.41	333.65	26.69	6.67
La Raza	2260.21	565.05	248.62	704.48	176.12	77.49
Tlatelolco	1204.44	96.36	24.09	375.41	30.03	7.51
Guerrero	656.16	492.12	164.04	204.52	153.39	51.13
Hidalgo	1054.99	548.59	422.00	328.83	170.99	131.53
Juárez	454.48	36.36	36.36	141.65	11.33	11.33
Balderas	1451.89	232.30	159.71	452.54	72.41	49.78
Niños Héroes/PJCDMX	1533.88	92.03	122.71	478.09	28.69	38.25
Hospital General	1411.64	282.33	197.63	439.99	88.00	61.60
Centro Médico	1288.61	773.17	579.88	401.65	240.99	180.74
Etiopía/Plaza de la Transparencia	1903.21	152.26	114.19	593.21	47.46	35.59
Eugenia	1040.99	83.28	62.46	324.46	25.96	19.47
División del Norte	1072.58	96.53	75.08	334.31	30.09	23.40
Zapata	1435.35	861.21	861.21	447.38	268.43	268.43
Coyoacán	2080.40	124.82	936.18	648.44	38.91	291.80
Viveros/Derechos Humanos	1493.71	74.69	119.50	465.57	23.28	37.25
Miguel Ángel de Quevedo	2563.66	282.00	897.28	799.06	87.90	279.67
Copilco	2737.79	246.40	2190.23	853.34	76.80	682.67
Universidad	4379.20	0.00	4379.20	1364.95	0.00	1364.95

Para conocer la velocidad promedio en la que viaja el tren entre estaciones, se eligieron los tiempos más estables y sin interrupciones que hubo al llegar de una estación a otra con base a la investigación de campo y se calculó la distancia que había entre estaciones con ayuda de

Google Maps, para así poder obtener la velocidad promedio por estación en la que viaja el tren (Tabla 17).

Tabla 17. Velocidad entre estaciones.

Estación	Distancia	Tiempo	Velocidad
	(m)	(S)	(m/s)
Indios Verdes			
Deportivo 18 de marzo	1330.00	149.40	8.90
Potrero	1010.00	94.20	10.72
La raza	1470.00	88.20	16.67
Tlatelolco	1590.00	129.60	12.27
Guerrero	1180.00	82.20	14.36
Hidalgo	840.59	67.80	12.40
Juarez	469.51	27.00	17.39
Balderas	700.54	65.40	10.71
Niños Héroes	879.31	63.60	13.83
Hospital General	778.31	63.00	12.35
Centro médico	892.12	70.80	12.60
Etiopía	1200.00	88.80	13.51
Eugenia	1080.00	75.00	14.40
División del norte	823.10	69.00	11.93
Zapata	1090.00	69.60	15.66
Coyoacán	1250.00	85.80	14.57
Viveros	1380.00	74.40	18.55
Quevedo	966.82	72.00	13.43
Copilco	1410.00	93.00	15.16
Universidad	1440.00	144.60	9.96

En la Tabla 17 se observa la velocidad promedio que tarda en recorrer el tren de una estación a otra las velocidades de obtuvieron al emplear la fórmula de velocidad $\left(v = \frac{d}{t}\right)$. Así mismo, se observa que el promedio de la velocidad suele de 9 a 19 (m/s) lo cual se asemeja a los datos de la Tabla 9.

3.3. Definición de variables

La selección de estas variables y entidades se realizó con base en los elementos necesarios para que el modelo representara de manera adecuada la operación real de la Línea 3. A continuación se define cada una:

- **Demanda de usuarios.** Es el número de usuarios que ingresan a cada estación en un periodo de tiempo determinado. Este dato se obtuvo de fuentes oficiales del STC Metro y del Portal de Datos Abiertos de la CDMX.

- **Horarios valle y pico.** Son los periodos del día con menor y mayor afluencia de usuarios. Se incluyeron debido a que el comportamiento de la Línea 3 cambia considerablemente dependiendo del horario del día.
- **Tiempos de llegada entre trenes.** Es el tiempo que transcurre entre la llegada de un tren y la siguiente a una misma estación. Este dato afecta directamente el tiempo de espera de los usuarios en el andén.
- **Tiempo de ascenso y descenso de los usuarios del metro.** Es el tiempo que transcurre desde que se abren hasta que se cierran las puertas del tren en cada estación. Este dato fue recolectado directamente en campo y tiene un impacto directo en el tiempo total que tarda el tren en completar su recorrido.
- **Distancia entre estaciones.** Es la distancia en kilómetros entre cada par de estaciones consecutivas de la Línea 3. Este dato se obtuvo con ayuda de Google Maps y se verificó con datos oficiales del STC Metro.
- **Velocidad del tren entre estaciones.** Es la velocidad promedio a la que viaja el tren entre dos estaciones consecutivas. Se calculó a partir de la distancia y los tiempos de trayecto recolectados en campo.
- **Afectaciones aleatorias.** Son eventos imprevistos que alteran la operación normal del sistema, como retrasos en la frecuencia de salida de los trenes. Se consideraron para simular condiciones de interrupción del servicio y observar su impacto en la acumulación de usuarios.
- **Capacidad del tren (9 vagones).** Es el número máximo de usuarios que puede transportar un tren de la línea 3, el cual es de 2,500 usuarios por unidad. Esta variable es necesaria para controlar cuántos usuarios pueden abordar el tren en cada estación.
- **Flujo de usuarios por estación.** Es la cantidad de usuarios que suben y bajan en cada estación a lo largo del recorrido. Este dato se obtuvo a partir de los datos recolectados en campo y de los porcentajes de ascensos y descensos calculados para cada estación.
- **Número de trenes en operación.** Es la cantidad de trenes activos en la línea 3 durante la simulación. Esta variable es importante para evaluar cómo cambia el sistema al modificar la frecuencia del servicio.

3.4. Diseño conceptual

El diagrama de flujo presentado en la Figura 7 fue diseñado a partir de la observación directa realizada durante la recolección de datos de campo en la línea 3 del STC Metro. Durante esta etapa se identificó la dinámica real de operación del sistema, lo que permitió comprender cómo interactúan los dos procesos principales que conforman el modelo: el proceso del tren y el proceso del usuario.

El proceso del tren contempla desde que el tren sale del taller hasta que completa su recorrido, pasando por cada estación donde abre y cierra puertas antes de avanzar a la siguiente estación. El proceso del usuario contempla desde su llegada al andén hasta su descenso en la estación destino, incluyendo el tiempo de espera en caso de que no haya un tren disponible en el andén. Ambos procesos se integran cuando el usuario aborda el tren, y se separan nuevamente cuando este llega a su estación destino y desciende.

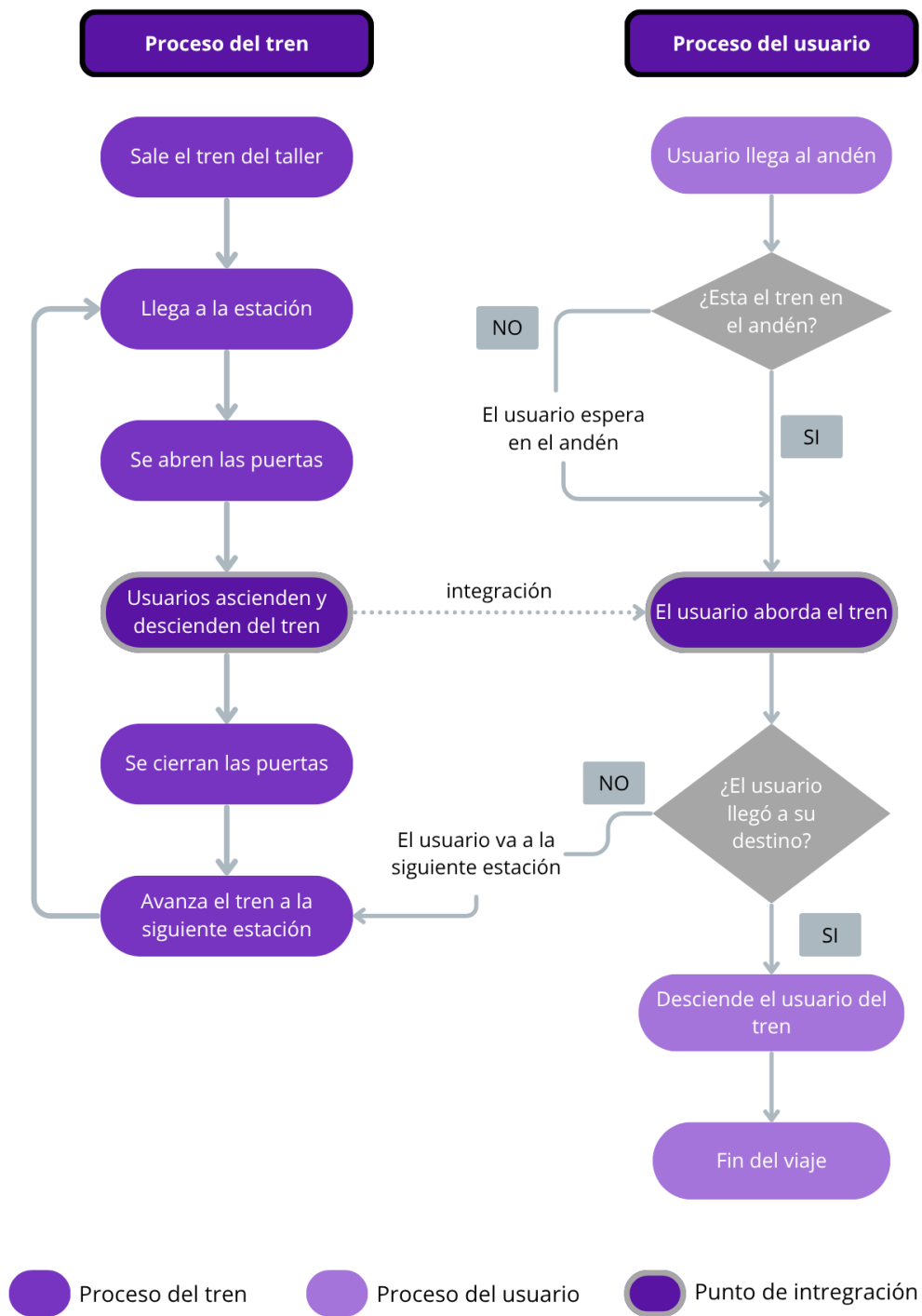


Figura 7. Diagrama de flujo del modelo.

3.4.1. Definición del alcance del modelo

La finalidad de este análisis es replicar el funcionamiento de la línea 3 del metro para identificar las estaciones que actualmente generan cuellos de botella, así como aquellas con mayor riesgo de presentarlos en el futuro derivado del incremento en la afluencia de usuarios.

Con el modelo se simularon distintos escenarios operativos de la línea 3 que permitieron identificar los puntos críticos que afectan el funcionamiento del servicio. A partir de este análisis se evaluó el impacto de modificar la frecuencia de salida de los trenes, observando que una mayor frecuencia reduce la acumulación de usuarios en los andenes y mejora el flujo general del servicio

3.4.2. Descripción de la dinámica e interacción las entidades del sistema

Como se observa en la Figura 7, para tener una mejor visualización se separó el proceso que realiza el tren desde que sale del taller hasta que completa su recorrido, especificando los pasos a seguir entre estaciones. El proceso del usuario se modela desde su llegada al andén hasta su descenso en la estación destino, incluyendo el tiempo de espera en caso de que no haya un tren disponible en el andén.

Al inicio de la simulación ambas entidades se modelan de manera independiente hasta su punto de encuentro, que ocurre cuando el tren llega a la estación donde el usuario se encuentra esperando. En ese momento ambas entidades se integran y comienza el traslado del usuario. Una vez que el usuario alcanza su estación destino y desciende, las entidades se separan nuevamente.

Este comportamiento se replica para cada usuario a lo largo de todo el recorrido de la línea 3, evaluando en cada estación cuántos usuarios ascienden y descienden del tren. Los datos recolectados en campo permitieron modelar esta dinámica de manera que los resultados obtenidos fueran representativos de la operación real del sistema

Capítulo IV. Desarrollo del modelo de simulación

En esta sección se describe el modelo de simulación realizado, sus elementos, y funcionalidad.

4.1. Construcción del modelo

Debido a la complejidad del sistema que se eligió, se debían considerar puntos cruciales que se pudieran implementar en el modelo y se pudieran controlar y visualizar. Tales como,

- **Generación de trenes.** Es necesario poder controlar el tiempo en el que se generan dependiendo de qué horario corre el modelo.
- **Generación de usuarios.** En la operación real de la línea 3, el número de usuarios que ingresan por minuto en estaciones de alta afluencia durante horas pico puede ser muy elevado. Para evitar que esta cantidad de entidades saturara el modelo e impidiera su correcta ejecución, se aplicó un factor de escala de 1:20, es decir, cada entidad generada en Simio representa a 20 usuarios reales. De esta manera el modelo puede correr sin problemas manteniendo una representación proporcional de la demanda real.
- **Velocidad a la que viaja el tren de una estación a otra.** Para calcular la velocidad con la que el tren suele viajar, se hizo mediante la siguiente fórmula:

$$v = \frac{d[km]}{t[h]}$$

El tiempo fue un promedio de todos los tiempos recolectados y la distancia se obtuvo por *Google Maps* tratando de ser los más exactos posibles se comprobó con datos que se encuentran en la página del [Metro. Cndx](#). Así mismo, para una simulación más real se utilizó la distancia que hay entre estaciones.

- **Determinar cuántas personas pueden subir al tren.** La capacidad máxima de un tren es de 2,500 personas. Cuando un tren llega a una estación con su capacidad máxima, el número de usuarios que pueden abordar depende directamente de cuántos desciendan en esa estación.
En los casos en que el tren no está al límite de su capacidad, la cantidad de usuarios que descienden en cada estación se determinó mediante una distribución uniforme, la cual requiere un valor mínimo y un valor máximo. El valor máximo corresponde a la afluencia de descensos calculada para cada estación en la Tabla 16, mientras que el valor mínimo se obtuvo al multiplicar ese valor máximo por el 17%, porcentaje que representa el promedio general de descensos de la línea 3 en la Tabla 8. De esta manera la cantidad de usuarios que descienden en cada estación varía de forma aleatoria dentro de un rango representativo de la operación real del sistema
- **Espera de los usuarios a que llegue un tren.** Debido a que se está simulando un sistema de transporte, es importante que un usuario solo pueda avanzar si se aborda un tren, en caso de que no haya un tren, tendrá que esperar en el andén.

Al considerar los puntos anteriores, se empezó a modelar y tras varias pruebas, descritas en la Tabla 27, se logró construir un modelo que representa adecuadamente la operación real de la línea 3. Para verificar que el modelo correspondía a la realidad, se compararon los resultados obtenidos en la simulación con datos reales del sistema, como la cantidad de trenes y usuarios generados en distintos horarios. Los resultados de esta comparación, presentados en la sección 4.3, mostraron un porcentaje de error menor al 11%, lo que indica que el modelo replica de manera aceptable el comportamiento real de la línea 3.

4.1.1. Elementos del modelo

Para la realización del modelo se utilizaron diversos elementos de Simio, a continuación, se explica la finalidad de cada elemento.

- **Generación de usuarios:**
 - Source. Solo genera los usuarios cada cierto tiempo, este tiempo va a depender si el modelo corre en hora pico o valle.
El tiempo va a cambiar para cada estación, ya que no todas tienen la misma demanda.
 - Model Entity. Solo representa visualmente al usuario como es que hace su recorrido por la línea 3 del metro.
- **Generación de trenes:**
 - Elemento *Source*. Solo genera los trenes cada cierto tiempo, este tiempo va a depender si el modelo corre en hora pico o valle.
 - ModelEntity. Solo representa visualmente al usuario como es que hace su recorrido por la línea 3 del metro.
- **Velocidad y distancia entre estaciones:**
 - Elemento *Path*. Hay *Paths* para unir cada estación, a estos *Paths* se indicó la distancia real que hay entre estaciones y la velocidad que tarda en recorrer el tren tal distancia.
- **Ascenso de los usuarios al tren:**
 - Combiner. En Simio está integrado por varios elementos:
 - ParentInput. Será el tren
 - MemberInput. Serán los usuarios

La función del *Combiner* será que la entidad padre será la que ayude al sistema para que los usuarios hagan fila en el andén, mientras el tren llega a la estación.

Además, en el elemento *Combiner* se va a determinar la cantidad de usuarios que pueden abordar el tren y la cantidad de tiempo que se tarda el proceso de ascenso y arranque del tren.
- **Descenso de los usuarios del tren:**
 - Separator En Simio está integrado por varios elementos:
 - ParentInput. Será el tren
 - MemberInput. Serán los usuarios

La función del elemento *Separator* ayudará a que los usuarios desciendan del tren para que este pueda continuar a la siguiente estación.

Además, el *Separator* se va a determinar la cantidad de usuarios que bajan en cada estación y el tiempo que tardan en bajar.

- **Fin del viaje para los usuarios:**
 - Sink. Ayudará a destruir los usuarios que completaron su viaje y así no saturar el modelo, ya que estos ya cumplieron con su recorrido.

Al implementar todos los elementos mencionados anteriormente se logra obtener el siguiente modelo (Figura 8).

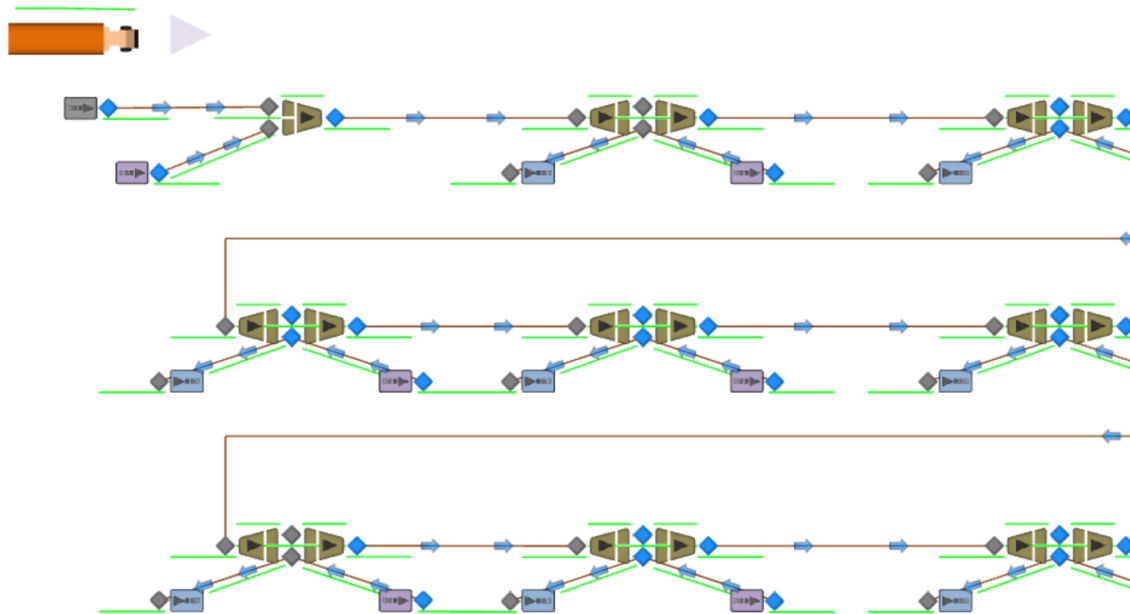


Figura 8. Captura representativa del modelo en Simio.

En la Figura 8 se observa parcialmente la línea 3 del metro, cada combinator y separator forman una estación de la línea las cuales están de color verde, los sink que ayudan a destruir a los usuarios son de color azul y los source que generan usuarios son de color morado. El tren está en la parte superior de color naranja y a su costado están los usuarios de color lila.

4.2. Implementación del modelo

Esta fase implicó plasmar toda la información previamente recolectada en el modelo para que este funcione de manera semejante a la realidad.

4.2.1. Generación de usuarios

Se debe partir de dos conceptos clave y son la principal razón de estudio del modelo.

1. Horas pico, estas son las principales horas que causan problemáticas en el sistema.
2. Horas valle, es el ideal que metro siempre funcione bajo estas condiciones para no presentar fallas en el sistema.

Como se observa en la Tabla 16 se tiene la afluencia de usuarios que hay por hora (ascenso y descenso) en un día, se decidió escalar esta cifra a 1:20, es decir 1 entidad en Simio equivale

a 20 usuarios en la vida real, esto con la finalidad de no saturar el modelo, y así se pudieron obtener los siguientes resultados.

Afluencia de ascensos:

Para alimentar cada Source del modelo fue necesario conocer cada cuántos segundos se debía generar una entidad en Simio. Para obtener este valor, primero se aplicó el factor de escala 1:20 a la afluencia de ascensos por hora de cada estación, dividiendo dicho valor entre 20. Posteriormente, dado que Simio trabaja en segundos, se convirtió el resultado a segundos dividiendo 3,600 entre el valor escalado. De esta manera se obtuvo el intervalo de tiempo en segundos entre la generación de cada entidad en el modelo, donde un valor pequeño indica que los usuarios se generan con mayor frecuencia y un valor grande indica menor afluencia

Ejemplo:

- Indios Verdes

$$\text{Ascensos segundo (1:20)} = \frac{3600}{\frac{5368.52}{20}}$$

$$\text{Ascensos segundo (1:20)} = \mathbf{13.41}$$

Aplicando el procedimiento del cálculo mostrado en el ejemplo anterior, se obtuvieron los valores de ascenso por segundo, tanto en hora pico como valle. La Tabla 18 representa estos resultados.

Tabla 18. Afluencia de ascensos cada segundo (1:20) por cada estación.

Estación	Ascensos hora pico	Ascensos segundos pico 1:20	Ascensos hora valle	Ascensos segundos valle 1:20
Indios Verdes	5368.52	13.41	1673.30	43.03
Deportivo 18 de Marzo	339.95	211.80	105.96	679.51
Potrero	85.64	840.75	26.69	2697.40
La Raza	565.05	127.42	176.12	408.81
Tlatelolco	96.36	747.24	30.03	2397.39
Guerrero	492.12	146.31	153.39	469.40
Hidalgo	548.59	131.25	170.99	421.08
Juárez	36.36	1980.31	11.33	6353.49
Balderas	232.30	309.94	72.41	994.40
Niños Héroes/PJCDMX	92.03	782.33	28.69	2509.98
Hospital General	282.33	255.02	88.00	818.20
Centro Médico	773.17	93.12	240.99	298.77
Etiopía/Plaza de la Transparencia	152.26	472.89	47.46	1517.17
Eugenia	83.28	864.56	25.96	2773.81
División del Norte	96.53	745.87	30.09	2393.00
Zapata	861.21	83.60	268.43	268.23
Coyoacán	124.82	576.81	38.91	1850.61
Viveros/Derechos Humanos	74.69	964.04	23.28	3092.97

Miguel Ángel de Quevedo	282.00	255.32	87.90	819.14
Copilco	246.40	292.21	76.80	937.50
Universidad	0.00	0.00	0.00	0.00

Afluencia de descensos:

Para la afluencia de descensos se utilizó una distribución uniforme en Simio, ya que en la realidad la cantidad de usuarios que descienden en cada estación no es constante, sino que varía entre un valor mínimo y un valor máximo dependiendo de factores como el horario y la demanda. La distribución uniforme permite representar esta variabilidad de forma aleatoria dentro de un rango definido, lo cual hace que el modelo sea más representativo de la operación real del sistema.

Para determinar el valor máximo se utilizó directamente la afluencia de descensos calculada para cada estación en la Tabla 16. Para el valor mínimo se tomó como referencia la Tabla 8, la cual reporta que el promedio general de descensos en la línea 3 representa el 17% del total de viajes. Este porcentaje se multiplicó por el valor máximo de cada estación, obteniendo así el valor mínimo de descensos posible. Una vez obtenidos ambos valores, se aplicó el factor de escala 1:20 para mantener la consistencia con el resto del modelo y evitar su saturación.

Ejemplo:

- Deportivo 18 de Marzo (hora pico)

$$\text{Mínimo} = 725.23 * 17\%$$

$$\text{Mínimo} = 123.28$$

$$\text{Descensos segundo (1:20)}_{\min} = \frac{3600}{\frac{123.28}{20}} \quad \text{Descensos segundo (1:20)}_{\max} = \frac{3600}{\frac{725.23}{20}}$$

$$\text{Descensos segundo (1:20)}_{\min} = \mathbf{584.00} \quad \text{Descensos segundo (1:20)}_{\max} = \mathbf{99.28}$$

Aplicando el procedimiento del cálculo mostrado en el ejemplo anterior, se obtuvieron los valores de la afluencia de descensos por segundo, tanto en hora pico como valle. La Tabla 19 y 20 representan estos resultados.

Tabla 19. Afluencia de descensos cada segundo (1:20) pico por cada estación.

Estación	Descensos hora pico		Descensos segundo pico 1:20	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Indios Verdes	0.00	0.00	0	0
Deportivo 18 de Marzo	725.23	123.29	99.28	584.00
Potrero	21.41	3.64	3362.99	19782.31
La Raza	248.62	42.27	289.60	1703.50
Tlatelolco	24.09	4.10	2988.95	17582.04
Guerrero	164.04	27.89	438.92	2581.86
Hidalgo	422.00	71.74	170.62	1003.64
Juárez	36.36	6.18	1980.31	11648.86

Balderas	159.71	27.15	450.82	2651.91
Niños Héroes/PJCDMX	122.71	20.86	586.75	3451.47
Hospital General	197.63	33.60	364.32	2143.05
Centro Médico	579.88	98.58	124.17	730.38
Etiopía/Plaza de la Transparencia	114.19	19.41	630.51	3708.90
Eugenia	62.46	10.62	1152.75	6780.89
División del Norte	75.08	12.76	958.97	5641.02
Zapata	861.21	146.41	83.60	491.78
Coyoacán	936.18	159.15	76.91	452.40
Viveros/Derechos Humanos	119.50	20.31	602.53	3544.27
Miguel Ángel de Quevedo	897.28	152.54	80.24	472.01
Copilco	2190.23	372.34	32.87	193.37
Universidad	4379.20	744.46	16.44	96.71

Tabla 20. Afluencia de descensos cada segundo (1:20) valle por cada estación.

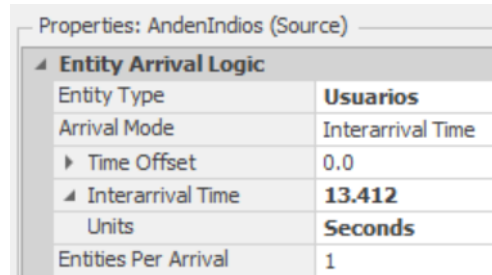
Estación	Descensos hora valle		Descensos segundo valle 1:20	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Indios Verdes	0.00	0.00	0.00	0.00
Deportivo 18 de Marzo	226.05	38.43	318.52	1873.65
Potrero	6.67	1.13	10789.60	63468.25
La Raza	77.49	13.17	929.12	5465.39
Tlatelolco	7.51	1.28	9589.54	56409.05
Guerrero	51.13	8.69	1408.19	8283.46
Hidalgo	131.53	22.36	547.40	3220.00
Juárez	11.33	1.93	6353.49	37373.44
Balderas	49.78	8.46	1446.39	8508.19
Niños Héroes/PJCDMX	38.25	6.50	1882.49	11073.45
Hospital General	61.60	10.47	1168.86	6875.62
Centro Médico	180.74	30.73	398.36	2343.30
Etiopía/Plaza de la Transparencia	35.59	6.05	2022.90	11899.39
Eugenia	19.47	3.31	3698.41	21755.36
División del Norte	23.40	3.98	3076.71	18098.28
Zapata	268.43	45.63	268.23	1577.81
Coyoacán	291.80	49.61	246.75	1451.46
Viveros/Derechos Humanos	37.25	6.33	1933.10	11371.19
Miguel Ángel de Quevedo	279.67	47.54	257.44	1514.38
Copilco	682.67	116.05	105.47	620.40
Universidad	1364.95	232.04	52.75	310.29

Con los datos obtenidos se logró configurar la generación de usuarios, así como la eliminación de estos, lo cual ayuda a que el modelo corra lo más cercano a la realidad.

Se logró integrar los datos obtenidos en la Tabla 18 en cada Source (andenes) de cada estación.

Ejemplo:

En la Figura 9 se puede observar que para el andén Indios Verdes en la sección *Interarrival Time* se colocaron 13.412 segundos, que es lo equivalente en la Tabla 18 en el escenario de horas pico.

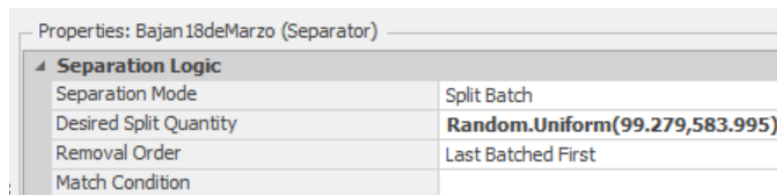


Properties: AndenIndios (Source)	
Entity Arrival Logic	
Entity Type	Usuarios
Arrival Mode	Interarrival Time
Time Offset	0.0
Interarrival Time	13.412
Units	Seconds
Entities Per Arrival	1

Figura 9. Se observa cómo se programa la generación de usuarios.

Al ingresar todos los valores en cada andén de la línea 3, se está indicando cada cuántos segundos se deben generar usuarios, mientras más grande sea el número, más tiempo tardarán en generarse y mientras más pequeño sea, más rápido se van a generar y tiene más probabilidades de que sea más rápido la saturación del modelo.

Para ingresar los datos de los descensos en cada estación, datos que se observan en la Tabla 19 y 20 se logra por medio de un *Separator* para cada estación, en este se mete como una distribución uniforme, como se observa en la Figura 10 en la estación Deportivo 18 de Marzo en el escenario de horas pico.



Properties: Bajan18deMarzo (Separator)	
Separation Logic	
Separation Mode	Split Batch
Desired Split Quantity	Random.Uniform(99.279,583.995)
Removal Order	Last Batched First
Match Condition	

Figura 10. Se observa en donde se programa la eliminación de usuarios.

Al colocar las distribuciones de probabilidad en cada elemento elemento *Separator* servirá para que cada que llegue un tren solo puedan descender usuarios respecto a la distribución introducida.

4.2.2. Generación de trenes

Para el correcto funcionamiento del modelo se debe considerar la capacidad máxima que tiene un tren, la cual es de 2500 usuarios, condición que se presenta cuando el tren opera al límite de su capacidad.

Para controlar los usuarios que pueden subir y los que no al tren dependiendo de si hay espacio o si el usuario desea esperar otro tren se utilizaron elementos *Processes* y variables reales en Simio.

Se utilizaron las siguientes variables reales:

- Capacidad máxima: 2500 usuarios a escala (1:20) son 125.
- Usuarios en el tren: son los usuarios que están actualmente arriba del tren.
- Espacio disponible: es el espacio que queda 125 usuarios en el tren.

Se utilizaron dos elementos *Processes*:

- **Ascenso de usuarios:**
Este proceso se encarga de ver cuántos usuarios hay en el tren y ver si hay espacio para que aborden más usuarios, en caso de que si haya espacio abordan los usuarios, si no hay espacio esperan en el andén al siguiente tren.

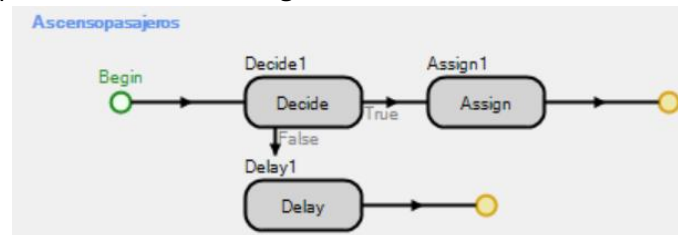


Figura 11. Proceso para que los usuarios puedan abordar.

- **Descenso de usuarios:**
Este proceso se encargó de que los usuarios pudieran descender del tren.

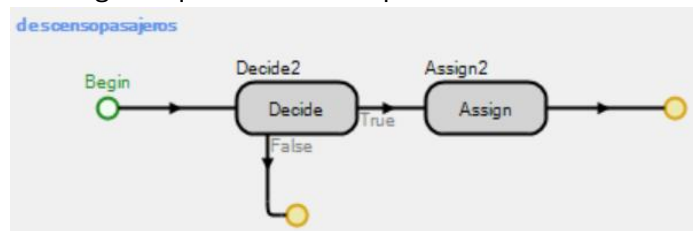


Figura 12. Proceso para que los usuarios puedan abordar.

Los elementos *Processes* se implementaron de la siguiente manera.

- **Separator:**
En cada elemento *Separator* se agregó el proceso de la Figura 12 cada vez que salían usuarios del tren, al implementar el proceso en esta sección se logró un correcto descenso de usuarios.

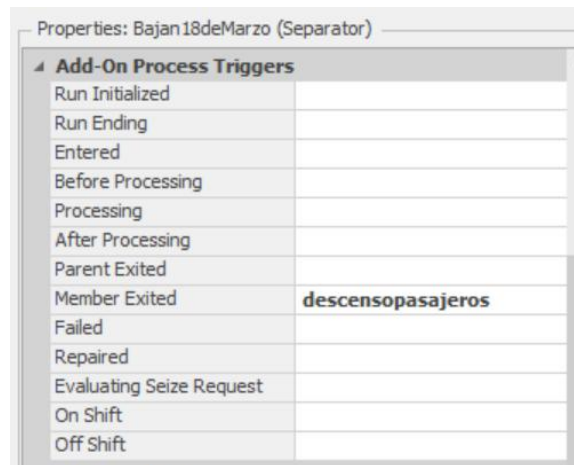


Figura 13. Se observa cómo se programa el elemento Separador 18 de marzo.

- **Combiner:**

En cada elemento *Combiner* se agregó el proceso de la Figura 11 cada vez que ingresaban usuarios al tren, es decir, cuando el miembro se une al padre, este proceso es de suma importancia ya que determina si el tren aún tiene espacio para que puedan abordar más usuarios.

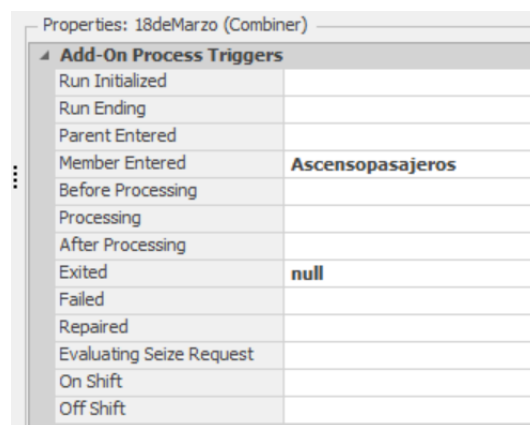


Figura 14. Se observa cómo se programa el Combiner 18 de marzo.

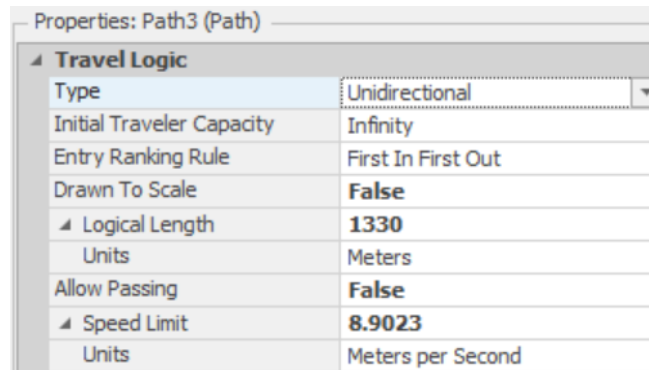
4.2.3. Programación de los Paths

Para los Paths que es la unión de cada estación (vías) era necesario que estos estuvieran a la escala real, con ayuda de los datos obtenidos en la Tabla 17 fue posible programar cada Path.

Como se observa en la Figura 15 se tienen las siguientes características:

- **Type.** Unidirectional, esto es debido a que como se está simulando solo de Indios Verdes a Universidad, es decir solo tiene un sentido de viaje el modelo.
- **Drawn To Scale.** False, significa que la distancia que se pone en el Path es la real, en este caso 1330 metros, es decir, 1.33 kilómetros.

- **Allow Passing.** False, esta parte nos ayuda a que ningún tren pueda rebasar al que se encuentra adelante, ya que es un sistema lineal, por lo que no es posible hacer rebases.
- **Speed Limit.** Solo se agrega la velocidad con la que viaja el tren en los tramos entre estaciones.



Properties: Path3 (Path)	
Travel Logic	
Type	Unidirectional
Initial Traveler Capacity	Infinity
Entry Ranking Rule	First In First Out
Drawn To Scale	False
Logical Length	1330
Units	Meters
Allow Passing	False
Speed Limit	8.9023
Units	Meters per Second

Figura 15. Se observa cómo se programa el Combiner la estación deportivo 18 de marzo.

4.3. Validación del modelo

4.3.1. Desarrollo iterativo del modelo

Para la determinación final del modelo de simulación empleado en la tesis, se llevaron a cabo cinco pruebas del modelo de simulación. A continuación, se describe el funcionamiento, las fallas identificadas, el porcentaje de elementos aprovechados y la solución para cada prueba. El porcentaje de elementos aprovechados indica qué proporción de los componentes, lógica y configuraciones de cada modelo de simulación resultaron útiles y fueron incorporados al modelo siguiente.

Prueba 1

- **Funcionamiento.** Se generaban trenes como entidades tipo *Vehículo* en intervalos de tiempo definidos, permitiendo que los pasajeros abordaran y descendieran en cada estación.
- **Fallas identificadas.** El modelo no proporcionaba la información necesaria para obtener conclusiones cercanas a la realidad. Además, las entidades no se destruían correctamente al finalizar su recorrido.
- **Porcentaje de elementos aprovechados.** Solo el 40% de los elementos del modelo resultaron aprovechables: la lógica de intervalos de tiempo y el abordaje/descenso de pasajeros. El 60% restante debió rediseñarse porque la representación mediante Vehículos no permitía controlar la destrucción de entidades.
- **Solución.** Se sustituyó la generación de y trenes como *Vehículos* por entidades *ModelEntity*, lo que permitió un mayor control del comportamiento y evitó las fallas observadas.

Prueba 2

- Funcionamiento. Se intentó que un elemento *Server* representara la estación, de modo que los usuarios pudieran abordar únicamente cuando hubiera un tren disponible, en caso contrario, debían esperar.
- Fallas identificadas. Debido a las características del elemento *Server*, no era posible la interacción entre dos entidades, por lo que los usuarios nunca abordaban el tren. Además, no se podía controlar correctamente el flujo de usuarios y se observó que el nivel de programación requerido era elevado, lo que implicaba una pérdida considerable de tiempo.
- Porcentaje de elementos aprovechados. El 70% de los elementos resultaron aprovechables, el planteamiento conceptual del flujo de espera y abordaje era adecuado y el flujo general de usuarios se aproximaba parcialmente a la realidad. Se aprovechó esta lógica, pero se optó por cambiar el *Server* debido a sus limitaciones.
- Solución. Se optó por representar visualmente el proceso de ascenso al tren y controlar el flujo mediante elemento *Processes*: si el tren llegaba a la estación, los usuarios comenzaban a salir, cuando el tren salía del *Server*, los usuarios dejaban de hacerlo.

Prueba 3

- Funcionamiento. Se implementaron los elementos *Combiners* y *Separators*, logrando que los usuarios esperaran la llegada del tren para poder abordarlo.
- Fallas identificadas. Al comparar los resultados con los obtenidos mediante el uso de *Servers*, se observó que estos últimos proporcionaban más información. Se concluyó que contar con más información hacía al modelo más completo.
- Porcentaje de elementos aprovechados. El 90% de los elementos de esta prueba resultaron aprovechables, el uso de elementos *Combiners* y *Separators* permitió una representación más realista del proceso de espera y abordaje de los usuarios en el andén.
- Solución. Se decidió conservar esta lógica como base del modelo.

Prueba 4

- Funcionamiento. Se implementó nuevamente el uso de *Vehículos* para los trenes y se utilizaron elementos *Combiners* y *Separators* para representar las estaciones.
- Fallas identificadas. Se identificó que el uso de un *Vehículo* solo se justificaba para permitir el abordaje de los usuarios, acción que ya se realizaba con los elementos *Combiners*.
- Porcentaje de elementos aprovechados. El 75% de la lógica de los elementos *Combiners* y *Separators* para las estaciones simuló adecuadamente la espera en el andén y abordaje al tren de los usuarios. Sin embargo, el 25% correspondiente a la representación de trenes mediante *Vehículos* debió descartarse debido a la sobregeneración de trenes.
- Solución. Se descartó el uso de *Vehículos* y se optó definitivamente por representar al tren como un *ModelEntity* para evitar la sobregeneración.

Prueba 5

- Funcionamiento. Se decidió utilizar elementos Combiners y Separators para las estaciones y entidades para los trenes. El tren se definió como la entidad padre y los usuarios como Members.
- Fallas identificadas. No se presentaron fallas, el modelo funcionó de manera correcta y los resultados obtenidos fueron coherentes con la realidad.
- Porcentaje de elementos aprovechados. El 95% de los elementos del modelo resultaron aprovechables.
- Solución. Después de varias pruebas y ajustes, se logró el funcionamiento deseado del modelo, representando adecuadamente una operación más realista del metro.

4.3.2. Resultados

De acuerdo con el horario oficial de operación de la línea 3 del STC Metro, la línea opera 19 horas diarias, desde las 5:00 hasta las 24:00 horas (STC Metro, 2024). Con base en esto, se estableció que la duración total de cada simulación fuera de 19 horas.

Al simular el modelo en horario de horas pico, se observó que aproximadamente a las 10 horas (Figura 16) de funcionamiento el modelo deja de correr debido a que la acumulación de usuarios en los andenes superó la capacidad máxima del sistema. Esto refleja una condición real de la línea 3, donde durante las horas de mayor demanda el sistema opera constantemente al límite de su capacidad.

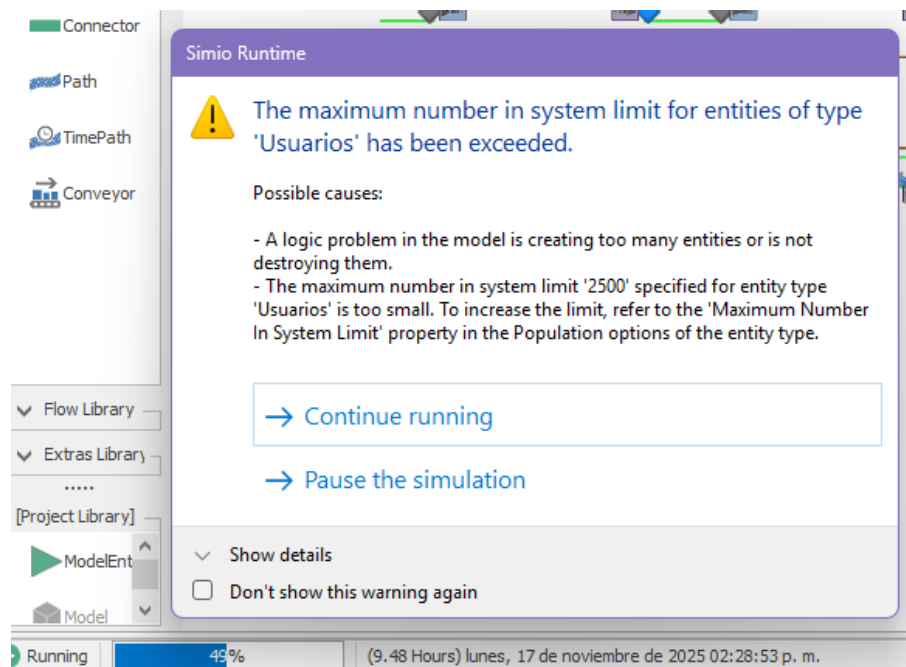


Figura 16. Se observa que la simulación al llegar a las 10 horas de funcionamiento se satura el modelo.

En cambio, al simular el modelo en horario de horas valle, el modelo logró correr durante las 19 horas completas sin presentar saturación, lo que permitió obtener resultados comparables

con la operación real del sistema. Para validar estos resultados se comparó la cantidad total de usuarios y trenes generados por el modelo contra los valores reales, tanto obtenidos en medios oficiales como en la recolección de datos de campo.

Trenes generados

De acuerdo con el tiempo de llegada entre trenes (4 min) mostrados en la Figura 4, se decidió que la salida de trenes fuera cada 3 minutos del taller de Indios Verdes, esto debido a que mientras se recolectaban datos de campo se pudo observar que 3 minutos era más constante.

Tomando en cuenta lo anterior se sabe lo siguiente:

- Trenes generados en 1 hora

$$1 \text{ hora} = 60 \text{ min}$$

$$Trenes_{hr} = \frac{60 \text{ min}}{3 \text{ min}}$$

$$Trenes_{hr} = \mathbf{20 \text{ Trenes } \times \text{ hora}}$$

- Trenes generados en 19 horas

$$Trenes_{total} = 20 * 19$$

$$Trenes_{total} = \mathbf{380 \text{ trenes en } 19 \text{ horas}}$$

A continuación, se comprueban los datos anteriores de acuerdo con el modelo de simulación en Simio.

- Trenes generados en hora pico

Como se explicó anteriormente para este caso solo se observan cuántos trenes se generan en una hora debido a las limitaciones en Simio. En la Figura 17 se muestra cuantos trenes se generan en 1 hora. Como se puede apreciar son 20 trenes, lo cual corresponde a los cálculos previamente realizados.

Object Name	Category	Data Item	Statistic	Average Total
Tren	Throughput	NumberCreated	Total	20.0000
		NumberDestroyed	Total	9.0000

Figura 17. Se observa la cantidad de trenes generados en una hora pico.

- Trenes generados en hora valle

En este caso se simulará tanto en 19 horas como 1 hora de funcionamiento, para comprobar que los resultados obtenidos sean acordes a la realidad.

Se observa en la Figura 18 cuando modelo corrió 19 horas y se obtuvieron 380 trenes, cifra correspondiente a la realidad.

Object Name	Category	Data Item	Statistic	Average Total
Tren	Throughput	NumberCreated	Total	380.0000
		NumberDestroyed	Total	368.0000

Figura 18. Se observa la cantidad de trenes generados en 19 horas en hora valle.

Mientras que en la Figura 19 se simuló durante 1 hora y al igual que en las horas pico solo se generan 20 trenes, cifra correspondiente a la realidad.

Object Name ▲	Category ▼	Data Item ▲	Statistic ▲	Average Total
Tren	...	Throughput	NumberCreated	Total
				20.0000
			NumberDestroyed	Total
				8.0000

Figura 19. Se observa la cantidad de trenes generados en 1 hora en hora valle.

Usuarios generados

Para saber la cantidad aproximada de usuarios generados en un día, fue necesario calcular cuántos usuarios se generan en total en el sistema a lo largo de 19 horas de operación del STC Metro. Para ello se utilizó la afluencia por hora de cada estación calculada en la Tabla 15, la cual contempla tanto horas valle como horas pico.

Dado que el modelo trabaja en segundos y con el factor de escala 1:20, fue necesario convertir la afluencia de usuarios por hora a un intervalo de tiempo en segundos entre la generación de cada entidad. Para obtener este valor se aplicó la siguiente fórmula:

$$Segundo_{1:20} = \frac{3600}{usuarios \times hora} \times 20$$

En la Tabla 15 se observan los resultados obtenidos con el cálculo previamente mencionado, se puede observar que un valor pequeño indica que los usuarios se generan con mayor afluencia, lo que corresponde a las estaciones con alta afluencia, mientras que un valor grande indica menor afluencia.

En la Tabla 21 se muestra la afluencia de usuarios por segundo en hora valle y pico con el escalamiento previamente mencionado (1:20).

Tabla 21. Afluencia diaria por estación a escala 1:20.

Estación	Hora pico	Hora valle	Segundo pico 1:20	Segundo valle 1:20
Indios Verdes	7158.03	2231.07	10.06	32.27
Deportivo 18 de Marzo	2266.34	706.39	31.77	101.93
Potrero	1070.48	333.65	67.26	215.79
La Raza	2260.21	704.48	31.86	102.20
Tlatelolco	1204.44	375.41	59.78	191.79
Guerrero	656.16	204.52	109.73	352.05
Hidalgo	1054.99	328.83	68.25	218.96
Juárez	454.48	141.65	158.43	508.28
Balderas	1451.89	452.54	49.59	159.10
Niños Héroes/PJCDMX	1533.88	478.09	46.94	150.60
Hospital General	1411.64	439.99	51.01	163.64

Centro Médico	1288.61	401.65	55.87	179.26
Etiopía/Plaza de la Transparencia	1903.21	593.21	37.83	121.37
Eugenia	1040.99	324.46	69.17	221.91
División del Norte	1072.58	334.31	67.13	215.37
Zapata	1435.35	447.38	50.16	160.94
Coyoacán	2080.40	648.44	34.61	111.04
Viveros/Derechos Humanos	1493.71	465.57	48.20	154.65
Miguel Ángel de Quevedo	2563.66	799.06	28.09	90.11
Copilco	2737.79	853.34	26.30	84.38
Universidad	4379.20	1364.95	16.44	52.75

Con los datos de la Tabla 21 se puede obtener un valor cercano a la cantidad de usuarios generados en 19 horas de operación.

- Total de usuarios en horas pico

$$Usuarios_{total} = \frac{10.06 + 31.77 + \dots + 26.299 + 16.441}{19} =$$

$$Usuarios_{total} = \frac{1118.45}{19}$$

$$Usuarios_{x\ hora} = \mathbf{58.87\ por\ hora}$$

- Total de usuarios en horas valle

$$Usuarios_{total} = \frac{32.271 + 101.927 + \dots + 84.375 + 52.749}{19}$$

$$Usuarios_{total} = \frac{3588.39}{19}$$

$$Usuarios_{x\ hora} = \mathbf{188.86\ por\ hora}$$

A continuación, se comprueban los datos anteriores de acuerdo con el modelo de simulación en Simio.

- Usuarios generados en hora pico

Para la generación de usuarios en hora pico, la simulación corrió durante una hora. Como se observa en la Figura 20, se generaron 552 usuarios, valor que difiere del valor calculado de 59 usuarios por hora obtenido anteriormente.

Object Name	Category	Data Item	Statistic	Average Total
Usuarios	...	Throughput	NumberCreated	Total
				552.0000
			NumberDestroyed	Total
				199.0000

Figura 20. Se observa la cantidad de usuarios generados en 1 hora en hora pico.

Al analizar los resultados obtenidos se identificó que los valores generados por el modelo presentan un factor de escala de 10 respecto a los valores reales, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Realidad} &= 59 \text{ usuarios} \\ \text{Simio} &= 552 \text{ usuarios} \\ \text{Usuarios}_{\text{factor de 10}} &= 59 * 10 \\ \text{Usuarios}_{\text{factor de 10}} &= \mathbf{590} \end{aligned}$$

$$\%Error_{1 \text{ hr}} = \left| \frac{552 - 590}{590} * 100 \right|$$

$$\%Error_{19 \text{ hr}} = \mathbf{6.88\%}$$

Considerando este factor, los resultados del modelo son consistentes con los valores reales. Por esta razón, el análisis de las horas pico se realizó tomando como referencia una hora de simulación, la cual representa una fracción representativa de las 19 horas totales de operación de la línea

- Usuarios generados en hora valle

En este caso se correrá el modelo tanto en 19 horas como 1 hora, para comprobar que los resultados obtenidos sean acordes a la realidad.

Como se observa en la Figura 21, se puede ver que en 19 horas se generaron 3217 usuarios y en la realidad se generan 3589.

Para la Figura 22 se observa que se generaron 179 usuarios, cifra correspondiente a 189 usuarios por hora de la realidad.

Como se puede observar, hay una variación mínima para ambos casos, esta se debe a la cantidad de veces que se manipuló el número original de la afluencia por día de usuarios (Tabla 15), entonces se puede decir que se obtuvieron resultados cercanos a la realidad.

A continuación, se muestra el porcentaje de error por cada simulación, tanto 19 horas como 1 hora:

$$\begin{aligned} \%Error_{19 \text{ hr}} &= \left| \frac{3217 - 3588}{3588} * 100 \right| \\ \%Error_{19 \text{ hr}} &= \mathbf{10.34\%} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \%Error_{1 \text{ hr}} &= \left| \frac{179 - 189}{189} * 100 \right| \\ \%Error_{1 \text{ hr}} &= \mathbf{5.29\%} \end{aligned}$$

Object Name	Category	Data Item	Statistic	Average Total
Usuarios	Throughput	NumberCreated	Total	3,217.0000
		NumberDestroyed	Total	2,004.0000

Figura 21. Se observa la cantidad de usuarios generados en 19 horas en hora valle.

Object Name	Category	Data Item	Statistic	Average Total
Usuarios	Throughput	NumberCreated	Total	179.0000
		NumberDestroyed	Total	111.0000

Figura 22. Se observa la cantidad de usuarios generados en 1 hora en hora valle.

4.4. Escenarios de simulación para identificar cuellos de botella

Para el análisis de escenarios de simulación se buscaron aquellas estaciones con mayor potencial para generar cuellos de botella en un futuro, esto se da debido a diversas variables, como el aumento de la población, creación de centros comerciales, hospitales, centros de recreación o lugares que provoquen un aumento en la afluencia en estas estaciones.

Este estudio se realizó en las estaciones con menos afluencia: Deportivo 18 de Marzo, Potrero, Tlatelolco, Juárez, Niños Héroes, Etiopia, Eugenia, División del Norte y Viveros. Para poder analizar estas estaciones se realizó un análisis de escenarios en Simio en el cual se hicieron 5 escenarios, estos escenarios consisten en cambiar el tiempo en el que se generan las entidades, que representan a los usuarios, en los elementos *Source* de cada estación mencionada anteriormente:

Tabla 22. Rangos de tiempo de generación de usuarios aplicados por escenario.

Escenario	Rango de tiempo utilizado
1	Tiempo original
2	Tiempos menores a 3,000 segundos
3	Tiempos mayores a 60,000 segundos
4	Se uso el mismo tiempo en todas las estaciones
5	Tiempos menores a 600 segundos

Al simular los 5 escenarios al menos 10 veces con distintos valores en los rangos mencionados en la Tabla 22 se pudo observar que, si el tiempo de generación de usuarios es mayor a 6,000 segundos, este representa resultados insignificantes, es decir, casi no varía la cantidad total de usuarios generados con los destruidos. En cambio, cuando se usa un tiempo de generación de usuarios menor a 600 segundos, los resultados son muy significativos, mientras más pequeño sea el tiempo, más variación se tendrá, debido a que se generan usuarios cada vez más rápido.

Como se puede observar en las Figuras 23 y 24, los escenarios 1, 3 y 4 son los que se mantienen constantes, esto es porque los tiempos ingresados fueron mayores a 6,000 segundos. Mientras que en el escenario 2 y 5 cambia radicalmente debido a que en el mismo tiempo se crean muchos más usuarios.

Object Name		Data Item	Scenario1			Scenario2			Scenario3			Scenario4			Scenario5		
			Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...
Usuarios	...	NumberCreated	84.0000	84	84	110.0000	11	11	83.0000	83	83	83.0000	83	83	318.0000	31	31
		NumberDestroyed	80.0000	80	80	99.0000	99	99	79.0000	79	79	79.0000	79	79	202.0000	20	20
Salen18deMarzo	...	NumberEntered	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	12.0000	12	12
		NumberExited	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	12.0000	12	12
SalenDivisiondelNorte	...	NumberEntered	1.0000	1,1	1,1	3.0000	3,1	3,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	10.0000	10	10
		NumberExited	1.0000	1,1	1,1	3.0000	3,1	3,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	10.0000	10	10
SalenEtiopia	...	NumberEntered	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12
		NumberExited	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12
SalenEugenia	...	NumberEntered	1.0000	1,1	1,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	13.0000	13	13
		NumberExited	1.0000	1,1	1,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	13.0000	13	13
SalenJuarez	...	NumberEntered	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1
		NumberExited	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1
SalenNiñosHeroes	...	NumberEntered	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1
		NumberExited	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1	4.0000	4,1	4,1
SalenPotrero	...	NumberEntered	1.0000	1,1	1,1	6.0000	6,1	6,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	19.0000	19	19
		NumberExited	1.0000	1,1	1,1	6.0000	6,1	6,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	19.0000	19	19
SalenTlatelolco	...	NumberEntered	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1
		NumberExited	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1	9.0000	9,1	9,1
SalenViveros	...	NumberEntered	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1
		NumberExited	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1	2.0000	2,1	2,1

Figura 23. Resultados al simular 5 escenarios en horas valle.

Object Name		Data Item	Scenario1			Scenario2			Scenario3			Scenario4			Scenario5		
			Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...
Usuarios	...	NumberCreated	505.0000	50	50	532.0000	53	53	505.0000	50	50	505.0000	50	50	725.0000	72	72
		NumberDestroyed	273.0000	27	27	296.0000	29	29	273.0000	27	27	273.0000	27	27	471.0000	47	47
Salen18deMarzo	...	NumberEntered	58.0000	58	58	58.0000	58	58	58.0000	58	58	58.0000	58	58	58.0000	58	58
		NumberExited	58.0000	58	58	58.0000	58	58	58.0000	58	58	58.0000	58	58	58.0000	58	58
SalenDivisiondelNorte	...	NumberEntered	1.0000	1,1	1,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	10.0000	10	10
		NumberExited	1.0000	1,1	1,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	10.0000	10	10
SalenEtiopia	...	NumberEntered	37.0000	37	37	37.0000	37	37	37.0000	37	37	37.0000	37	37	37.0000	37	37
		NumberExited	37.0000	37	37	37.0000	37	37	37.0000	37	37	37.0000	37	37	37.0000	37	37
SalenEugenia	...	NumberEntered	1.0000	1,1	1,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	30.0000	30	30
		NumberExited	1.0000	1,1	1,1	2.0000	2,1	2,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	30.0000	30	30
SalenJuarez	...	NumberEntered	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27
		NumberExited	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27
SalenNiñosHeroes	...	NumberEntered	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12
		NumberExited	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12	12.0000	12	12
SalenPotrero	...	NumberEntered	1.0000	1,1	1,1	6.0000	6,1	6,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	56.0000	56	56
		NumberExited	1.0000	1,1	1,1	6.0000	6,1	6,1	1.0000	1,1	1,1	1.0000	1,1	1,1	56.0000	56	56
SalenTlatelolco	...	NumberEntered	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	28.0000	28	28
		NumberExited	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	27.0000	27	27	28.0000	28	28
SalenViveros	...	NumberEntered	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1
		NumberExited	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1	6.0000	6,1	6,1

Figura 24. Resultados al simular 5 escenarios en horas pico.

Para identificar las estaciones con mayor potencial de generar cuellos de botella a futuro, se analizaron los resultados obtenidos en los cinco escenarios simulados. Cada escenario se ejecutó al menos 10 veces con distintos valores de tiempo de generación de usuarios, correspondientes a los rangos definidos en la Tabla 22. Con base en estos resultados, se clasificaron las estaciones en dos categorías: aquellas que presentaron cambios significativos en el número de usuarios generados al variar el tiempo de generación, lo que indica que son sensibles al incremento de la afluencia, y aquellas que no presentaron cambios relevantes independientemente del escenario simulado. Esta clasificación se resume en la Tabla 23.

Tabla 23. Cuadro de comparación de los cambios en estaciones.

Hora pico		Hora valle	
Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio
18 de Marzo	División del Norte	Etiopia	18 de Marzo
Juarez	Etiopia	Juarez	División del Norte
Niños Héroes	Eugenia	Niños Héroes	Eugenia

Tlatelolco	Potrero	Tlatelolco	Potrero
Viveros		Viveros	

Con base en los resultados de la Tabla 23 se puede concluir lo siguiente:

- **Estaciones potenciales de generar cuellos de botella**

Son aquellas que presentaron cambios significativos en al menos uno de los escenarios simulados, tanto en hora pico como en hora valle. Esto indica que las estaciones son sensibles al incremento de la afluencia de usuarios, por lo que un aumento en la demanda podría generar retrasos y acumulaciones en los andenes. Las estaciones que presentaron esta condición en ambos tipos de horario son:

- Eugenia
- Potrero
- División del Norte

- **Estaciones sin riesgo de generar cuellos de botella**

Son aquellas que no presentaron cambios significativos en ninguno de los escenarios simulados, independientemente del valor de tiempo utilizado. Esto indica que, aun ante un incremento en la afluencia de usuarios, estas estaciones no representan un punto crítico para la operación de la línea. Las estaciones que presentaron esta condición son:

- Juárez
- Niños Héroes
- Tlatelolco
- Viveros

Para conocer las estaciones actuales que provocan cuellos de botella se utiliza la misma lógica anterior, aplicando 5 distintos escenarios a las estaciones con mayor afluencia: La Raza, Guerrero, Hidalgo, Balderas, Centro Médico, Hospital General, Zapata, Coyoacán y Quevedo. Se obtuvieron los siguientes resultados:

A continuación, en la Figura 25 y 26 se pueden observar los 5 escenarios simulados para las estaciones anteriormente mencionadas, estos escenarios fueron simulados tanto en hora pico como en hora valle, al observar los resultados se puede identificar aquellas estaciones que presentan variaciones en cada escenario.

Object Name	Data Item	Scenario1			Scenario2			Scenario3			Scenario4			Scenario5		
		Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...
Usuarios	NumberCreated	37.0000	37	37.0	63.0000	63	63.0	36.0000	36	36.0	36.0000	36	36.0	247.0000	24	24.0
	NumberDestroyed	37.0000	37	37.0	61.0000	61	61.0	36.0000	36	36.0	36.0000	36	36.0	142.0000	14	14.0
SalenBalderas	NumberEntered	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0
SalenCentroMedico	NumberEntered	1.0000	1	1.0	4.0000	4	4.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	4.0000	4	4.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
SalenCoyoacan	NumberEntered	1.0000	1	1.0	5.0000	5	5.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	11.0000	11	11.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	5.0000	5	5.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	11.0000	11	11.0
SalenGuerrero	NumberEntered	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
	NumberExited	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
SalenHidalgo	NumberEntered	1.0000	1	1.0	3.0000	3	3.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	3.0000	3	3.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
SalenHospitalGeneral	NumberEntered	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
	NumberExited	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
SalenLaRaza	NumberEntered	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
	NumberExited	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
SalenQuevedo	NumberEntered	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
	NumberExited	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
SalenZapata	NumberEntered	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
	NumberExited	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0

Figura 25. Resultados al simular 5 escenarios en horas valle.

Object Name	Data Item	Scenario1			Scenario2			Scenario3			Scenario4			Scenario5		
		Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...	Average	...	...
Usuarios	NumberCreated	83.0000	83	83.0	107.0000	10	10.0	79.0000	79	79.0	79.0000	79	79.0	242.0000	24	24.0
	NumberDestroyed	76.0000	76	76.0	98.0000	98	98.0	72.0000	72	72.0	72.0000	72	72.0	187.0000	18	18.0
SalenBalderas	NumberEntered	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
	NumberExited	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0	2.0000	2	2.0
SalenCentroMedico	NumberEntered	1.0000	1	1.0	3.0000	3	3.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	3.0000	3	3.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
SalenCoyoacan	NumberEntered	1.0000	1	1.0	4.0000	4	4.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	4.0000	4	4.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	8.0000	8	8.0
SalenGuerrero	NumberEntered	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0
	NumberExited	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0
SalenHidalgo	NumberEntered	1.0000	1	1.0	3.0000	3	3.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	14.0000	14	14.0
	NumberExited	1.0000	1	1.0	3.0000	3	3.0	1.0000	1	1.0	1.0000	1	1.0	14.0000	14	14.0
SalenHospitalGeneral	NumberEntered	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0
	NumberExited	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0
SalenLaRaza	NumberEntered	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0
	NumberExited	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0
SalenQuevedo	NumberEntered	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0
	NumberExited	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0	4.0000	4	4.0
SalenZapata	NumberEntered	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0
	NumberExited	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0	5.0000	5	5.0

Figura 26. Resultados al simular 5 escenarios en horas pico.

Una vez identificadas las estaciones potenciales a cambios (Figura 25 y 26) se realizó el siguiente cuadro comparativo el cual representa aquellas estaciones con cambios y sin cambios, dependiendo si el modelo corre en hora pico y hora valle:

Tabla 24. Cuadro de comparación de los cambios en estaciones.

Hora pico		Hora valle	
Sin cambio	Con cambio	Sin cambio	Con cambio
Balderas	Centro Médico	Balderas	Centro Médico
Guerrero	Coyoacán	Guerrero	Coyoacán
Hospital General	Hidalgo	Hospital General	Hidalgo
La Raza		La Raza	
Quevedo		Quevedo	

Con la Tabla 24 se puede concluir lo siguiente:

- **Estaciones que generan cuellos de botella**
 - Centro Médico
 - Coyoacán
 - Hidalgo
- **Estaciones que no generan cuellos de botella ni presentan riesgo a futuro**
 - Balderas
 - Guerrero
 - Hospital General
 - Quevedo

4.4.1. Simulación de diferentes escenarios con horas pico

Hay ocasiones que por la cantidad de demanda en el metro se presentan retrasos, entonces los trenes tardan más tiempo en salir hasta 6 minutos, esto es lo que se simulará a continuación.

- **Salida de trenes cada 6 minutos**

Como se puede apreciar en la Figura 27 en una hora solo se generaron 11 trenes y solo 5 llegaron a Universidad, mientras que se generaron 552 usuarios.

Object Type ▲	Object Name ▲ ▼	Data Source ▲	Category ▲ ▼	Data Item ▲	Statistic ▲	Average Total
ModelEntity	Tren	[Population]	Throughput	NumberCreated	Total	11.0000
				NumberDestroyed	Total	5.0000
	Usuarios	[Population]	Throughput	NumberCreated	Total	552.0000
				NumberDestroyed	Total	126.0000

Figura 27. Captura de pantalla de los resultados obtenidos cuando los trenes salen cada 6 minutos.

- **Salida de trenes cada 2 minutos**

En la Figura 28 se puede observar que al hacer que los trenes salgan de manera continua se generaran más, pero llegan más a Universidad, mientras que se siguen generando 552 usuarios.

Object Type ▲	Object Name ▲ ▼	Data Source ▲	Category ▲ ▼	Data Item ▲	Statistic ▲	Average Total
ModelEntity	Tren	[Population]	Throughput	NumberCreated	Total	31.0000
				NumberDestroyed	Total	12.0000
	Usuarios	[Population]	Throughput	NumberCreated	Total	552.0000
				NumberDestroyed	Total	254.0000

Figura 28. Captura de pantalla de los resultados obtenidos cuando los trenes salen cada 2 minutos.

Con base en los resultados obtenidos, bajo condiciones normales de operación sin considerar eventos externos como fallas eléctricas, accidentes u otros imprevistos, mantener un intervalo de salida de trenes no mayor a 6 minutos contribuiría a reducir la acumulación de usuarios en los andenes. Como se observó en las Figuras 27 y 28, al simular una frecuencia de salida de 6 minutos, únicamente se generaron 11 trenes en una hora, de los cuales solo 5 completaron el recorrido hasta la estación Universidad. En contraste, al reducir el intervalo a 2 minutos se

generaron 31 trenes, lo que resultó en una menor acumulación de usuarios y un mejor flujo del servicio.

Dado que uno de los principales factores que genera retrasos en la línea 3 es la acumulación excesiva de usuarios en los andenes, mantener una frecuencia de salida constante ayudaría a evitar que los trenes operen al límite de su capacidad, reduciendo así el efecto en cadena que provoca la sobresaturación del servicio. Sin embargo, es importante señalar que este escenario representa condiciones ideales de operación, por lo que en la práctica pueden presentarse factores adicionales que afecten el funcionamiento del sistema y que no fueron contemplados en el presente modelo.

4.4.2. Simulación de diferentes escenarios con horas valle

Durante las horas valle la afluencia de usuarios es considerablemente menor, por lo que el sistema opera sin presentar afectaciones relevantes en su funcionamiento. Dado que las condiciones más críticas para la operación de la línea 3 se presentan durante las horas pico, el análisis de escenarios se enfocó principalmente en este periodo. Cabe señalar que, con base en la investigación de campo realizada, se observó que cuando se presenta alguna falla operativa durante las horas valle, la acumulación de usuarios en los andenes puede provocar que el sistema transite hacia condiciones similares a las de hora pico, por lo que el análisis de escenarios de hora pico resulta representativo para ambos casos.

4.5. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos mediante el modelo de simulación permiten analizar el comportamiento de la línea 3 del STC Metro bajo distintas condiciones de demanda e identificar las estaciones críticas de su operación.

En cuanto a la validación del modelo, la cantidad de trenes generados en ambos escenarios (hora pico y hora valle) correspondió a los valores reales: 20 trenes por hora y 380 trenes en 19 horas de operación. Para los usuarios, el modelo presentó un error del 5.29% al correr el modelo una hora en horario valle y de 10.34% al correr el modelo durante 19 horas, en cambio al correr el modelo en horas pico durante una hora se presentó un error del 6.88%. Estos porcentajes confirman que el modelo es una representación acertada de la realidad.

Al simular condiciones de hora pico, el modelo evidenció la incapacidad del sistema para mantener un flujo continuo de usuarios durante todo el periodo de operación: aproximadamente a las 11 horas de funcionamiento, la acumulación de usuarios en los andenes superó el límite máximo del sistema, lo que obligó a detener la simulación. Este comportamiento no representa una falla del modelo, sino una réplica fiel de la saturación que experimenta la línea 3 durante sus horas de mayor demanda, consistente con la relación demanda-capacidad de 1.03 reportada por SEMOVI (2019) y con las 188 fallas registradas durante 2024.

Con respecto a la identificación de estaciones con cuellos de botella, el diseño experimental permitió distinguir dos grupos. El primer grupo corresponde a las estaciones que actualmente generan cuellos de botella: Centro Médico, Coyoacán e Hidalgo. Estas estaciones presentaron variaciones significativas en el flujo de usuarios ante cambios en los tiempos de generación,

tanto en hora pico como en hora valle, lo que indica que ya operan en condiciones de alta sensibilidad a incrementos de demanda. El segundo grupo corresponde a estaciones con riesgo potencial de generar cuellos de botella en el futuro: Eugenia, Potrero y División del Norte. Aunque actualmente su afluencia es menor, estas estaciones mostraron un comportamiento sensible al aumento de la demanda en al menos uno de los cinco escenarios simulados, lo que las posiciona como puntos de atención para la planeación operativa a mediano plazo. En contraste, estaciones como Balderas, Guerrero, Hospital General, Quevedo, Juárez, Niños Héroes, Tlatelolco y Viveros no presentaron cambios significativos en ninguno de los escenarios, lo que sugiere que su capacidad actual es suficiente para absorber incrementos moderados en la demanda.

En cuanto a la simulación de distintas frecuencias de salida de trenes, los resultados mostraron que reducir el intervalo de 6 a 2 minutos casi triplica la cantidad de trenes que completan el recorrido en una hora, pasando de 5 a 12 unidades, sin modificar el volumen de usuarios generados. Esto indica que la frecuencia de salida de trenes es la variable con mayor impacto sobre el desempeño del sistema: ante una misma demanda, una mayor frecuencia reduce la acumulación de usuarios en los andenes y mejora el flujo general del servicio.

Finalmente, durante las horas valle el sistema operó sin presentar saturación durante las 19 horas completas de simulación. Sin embargo, la investigación de campo evidenció que cuando se presenta una falla operativa en este horario, la acumulación de usuarios puede escalar rápidamente hacia condiciones similares a las de hora pico, lo que refuerza la importancia de mantener una frecuencia de servicio constante incluso fuera de los periodos de alta demanda.

4.5.1. Propuestas

Se espera que ante la presencia de incidentes o fallas operativas en la línea 3 se puedan implementar acciones que permitan apoyar a los usuarios a concluir su trayecto de manera segura y con el menor tiempo de espera posible. En particular, la definición e implementación de rutas alternas podría contribuir a reducir los tiempos de espera y minimizar las afectaciones en la movilidad de los usuarios.

Asimismo, se espera que el modelo de simulación desarrollado pueda ser utilizado como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, proporcionando información relevante que facilite la planeación y gestión del servicio en escenarios de alta afluencia o interrupciones en el sistema. De esta manera, el modelo podría ampliarse para evaluar distintas estrategias operativas, considerar la integración con otras rutas de transporte y analizar su impacto en la afluencia de usuarios, contribuyendo a la mejora continua del servicio.

Con base en los resultados obtenidos, se plantean las siguientes propuestas orientadas a mejorar la operación de la línea 3 del STC Metro.

La principal recomendación derivada de la simulación es mantener un intervalo de salida de trenes no mayor a 3 minutos durante los periodos de hora pico. Los resultados mostraron que aumentar este intervalo a 6 minutos reduce significativamente la cantidad de trenes que completan el recorrido, agravando la acumulación de usuarios en estaciones críticas. El modelo de simulación fue desarrollado considerando la operación de 54 trenes disponibles para la línea 3 del STC Metro, por lo que la recomendación no implica la adquisición de nuevos

trenes, sino la optimización de la operación de la flota existente. Si bien esta medida parece operativamente sencilla, su implementación requiere fortalecer las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo del parque vehicular y del sistema de pilotaje automático, con el fin de garantizar la disponibilidad de la flota y reducir retrasos asociados a fallas operativas. Debido a que la propuesta se basa en optimizar la operación de los recursos existentes y no contempla modificaciones importantes en la infraestructura ni la adquisición de nuevos trenes, los costos asociados se relacionan principalmente con el fortalecimiento de las actividades de mantenimiento y la gestión operativa.

Para las estaciones identificadas como puntos críticos actuales: Centro Médico, Coyoacán e Hidalgo, se recomienda evaluar la posibilidad de implementar sistemas de gestión de acceso en los andenes durante las horas de mayor demanda, con el objetivo de regular el flujo de usuarios y evitar que la acumulación en el andén retrase el cierre de puertas y, en consecuencia, el avance del tren. Esta medida, aunque de bajo costo operativo, podría tener un impacto positivo en la regularidad del servicio.

Para las estaciones con riesgo potencial: Eugenia, Potrero y División del Norte, se recomienda realizar un monitoreo periódico de la afluencia con el fin de anticipar incrementos sostenidos en la demanda que pudieran derivar en saturación. El modelo de simulación desarrollado puede emplearse directamente para este propósito, actualizando los parámetros de generación de usuarios conforme se disponga de datos más recientes.

Ante la presencia de fallas operativas, se propone definir e implementar protocolos de rutas alternas que permitan a los usuarios continuar su trayecto con el menor impacto posible. La integración de información en tiempo real sobre el estado del servicio, disponible a través de aplicaciones móviles o pantallas en las estaciones, contribuiría a redistribuir la demanda hacia otras líneas o modos de transporte durante las interrupciones.

Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

El presente trabajo tuvo como objetivo analizar el comportamiento operativo de la línea 3 del STC Metro bajo distintas condiciones de demanda mediante un modelo de simulación de eventos discretos desarrollado en el software Simio. Los resultados obtenidos permiten concluir que los objetivos planteados fueron alcanzados de manera satisfactoria.

El modelo logró representar la operación de la línea con un margen de error menor al 11%, tanto en la generación de trenes como en el flujo de usuarios, lo que confirma su validez como herramienta de análisis. La recolección de más de 2,000 datos en campo, distribuidos en distintos horarios y estaciones a lo largo de la línea, fue fundamental para garantizar que los parámetros del modelo reflejaran las condiciones reales de operación del sistema.

Los resultados de la simulación confirmaron que la línea 3 opera consistentemente al límite de su capacidad durante los periodos de hora pico, replicando en el modelo la saturación que se observa en la operación real. Este comportamiento es consistente con la relación demanda-capacidad de 1.03 reportada por la SEMOVI y con las 188 fallas registradas durante 2024, lo que refuerza la pertinencia del problema de investigación planteado.

A partir del diseño experimental se identificaron tres estaciones que actualmente generan cuellos de botella: Centro Médico, Coyoacán e Hidalgo. Adicionalmente, se detectaron tres estaciones con riesgo potencial de convertirse en puntos críticos en el futuro: Eugenia, Potrero y División del Norte. Estos hallazgos responden directamente a las preguntas de investigación planteadas y proporcionan información concreta para orientar decisiones operativas.

El análisis de distintas frecuencias de salida de trenes mostró que este es el parámetro con mayor impacto sobre el desempeño del sistema. Reducir el intervalo de salida de 6 a 2 minutos casi triplicó la cantidad de trenes que completaron el recorrido en una hora, lo que se traduce directamente en una reducción de la acumulación de usuarios en los andenes. Este resultado sugiere que mejoras en la regularidad del servicio, aunque no impliquen inversión en infraestructura, pueden tener un efecto significativo en la experiencia del usuario.

El cuarto objetivo, relativo a la simulación de escenarios de interrupción, fue abordado mediante el análisis de variaciones en la frecuencia de salida de trenes y el incremento de la afluencia en estaciones de baja demanda. Los resultados mostraron que incluso estaciones con demanda moderada pueden generar afectaciones importantes en la operación global de la línea cuando su flujo de usuarios aumenta de manera sostenida.

Como aportación principal es la formulación de un modelo de simulación realista que pueda servir como base para futuras investigaciones. Orientadas a la evaluación y propuestas de mejoras operativas. Dichas mejoras, aunque puedan ser pequeñas o graduales, tienen el potencial de generar un impacto significativo en la calidad del servicio del STC Metro.

5.2. Recomendaciones

En cuanto al trabajo futuro, se identifican las siguientes líneas de investigación que ampliarían el alcance y la utilidad del modelo desarrollado. En primer lugar, extender el modelo para incluir el recorrido en sentido inverso, de Universidad a Indios Verdes, lo cual permitiría analizar el comportamiento bidireccional de la línea y detectar asimetrías en la distribución de la demanda. En segundo lugar, se recomienda replicar la metodología en otras líneas del STC Metro con alta incidencia de fallas como la línea 1 o la línea 8, con el fin de generalizar los hallazgos y construir una herramienta de análisis a escala de red.

Finalmente, se recomienda integrar el modelo con datos en tiempo real del STC Metro, para poder implementar y definir rutas alternas que permitan a los usuarios continuar su trayecto con el menor impacto posible. La integración de información en tiempo real sobre el estado del servicio, disponible a través de aplicaciones móviles o páginas web, contribuirá a redistribuir la demanda hacia otras líneas o modos de transporte durante las interrupciones.

Bibliografía

Aguilar, I. & Heredia, J. (2013). Simuladores y laboratorios virtuales para Ingeniería en Computación. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 10.

Alcaide Fernández, N. (2024). *Modelo de simulación de líneas 5 y 6 del metro de Madrid* (Trabajo de fin de grado, UPM). <https://oa.upm.es/82650/>

Alvarado, R. (2022). Computer simulations as scientific instruments. *Foundations of Science*, 27, 1183–1205. <https://doi.org/10.1007/s10699-021-09812-2>

AnyLogic Company. (s.f.). *AnyLogic simulation software*. <https://www.anylogic.com>

Banerjee, S., & Kalavathy, S. (2020). *Simulation and modelling*. Madhya Pradesh Bhoj (Open) University. https://mpbou.edu.in/uploads/files/PAPER-07_SIMULATION_AND_MODELING.pdf

Bosque Sendra, J. (2001). Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). *El campo de las ciencias y las artes*, 137–174.

Bosque-Sendra, J., Delgado, M., & Palm, F. (2006). Un nuevo modelo para localizar instalaciones no deseables: ventajas derivadas de la integración de modelos de localización-asignación y SIG. *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*, (39), 53–68.

Buzai, D., & Baxendale, A. (2008). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: Análisis espacial de escuelas EGB en la ciudad de Luján. *Revista Universitaria de Geografía*, 17, 233–254.

Chen, S., Liu, G., Gao, S., Li, J., & Wu, J. (2025). A discrete-event simulation system for estimating passenger flow in urban rail transit. *Promet – Traffic & Transportation*, 37(2). <https://doi.org/10.7307/ptt.v37i2.768>

Duarte, J. & Fernández, F. (2005). La simulación por computador en investigación y desarrollo. *Tecnura*, 8(16), 106–114.

Durán, J. M. (2020). What is a simulation model? *Minds and Machines*, 30(3), 301–323. <https://doi.org/10.1007/s11023-020-09520-z>

El Financiero. (2024, diciembre 18). Línea 3, 6 y 8 del Metro CDMX: "Son un asco", usuarios esperan hasta 15 minutos. <https://www.elfinanciero.com.mx/cdmx/2024/12/18/linea-3-6-y-8-del-metro-cdmx-son-un-asco-usuarios-esperan-hasta-15-minutos/>

FlexSim Software Products, Inc. (s.f.). *FlexSim simulation software*. <https://www.flexsim.com>

Gardt, S., Zuniga, C., & Wellens, A. (2024). Modeling the implementation of technology in a passenger security screening checkpoint at Amsterdam Airport Schiphol. *Proceedings of the 36th European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2024)*, 022. <https://doi.org/10.46354/i3m.2024.emss.022>

García, E., García, R., & Cárdenas, L. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel* (2.ª ed.). Pearson.

García, J. A., & Flores de la Mota, I. (2012). Simulation of the operation of a metro station. *Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium (EMSS)*, 309–314. https://www.msc-les.org/proceedings/emss/2012/EMSS2012_309.pdf

García, K. (2020, marzo 17). ¿Cuánta gente viaja en metro en la Ciudad de México? *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/politica/Cuanta-gente-viaja-en-metro-en-la-Ciudad-de-Mexico-20200317-0069.html>

Gobierno de la Ciudad de México. (2025). *Afluencia diaria del Metro CDMX* [Conjunto de datos]. Portal de Datos Abiertos de la CDMX. <https://datos.cdmx.gob.mx/dataset/afluencia-diaria-del-metro-cdmx/resource/0e8ffe58-28bb-4dde-afcd-e5f5b4de4ccb>

Hoornweg, D., & Pope, K. (2017). Population predictions for the world's largest cities in the 21st century. *Environment and Urbanization*, 29(1), 195–216. <https://doi.org/10.1177/0956247816663557>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Encuesta Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México 2017: Resultados*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/eod/2017/doc/resultados_eod_2017.pdf

López, V. (2018). *Localización óptima de las estaciones de bomberos para el municipio de Toluca, mediante un modelo de localización-asignación con Sistemas de Información Geográfica* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma del Estado de México.

Marquéz, J., Sanmartín, P., & David, J. (2012). *Modelado y simulación de redes de computadores*. Editorial Universidad del Norte.

Mendoza Flores, F. J. (2006). *Simulación del Sistema de Transporte Colectivo (METRO)* (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México). Repositorio Universitario Digital. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000606887/3/0606887.pdf>

Metrobús. (2025). *Metrobús*. Gobierno de la Ciudad de México. <https://metrobus.cdmx.gob.mx/>

Metro CDMX. (2022). A casi 53 años de inicio de servicio, la Línea 1 inicia cuenta regresiva para su modernización. <https://metro.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/casi-53-anos-de-inicio-de-servicio-la-linea-1-inicia-cuenta-regresiva-para-su-modernizacion>

Metro CDMX. (2026). *Metro CDMX*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/estacion-por-uso-y-tipo>

Moreno Jiménez, A. (2004). Modelos de localización óptima de instalaciones y equipamientos. En J. Bosque & A. Moreno (Eds.), *Sistemas de información geográfica y localización de instalaciones y equipamientos* (pp. XX–XX). RA-MA.

Movimentistas. (2020). *Transporte público de la CDMX 2020*. Sociedad del Movimiento. <https://movimentistas.com/sociedad-del-movimiento/transporte-publico-cdmx/>

Pérez, O. (2023). *Modelos de localización-asignación de servicios en Sistemas de Información Geográfica: incorporando el dinamismo de la distribución de la demanda y del funcionamiento de las redes* (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid.

Pérez Silva, A. M. (2024). *Apuntes de la materia Simulación* [Material de clase no publicado]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

ProModel Corporation. (s.f.). *ProModel: Simulación con animación y optimización*. <https://promodel.com.mx/promodel>

Ramírez Javier, G. M. (2016). *Análisis de la demanda de la Línea B del metro utilizando optimización y simulación* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México). Repositorio UNAM. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000750178/3/0750178.pdf>

Rangel, D. (2024). ¿Cuál es la hora pico del Metro CDMX? *Plumas Atómicas*. <https://plumasatomicas.com/noticias/cdmx/cual-es-la-hora-pico-del-metro-cdmx/>

Rockwell Automation. (s.f.). *Arena simulation software*. <https://www.rockwellautomation.com/>

Sánchez, F. (2024, diciembre 19). Líneas 3 y 8 del Metro CDMX registran alta afluencia, usuarios esperan hasta 20 minutos para abordar. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/lineas-3-y-8-del-metro-cdmx-registran-alta-afluencia-usuarios-esperan-hasta-20-minutos-para-abordar/>

Sarabia, D. (2025). El Metro CDMX suspendió el servicio y desalojó a usuarios en 872 ocasiones en 2024, por fallas en el sistema. *Yahoo Noticias*. <https://es-us.noticias.yahoo.com/metro-cdmx-suspendi%C3%B3-servicio-desaloj%C3%B3-000010721.html>

Schmaranzer, D., Braune, R., & Doerner, K. F. (2016). *A discrete event simulation model of the Viennese subway system for decision support and strategic planning*. AnyLogic Simulation Software. <https://www.anylogic.com/resources/articles/a-discrete-event-simulation-model-of-the-viennese-subway-system-for-decision-support/>

Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México. (2023). *Diagnóstico técnico de movilidad del Programa Integral de Movilidad 2020-2024*. <https://semovi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/diagnostico-tecnico-de-movilidad-pim.pdf>

Secretaría de Obras y Servicios de la CDMX. (2020). *Reabre Gobierno de la Ciudad de México Línea 12 del Metro segura y supervisada*. <https://www.obras.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/reabre-gobierno-de-la-ciudad-de-mexico-linea-12-del-metro-segura-y-supervisada>

Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México. (2025). *Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México*. <https://www.ste.cdmx.gob.mx/>

Simio LLC. (s.f.). *Simio simulation and scheduling software*. <https://www.simio.com>

Sistema de Transporte Colectivo (STC). (2019, mayo 15). *Informe de operaciones del STC Metro*.

https://metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/sintesis/stc/2019/mayo/15may19_stc.pdf

Sistema de Transporte Colectivo (STC). (2024). *Indicadores de operación*. <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/indicadores-de-operacion>

Sistema de Transporte Colectivo. (s.f.). *Afluencia por tipo de acceso*. <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/afluencia-por-tipo-de-acceso>

Sistema de Transporte Colectivo. (s.f.). *Estaciones de mayor afluencia*. <https://metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/estaciones-de-mayor-afluencia>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2018). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/>

Vera Morales, A. E. (2017). *Un modelo de simulación para mejorar los mecanismos de evacuación en el STC Metro: estación Pino Suárez* (Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México). <https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2017/noviembre/0767774/0767774.pdf>

Anexo A

En las siguientes Tablas se pueden ver los 2,000 datos en distintos días y horarios que se pudieron recolectar de la línea 3 del Metro, las Tablas se dividen por cada horario, ya sea valle o pico a lo largo del día.

Tabla 1. Datos recolectados en un horario de 5:00 a 5:59 horas.

	Hora	05:25:00 a. m.	05:07:00 a. m.	05:25:00 a. m.	05:11:00 a. m.
	Día	20/05/2025	21/11/2025	20/05/2025	25/11/2025
	Indios Verdes				
Arranque		0.08	0.09		0.19
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo	3.11	3.55	3.3	3.14
Ascenso y Descenso		0.14	0.13	0.14	0.15
Arranque		0.07	0.05	0.15	0.06
Tiempo próxima estación	Potrero	2.06	2.35	2.35	2.11
Ascenso y Descenso		0.12	0.13	0.06	0.14
Arranque		0.06	0.08	0.34	0.14
Tiempo próxima estación	La Raza	1.44	1.45	2.13	1.43
Ascenso y Descenso		0.13	0.15	0.04	0.11
Arranque		0.14	0.05	0.26	0.25
Tiempo próxima estación	Tlatelolco	2.14	2.14	2.09	2.09
Ascenso y Descenso		0.11	0.13	0.06	0.12
Arranque		0.04	0.05	0.13	0.05
Tiempo próxima estación	Guerrero	1.35	1.37	1.25	1.38
Ascenso y Descenso		0.15	0.31	0.04	0.14
Arranque		0.06	0.08	0.18	0.06
Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.13	1.05	1.11	1.09
Ascenso y Descenso		0.2	0.2	0.02	0.15
Arranque		0.04	0.07	0.23	0.08
Tiempo próxima estación	Juarez	0.45	0.5	1.19	0.46

Ascenso y Descenso		0.11	0.13	0.06	0.1
Arranque		0.04	0.05	0.17	0.13
Tiempo próxima estación	Balderas	1.19	1.2	2.29	1.14
Ascenso y Descenso		0.14	0.16	0.13	0.15
Arranque		0.06	0.07	0.3	0.06
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.12	1.14	1.1	1.11
Ascenso y Descenso		0.11	0.14	0.06	0.1
Arranque		0.05	0.04	0.24	0.06
Tiempo próxima estación	Hospital General	1.06	1.05	1.06	1.05
Ascenso y Descenso		0.12	0.14	0.06	0.27
Arranque		0.04	0.05	0.17	0.05
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.16	1.17	1.15	1.16
Ascenso y Descenso		0.16	0.17	0.05	0.23
Arranque		0.06	0.05	0.21	0.09
Tiempo próxima estación	Etiopia	1.37	2.01	1.56	1.35
Ascenso y Descenso		0.11	0.14	0.05	0.16
Arranque		0.06	0.05	0.21	0.08
Tiempo próxima estación	Eugenia	1.24	1.25	1.25	1.24
Ascenso y Descenso		0.09	0.14	0.06	0.14
Arranque		0.05	0.05	0.13	0.07
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.44	1.14	1.1	1.15
Ascenso y Descenso		0.11	0.15	0.06	0.13
Arranque		0.05	0.04	0.19	0.07
Tiempo próxima estación	Zapata	1.19	1.20	1.2	1.16
Ascenso y Descenso		0.17	0.18	0.08	0.21
Arranque		0.04	0.05	0.21	0.06
Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.41	1.40	1.49	1.36
Ascenso y Descenso		0.11	0.14	0.05	0.14
Arranque		0.05	0.05	0.13	0.1

Tiempo próxima estación	Viveros	1.24	1.24	1.28	1.2
Ascenso y Descenso		0.13	0.16	0.04	0.16
Arranque		0.05	0.04	0.43	0.05
Tiempo próxima estación	Quevedo	1.17	1.26	1.23	1.24
Ascenso y Descenso		0.13	0.16	0.06	0.19
Arranque		0.04	0.05	0.16	0.09
Tiempo próxima estación	Copilco	1.57	1.51	2.03	1.46
Ascenso y Descenso		0.13	3.4	0.15	0.2
Arranque		0.03	0.05	0.17	0.08
Tiempo próxima estación	Universidad	3.2	2.59	2.28	2.41
Arranque				0.08	

Tabla 2. Datos recolectados en un horario de 6:00 a 8:59 horas.

	Hora	05:50:00 a. m.	06:00:00 a. m.	06:02:00 a. m.	05:37:00 a. m.	07:22:00 a. m.	06:30:00 a. m.
	Día	21/11/2025	25/11/2025	23/05/2025	21/04/2025	11/06/2025	04/08/2025
	Indios Verdes						
Arranque				0.11	0.12	0.05	0.32
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo	3.42	6.16	3.26	1.32	2.49	3.45
Ascenso y Descenso		0.08	0.17	1.08	0.08	0.18	0.13
Arranque		0.2	0.48	0.06	0.06	0.03	0.51
Tiempo próxima estación	Potrero	3.32	2.41	2.48	1.03	1.57	1.57
Ascenso y Descenso		0.07	0.06	0.2	0.12	0.11	0.16
Arranque		1.14	11.3	0.14	0.07	0.03	0.23
Tiempo próxima estación	La Raza	1.33	7.35	1.45	2.11	1.46	1.47
Ascenso y Descenso		0.05	0.06	0.13	0.07	1.13	0.19
Arranque		0.17	1.38	0.07	0.06	0.11	0.27
Tiempo próxima estación	Tlatelolco	1.59	2	2.12	1.35	2.2	2.16
Ascenso y Descenso		0.06	0.08	0.18	1.32	0.28	0.15

Arranque		0.12	3.08	0.12	0.06	0.03	0.12
Tiempo próxima estación	Guerrero	1.27	1.28	1.56	1.13	1.35	1.37
Ascenso y Descenso		0.04	0.06	0.26	0.41	0.17	0.29
Arranque		0.52	1.04	0.07	0.04	0.18	0.24
Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.09	1.11	1.12	2.42	1.14	1.17
Ascenso y Descenso		0.05	0.05	0.19	0.09	0.21	0.21
Arranque		0.16	0.51	0.15	0.1	0.04	0.16
Tiempo próxima estación	Juarez	0.54	0.44	0.48	1.46	0.49	0.5
Ascenso y Descenso		0.03	0.07	0.16	0.08	0.09	1.55
Arranque		0.35	8.5	0.04	0.06	0.02	0.06
Tiempo próxima estación	Balderas	1.19	1.09	1.12	1.12	1.21	1.23
Ascenso y Descenso		0.09	0.07	0.18	2.09	3.07	0.19
Arranque		0.11	1.38	0.07	0.05	0.03	0.13
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.06	1.06	1.13	1.09	1.15	1.15
Ascenso y Descenso		0.05	0.09	0.15	0.08	0.11	0.27
Arranque		1.32	0.16	0.04	0.04	0.08	0.13
Tiempo próxima estación	Hospital General	1.04	1.05	1.04	1.14	1.04	1.05
Ascenso y Descenso		0.08	0.17	0.19	0.14	0.14	0.12
Arranque		0.11	0.13	0.04	0.1	0.04	0.05
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.21	1.18	1.12	1.31	1.12	1.2
Ascenso y Descenso		0.08	0.07	0.18	0.08	0.25	0.22
Arranque		0.16	0.44	0.04	0.07	0.1	0.06
Tiempo próxima estación	Etiopia	1.52	1.53	1.32	1.23	1.34	1.41
Ascenso y Descenso		0.06	0.07	0.12	0.07	0.13	2.06
Arranque		0.12	0.23	0.23	0.04	0.09	0.08
Tiempo próxima estación	Eugenia	1.2	1.2	1.36	1.12	1.27	2.01
Ascenso y Descenso		0.06	0.06	0.12	0.07	0.11	0.14
Arranque		0.15	1.06	0.13	0.04	0.03	0.05
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.05	1.09	1.14	1.19	1.14	1.15

Ascenso y Descenso		0.06	0.2	0.25	0.12	0.09	4.12
Arranque		0.17	0.15	0.05	0.15	0.03	0.06
Tiempo próxima estación	Zapata	1.13	1.16	1.18	1.41	1.15	1.21
Ascenso y Descenso		0.08	0.07	0.16	0.08	0.20	0.27
Arranque		0.25	1.1	0.05	0.06	0.02	0.10
Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.49	1.4	1.46	1.30	1.42	1.43
Ascenso y Descenso		0.09	0.07	2.13	1.35	2.17	0.14
Arranque		1.04	0.56	0.07	0.04	0.02	0.06
Tiempo próxima estación	Viveros	1.24	1.26	1.24	1.22	1.26	1.31
Ascenso y Descenso		0.03	0.08	0.38	0.12	0.22	0.23
Arranque		0.12	0.24	0.07	0.05	0.02	0.04
Tiempo próxima estación	Quevedo	1.14	1.2	1.27	1.49	1.27	1.25
Ascenso y Descenso		0.05	0.08	0.44	0.14	2.36	0.28
Arranque		0.16	0.45	0.06	0.05	0.04	0.07
Tiempo próxima estación	Copilco	1.56	1.56	1.5	8	2.11	1.55
Ascenso y Descenso		0.02	0.17	0.2		0.24	0.23
Arranque		0.35	0.45	0.05		0.05	0.09
Tiempo próxima estación	Universidad	2.3	2.43	3.11		2.34	2.41
Arranque		0.05	0.11				

Tabla 3. Datos recolectados en un horario de 9:00 a 11:59 horas.

	Hora	10:14:00 a. m.	09:14:00 a. m.	10:59:00 a. m.	10:10:00 a. m.	09:14:00 a. m.
	Día	27/11/2025	11/04/2025	27/11/2025	29/11/2025	29/11/2025
	Indios Verdes					
Arranque		0.06			0.06	
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo	2.4	3.07	2.5	3.55	4.02
Ascenso y Descenso		0.12	0.15	0.03	0.13	0.03
Arranque		0.04	0.19	0.13	0.03	0.18
Tiempo próxima estación	Potrero	1.5	2.01	1.48	2.23	3

Ascenso y Descenso		0.11	0.06	0.04	0.14	0.03
Arranque		0.08	0.1	0.1	0.05	0.48
Tiempo próxima estación	La Raza	1.5	1.4	1.39	1.49	3.08
Ascenso y Descenso		0.11	0.04	0.03	0.35	0.1
Arranque		0.03	0.25	0.1	0.05	2.23
Tiempo próxima estación	Tlatelolco	2.19	2.03	1.57	2.11	6.17
Ascenso y Descenso		0.19	0.05	0.04	0.14	0.09
Arranque		0.03	0.28	0.49	0.16	0.45
Tiempo próxima estación	Guerrero	1.47	1.14	1.26	1.33	4.09
Ascenso y Descenso		0.12	0.34	0.04	0.2	0.05
Arranque		0.04	1.03	1.26	0.05	0.3
Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.24	1.12	1.1	1.08	1.13
Ascenso y Descenso		0.25	0.06	0.09	0.18	0.03
Arranque		0.04	1.22	0.14	0.05	0.19
Tiempo próxima estación	Juarez	0.52	0.45	0.43	0.45	0.45
Ascenso y Descenso		1.39	0.22	0.04	0.16	0.05
Arranque		0.04	1.05	0.12	0.05	0.23
Tiempo próxima estación	Balderas	1.38	1.09	1.08	1.28	1.09
Ascenso y Descenso		0.54	0.07	0.03	4.05	0.04
Arranque		0.03	5.12	0.12	0.1	0.15
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.24	1.06	1.05	1.19	1.07
Ascenso y Descenso		0.11	0.06	0.05	2	0.04
Arranque		0.04	0.16	0.12	0.05	0.11
Tiempo próxima estación	Hospital General	1.14	1.02	1.03	1.07	1.07
Ascenso y Descenso		0.11	0.06	0.05	0.17	0.04
Arranque		0.03	0.12	0.11	0.06	1.19
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.22	1.39	1.1	1.15	1.14
Ascenso y Descenso		0.48	0.05	0.05	0.31	0.04
Arranque		0.03	0.16	0.41	0.04	0.13

Tiempo próxima estación	Etiopia	1.48	1.56	1.51	1.33	1.53
Ascenso y Descenso		0.11	0.04	0.06	0.24	0.03
Arranque		0.03	0.13	1.47	0.05	0.13
Tiempo próxima estación	Eugenia	1.38	1.25	1.34	1.22	1.21
Ascenso y Descenso		0.08	0.05	0.04	0.22	0.04
Arranque		0.04	0.24	0.08	0.04	0.4
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.26	1.07	1.05	1.12	1.07
Ascenso y Descenso		0.12	0.06	0.03	0.2	0.05
Arranque		0.04	1.11	0.11	0.04	0.16
Tiempo próxima estación	Zapata	1.31	1.14	1.15	1.15	1.17
Ascenso y Descenso		0.17	0.05	0.03	0.27	0.07
Arranque		0.04	0.32	0.15	0.06	0.19
Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.58	1.38	1.46	1.53	1.5
Ascenso y Descenso		0.1	0.05	0.05	0.21	0.09
Arranque		0.02	0.11	0.09	0.05	0.17
Tiempo próxima estación	Viveros	1.4	1.25	1.24	1.2	1.26
Ascenso y Descenso		0.1	0.05	0.03	0.14	0.03
Arranque		0.03	0.13	0.11	0.06	0.13
Tiempo próxima estación	Quevedo	1.36	1.22	1.14	1.23	1.18
Ascenso y Descenso		0.1	0.05	0.04	0.2	0.1
Arranque		0.02	0.17	0.1	0.04	0.12
Tiempo próxima estación	Copilco	2.05	1.56	1.53	1.42	1.55
Ascenso y Descenso		0.1	0.06	0.03	1.02	0.09
Arranque		0.03	0.21	0.18	0.03	0.14
Tiempo próxima estación	Universidad	2.5	2.27	1.38	2.42	2.21
Arranque				0.11		0.05

Tabla 4. Datos recolectados en un horario de 12:00 a 14:59 horas.

	Hora	12:18:35 p. m.	12:30:00 p. m.	01:54:00 p. m.	01:00:00 p. m.	01:15:00 p. m.	12:30:00 p. m.	01:53:00 p. m.
	Día	15/02/2025	26/11/2025	26/11/2025	27/11/2025	26/11/2025	27/11/2025	27/11/2025
	Indios Verdes							
Arranque						0.04		0.17
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo		4.01	3.59	2.49	3.01		3.23
Ascenso y Descenso			0.06	0.05	0.09	0.26		0.13
Arranque			0.13	0.23	0.24	0.06		0.2
Tiempo próxima estación	Potrero		2.35	2.26	1.46	2.08		2.14
Ascenso y Descenso			0.07	0.06	0.11	0.2		0.14
Arranque			0.23	0.33	0.19	0.06		0.21
Tiempo próxima estación	La Raza		2.3	1.44	1.23	1.44		1.59
Ascenso y Descenso			0.07	0.04	0.1	0.32		0.19
Arranque			0.24	0.34	0.18	0.04		0.09
Tiempo próxima estación	Tlatelolco		3.22	2.02	1.21	2.13		2.51
Ascenso y Descenso			0.06	0.03	0.22	0.15		0.09
Arranque			0.1	0.21	0.16	0.04		0.21
Tiempo próxima estación	Guerrero		1.27	1.31	1.35	1.37		1.34
Ascenso y Descenso		0.2	0.06	0.05	0.09	0.29		0.16
Arranque		0.04	0.15	0.26	0.24	0.04		0.1
Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.17	1.15	1.13	1.16	1.13		1.09
Ascenso y Descenso		4.21	0.07	0.03	0.07	0.33		0.18
Arranque		0.03	0.54	0.24	0.4	0.03		0.09
Tiempo próxima estación	Juarez	0.48	0.47	0.49	1.12	0.51		0.45
Ascenso y Descenso		0.14	0.05	0.03	0.06	0.13		0.13
Arranque		0.03	0.23	0.24	0.17	0.04		0.07
Tiempo próxima estación	Balderas	1.19	1.08	1.11	1.23	1.2		1.16
Ascenso y Descenso		0.11	0.06	0.04	0.07	0.15		0.22

Arranque		0.03		0.33	7.39	0.05	0.06	0.08
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.09		1.09	1.31	1.14	1.11	1.52
Ascenso y Descenso		0.08		0.03	0.1	0.16	0.16	0.3
Arranque		0.04		0.25	0.59	0.04	0.04	0.05
Tiempo próxima estación	Hospital General	1.05		1.1	1.13	1.05	1.03	1.03
Ascenso y Descenso		0.18		0.03	0.07	2.22	0.17	0.25
Arranque		0.03		0.23	0.25	0.08	0.05	0.07
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.21		1.18	1.03	1.19	1.13	1.13
Ascenso y Descenso		0.15		0.04	0.05	0.16	0.19	0.59
Arranque		0.05		0.5	0.3	0.08	0.05	0.1
Tiempo próxima estación	Etiopia	1.04		1.54	1.52	1.39	1.34	1.31
Ascenso y Descenso		0.16		0.03	0.08	0.11	0.36	7.39
Arranque		0.03		0.39	0.22	0.05	0.04	0.07
Tiempo próxima estación	Eugenia	1.1		1.24	1.16	1.27	1.24	1.23
Ascenso y Descenso		0.15		0.05	0.07	1.31	0.1	0.17
Arranque		0.11		0.26	0.13	0.06	0.03	0.06
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.12		1.1	0.45	1.16	1.19	1.12
Ascenso y Descenso		0.09		0.03	0.09	0.33	0.16	0.4
Arranque		0.17		0.46	0.18	0.05	0.04	0.07
Tiempo próxima estación	Zapata	0.45		1.14	1.09	1.23	1.57	1.16
Ascenso y Descenso		0.17		0.02	0.1	0.43	0.18	0.24
Arranque		0.16		0.22	0.16	0.05	0.04	0.09
Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.14		1.52	1.34	1.4	1.36	1.35
Ascenso y Descenso		0.13		0.03	0.21	0.45	0.11	0.16
Arranque		0.04		0.17	0.09	0.05	0.04	0.22
Tiempo próxima estación	Viveros			1.25	2.51	1.25	1.27	1.21
Ascenso y Descenso				0.03	0.09	0.17	0.25	0.18
Arranque				0.16	0.19	0.04	0.03	0.1
Tiempo próxima estación	Quevedo			1.14	1.59	1.27	1.32	1.23

Ascenso y Descenso				0.02	0.21	0.18	0.33	0.19
Arranque				0.18	0.14	0.05	0.03	0.11
Tiempo próxima estación	Copilco			1.55	2.14	1.51	1.49	1.46
Ascenso y Descenso				0.03	0.2	0.23	0.52	0.24
Arranque				0.15	0.13	0.05	0.04	0.09
Tiempo próxima estación	Universidad			3.12	3.23	3.4	3.21	2.49
Arranque				0.09	0.17			

Tabla 5. Datos recolectados en un horario de 15:00 a 17:59 horas.

	Hora	03:12:00 p. m.	02:50:00 p. m.	04:00:00 p. m.	02:50:00 p. m.	04:20:00 p. m.	05:10:00 p. m.
	Día	18/02/2025	25/11/2025	10/01/2025	27/11/2025	12/01/2025	12/01/2025
	Indios Verdes						
Arranque						2.26	0.2
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo		2.25	4.43	3.38	0.14	2.3
Ascenso y Descenso			0.06	0.08	0.05	0.53	0.16
Arranque			0.54	0.19	0.11	2.4	0.04
Tiempo próxima estación	Potrero		1.58	2.47	2.41	0.06	1.56
Ascenso y Descenso			0.14	0.04	0.05	0.15	0.17
Arranque			0.14	0.26	0.15	1.23	0.05
Tiempo próxima estación	La Raza		1.47	3.42	4.29	0.07	1.16
Ascenso y Descenso			0.04	0.05	0.02	0.32	0.13
Arranque			0.17	0.3	0.16	2.45	0.11
Tiempo próxima estación	Tlatelolco		1.07	2.02	3.12	0.04	1.28
Ascenso y Descenso			0.38	0.06	0.04	0.26	0.2
Arranque			0.52	2.09	0.11	1.4	0.05
Tiempo próxima estación	Guerrero		1.31	1.31	1.37	0.05	1.49
Ascenso y Descenso		0.16	0.09	0.06	0.04	0.15	0.18
Arranque		0.06	0.58	0.23	0.12	1.17	0.04

Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.1	1.15	1.13	1.16	0.05	1.18
Ascenso y Descenso		0.19	0.2	0.08	0.06	0.21	0.17
Arranque		0.06	0.25	0.26	0.18	1.11	0.04
Tiempo próxima estación	Juarez	0.45	0.48	1.14	0.48	0.06	1.1
Ascenso y Descenso		0.12	0.17	0.09	0.44	0.11	0.49
Arranque		0.06	0.23	0.13	0.09	1.27	0.05
Tiempo próxima estación	Balderas	1.14	1.16	1.19	1.14	0.06	1.25
Ascenso y Descenso		1.58	0.01	0.05	0.06	0.35	0.27
Arranque		0.05		1.17	0.13	1.31	0.07
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.11		1.15	1.15	0.06	1.57
Ascenso y Descenso		0.16		0.08	0.03	0.41	0.24
Arranque		0.05		0.26	0.1	1.12	0.52
Tiempo próxima estación	Hospital General	1.02		1.09	1.08	0.05	1.41
Ascenso y Descenso		0.17		0.09	0.03	0.36	0.23
Arranque		0.05		0.17	0.1	1.02	0.09
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.13		1.16	1.15	0.06	1.05
Ascenso y Descenso		0.22		0.11	0.04	0.17	1.12
Arranque		0.05		0.2	0.12	1.12	0.09
Tiempo próxima estación	Etiopia	1.04		1.56	1.59	0.07	2.21
Ascenso y Descenso		0.13		0.04	0.06	1.16	0.37
Arranque		0.36		3.36	0.08	1.18	0.05
Tiempo próxima estación	Eugenia	1.09		1.22	1.25	0.05	1.2
Ascenso y Descenso		0.17		0.15	0.04	0.39	0.52
Arranque		0.07		0.16	0.1	0.48	0.05
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.11		1.1	1.17	0.07	0.5
Ascenso y Descenso		1.44		0.04	0.03	0.15	0.36
Arranque		0.15		0.37	0.08	1.09	0.07
Tiempo próxima estación	Zapata	0.47		1.14	1.19	0.06	1.14
Ascenso y Descenso		6.51		0.09	0.05	0.59	0.31

Arranque		0.09		0.53	0.12	1.31	0.05
Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.12		1.53	2	0.06	1.33
Ascenso y Descenso		0.31		0.08	0.04	1.25	0.17
Arranque				0.31	0.09	2.1	0.08
Tiempo próxima estación	Viveros			1.27	1.3	0.07	2.03
Ascenso y Descenso				0.04	0.04	1.01	0.37
Arranque				1.42	0.09	1.43	0.07
Tiempo próxima estación	Quevedo			1.17	1.18	0.1	1.5
Ascenso y Descenso				0.05	0.04	0.19	1.15
Arranque				0.12	0.12	2.21	0.05
Tiempo próxima estación	Copilco			1.54	2	0.05	2.09
Ascenso y Descenso				0.05	0.05	0.54	0.36
Arranque				0.16	0.37	3.12	0.17
Tiempo próxima estación	Universidad			2.26	2.32	0.06	2.59
Arranque				0.09	0.28		

Tabla 5. Datos recolectados en un horario de 18:00 a 19:59 horas.

	Hora	07:27:00 p. m.	06:52:00 p. m.	07:30:00 p. m.	05:46:00 p. m.	06:33:00 p. m.	06:49:00 p. m.
	Día	23/05/2025	14/02/2025	25/08/2025	23/09/2025	12/01/2025	12/01/2025
	Indios Verdes						
Arranque							0.02
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo	4.35		3.18	3.44	3	3.22
Ascenso y Descenso		0.28		0.03	0.08	0.07	0.28
Arranque		0.31		0.16	0.45	0.05	0.15
Tiempo próxima estación	Potrero	2.41		2.42	2.13	5.28	2.45
Ascenso y Descenso		0.12		0.06	0.05	0.03	0.17
Arranque		0.36		0.26	0.15	0.48	0.05
Tiempo próxima estación	La Raza	3.11		3.24	3.44	2.48	1.42

Ascenso y Descenso		0.14		0.04	0.03	0.05	0.11
Arranque		0.3		2.49	1.1	1.05	0.1
Tiempo próxima estación	Tlatelolco	7.52		5.53	2.49	2.07	2.11
Ascenso y Descenso		0.16	0.05	0.06	0.16	0.04	0.11
Arranque		2.41	0.31	3.12	1.4	0.15	0.03
Tiempo próxima estación	Guerrero	2.26	1.12	5.22	2.4	1.35	1.31
Ascenso y Descenso		0.11	0.09	0.05	0.08	0.05	0.13
Arranque		0.24	6.51	1.01	2.6	5.12	0.14
Tiempo próxima estación	Hidalgo	1.43	0.47	1.48	2.35	1.17	1.09
Ascenso y Descenso		0.07	0.15	0.06	0.13	0.13	0.21
Arranque		1.13	1.44	0.17	0.38	0.26	0.06
Tiempo próxima estación	Juarez	1.04	1.11	1.2	0.49	1.51	0.48
Ascenso y Descenso		0.09	0.07	0.04	0.05	0.06	0.1
Arranque		0.38	0.17	0.14	0.11	0.17	0.03
Tiempo próxima estación	Balderas	2.47	1.09	1.57	1.14	1.43	1.19
Ascenso y Descenso		0.18	0.36	0.04	0.05	0.13	0.44
Arranque		1.11	0.13	0.33	0.11	2.37	0.05
Tiempo próxima estación	Niños Heroes	2.27	1.04	1.11	1.06	1.12	1.11
Ascenso y Descenso		0.1	0.15	0.04	0.04	0.06	0.11
Arranque		0.2	0.12	0.09	0.1	3.25	0.05
Tiempo próxima estación	Hospital General	2.07	1.14	1.04	2.22	1.06	1.02
Ascenso y Descenso		0.09	0.07	0.04	0.04	0.07	0.19
Arranque		0.26	0.19	0.12	0.13	0.15	0.03
Tiempo próxima estación	Centro Medico	1.18		1.11	1.15	1.4	1.11
Ascenso y Descenso		0.08		0.05	0.1	0.05	0.24
Arranque		0.26		0.15	0.15	0.2	0.03
Tiempo próxima estación	Etiopia	1.54		1.52	1.54	1.57	1.29
Ascenso y Descenso		0.06		0.06	0.08	0.05	0.11
Arranque		1.16		0.12	0.11	0.19	0.02

Tiempo próxima estación	Eugenia	1.22		1.22	1.25	1.57	1.22
Ascenso y Descenso		0.2		0.03	0.05	0.13	0.22
Arranque		0.26		3.11	0.17	0.12	0.05
Tiempo próxima estación	Division del Norte	1.08		1.06	1.18	1.35	1.12
Ascenso y Descenso		0.12		0.04	0.03	0.16	0.1
Arranque		0.39		0.1	0.19	0.12	0.04
Tiempo próxima estación	Zapata	1.16		1.14	1.16	1.2	1.17
Ascenso y Descenso		0.16		0.03	0.04	0.06	0.16
Arranque		0.34		6.17	0.18	3.08	0.05
Tiempo próxima estación	Coyoacan	1.55		1.56	2.1	1.48	1.36
Ascenso y Descenso		0.07		0.06	0.04	0.06	0.09
Arranque		0.23		0.11	1.23	9.4	0.03
Tiempo próxima estación	Viveros	1.26		1.26	2.15	1.28	1.19
Ascenso y Descenso		0.12		0.05	0.06	0.04	0.13
Arranque		0.29		0.16	0.13	4.15	0.04
Tiempo próxima estación	Quevedo	1.14		1.13	1.28	1.15	1.23
Ascenso y Descenso		0.05		0.06	0.16	0.05	0.12
Arranque		0.21		1.3	0.14	2.3	0.05
Tiempo próxima estación	Copilco	1.52		1.54	1.59	1.55	1.47
Ascenso y Descenso		0.04		0.05	0.03	0.05	0.2
Arranque		0.26		0.11	1.46	0.37	0.04
Tiempo próxima estación	Universidad	2.25		2.26	2.35	2.27	2.37
Arranque		0.04		0.15	0.08	0.05	

Tabla 5. Datos recolectados en un horario de 20:00 a 24:00 horas.

	Hora	09:07:00 p. m.	09:52:00 p. m.	09:14:00 p. m.	09:29:00 p. m.
	Día	13/02/2025	18/02/2025	11/04/2025	21/04/2025
	Indios Verdes				
Arranque					
Tiempo próxima estación	Deportivo 18 de marzo			3.07	2.53
Ascenso y Descenso				0.15	0.04
Arranque				0.19	6.29
Tiempo próxima estación	Potrero			2.01	3.15
Ascenso y Descenso				0.06	0.06
Arranque				0.1	0.29
Tiempo próxima estación	La Raza			1.4	1.49
Ascenso y Descenso				0.04	0.03
Arranque				0.25	0.22
Tiempo próxima estación	Tlatelolco			2.03	2.17
Ascenso y Descenso		0.04	0.07	0.05	0.03
Arranque		0.13	0.14	0.28	0.12
Tiempo próxima estación	Guerrero	1.14	1.12	1.14	1.41
Ascenso y Descenso		0.16	0.08	0.34	0.02
Arranque		0.17	0.23	1.03	0.17
Tiempo próxima estación	Hidalgo	0.45	0.45	1.12	1.16
Ascenso y Descenso		0.17	0.08	0.06	0.03
Arranque		0.09	2.16	1.22	0.19
Tiempo próxima estación	Juarez	1.12	1.09	0.45	0.51
Ascenso y Descenso		0.11	0.07	0.22	0.03
Arranque		0.15	0.46	1.05	0.17
Tiempo próxima estación	Balderas	1.1	1.08	1.09	4.46
Ascenso y Descenso		0.03	0.06	0.02	0.08
Arranque		0.16	0.1	5.12	0.15

Tiempo próxima estación	Niños Heroes	1.04	1.03	1.06	4.37
Ascenso y Descenso		0.12	0.07	0.06	0.05
Arranque		0.08	0.13	0.16	2.57
Tiempo próxima estación	Hospital General	5.12	1.12	1.02	1.08
Ascenso y Descenso		0.06		0.06	0.03
Arranque		0.18		0.12	0.1
Tiempo próxima estación	Centro Medico			1.39	1.18
Ascenso y Descenso				0.05	0.03
Arranque				0.16	5.13
Tiempo próxima estación	Etiopia			1.56	2.02
Ascenso y Descenso				0.04	0.05
Arranque				0.13	7.2
Tiempo próxima estación	Eugenia			1.25	1.3
Ascenso y Descenso				0.05	0.11
Arranque				0.24	0.22
Tiempo próxima estación	Division del Norte			1.07	1.13
Ascenso y Descenso				0.06	0.03
Arranque				1.11	7.05
Tiempo próxima estación	Zapata			1.15	1.24
Ascenso y Descenso				0.05	0.07
Arranque				0.32	0.26
Tiempo próxima estación	Coyoacan			1.38	1.49
Ascenso y Descenso				0.05	0.03
Arranque				0.11	6.41
Tiempo próxima estación	Viveros			1.25	1.33
Ascenso y Descenso				0.05	0.16
Arranque				0.13	0.15
Tiempo próxima estación	Quevedo			1.22	1.19
Ascenso y Descenso				0.05	0.17

Arranque				0.17	1.22
Tiempo próxima estación	Copilco			1.56	1.57
Ascenso y Descenso				0.06	0.03
Arranque				0.21	0.33
Tiempo próxima estación	Universidad			2.27	2.4
Arranque					

Durante el proceso de recolección de datos se realizó con un cronómetro, pero los tiempos fueron registrados utilizando un formato decimal simplificado donde la parte entera representa los minutos transcurridos y la parte decimal representa directamente los segundos. Por ejemplo, el valor 2.25 representa 2 minutos con 25 segundos, equivalente a la notación temporal estándar 02:25:00.

Este formato resulto práctico y legible para la captura manual de datos, sin embargo presenta una limitación fundamental al momento de realizar operaciones matemáticas, no es compatible con la aritmética decimal convencional.

Al intentar sumar o promediar valores en este formato sin conversión previa, se obtienen resultados erróneos desde el punto de vista temporal:

Ejemplo:

- Suma incorrecta: $2.25 + 3.12 = 5.37$
- Interpretación incorrecta: 5 minutos con 37 segundos
- Suma correcta:
 $2 \text{ minutos } 25 \text{ segundos} + 3 \text{ minutos } 12 \text{ segundos} = 5 \text{ minutos } 37 \text{ segundos}$

Se puede observar que ambos resultados son lo mismo, pero es una casualidad debido a que los segundos suman menos de 60:

Ejemplo:

- Suma incorrecta: $1.45 + 1.30 = 2.75$
- Interpretación incorrecta: 2 minutos con 75 segundos
- Suma correcta:
 - Segundos: $0.45 + 0.30 = 0.75 \text{ [seg]} = 1.25 \text{ [min]}$
 - Minutos: $1 + 1 + 1.25 = 3 \text{ minutos con } 25 \text{ segundos}$

Entonces para poder hacer cálculos aritméticos correctamente, será necesario convertir primero la parte decimal (segundos) en minutos para así poder hacer la suma correspondiente de los tiempos.

Entonces se tendrían las siguientes formulas:

- Si el tiempo es mayor a 1

$$Tiempo = x_{entera} + \frac{x_{decimal} * 100}{60}$$
- Si el tiempo es menor a 1

$$Tiempo = \frac{x_{decimal} * 100}{600}$$

A continuación se muestran los tiempos recolectados separados en Ascensos-Descensos y Tiempo que tarda en llegar de una estación a otra con la respectiva conversión de unidades.

Anexo B

A continuación, se muestran los tiempos recolectados separados en ascensos-descensos y Tiempo que tarda en llegar de una estación a otra con la respectiva conversión de unidades.

- Ascensos y descensos**

Tabla 6. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 5:00 a 5:59 horas.

Estación	Hora valle [min,s]				Hora valle [min,s]			
	5:00 a 5:59				5:00 a 5:59			
Indios Verdes								
Deportivo 18 de marzo	0.14	0.13	0.15	0.14	0.233	0.217	0.250	0.233
Potrero	0.12	0.13	0.14	0.06	0.200	0.217	0.233	0.100
La raza	0.13	0.15	0.11	0.04	0.217	0.250	0.183	0.067
Tlatelolco	0.11	0.13	0.12	0.06	0.183	0.217	0.200	0.100
Guerrero	0.15	0.31	0.14	0.04	0.250	0.517	0.233	0.067
Hidalgo	0.2	0.2	0.15	0.02	0.333	0.333	0.250	0.033
Juarez	0.11	0.13	0.1	0.06	0.183	0.217	0.167	0.100
Balderas	0.14	0.16	0.15	0.13	0.233	0.267	0.250	0.217
Niños Heroes	0.11	0.14	0.1	0.06	0.183	0.233	0.167	0.100
Hospital General	0.12	0.14	0.27	0.06	0.200	0.233	0.450	0.100
Centro médico	0.16	0.17	0.23	0.05	0.267	0.283	0.383	0.083
Etiopia	0.11	0.14	0.16	0.05	0.183	0.233	0.267	0.083
Eugenia	0.09	0.14	0.14	0.06	0.150	0.233	0.233	0.100
Division del norte	0.11	0.15	0.13	0.06	0.183	0.250	0.217	0.100
Zapata	0.17	0.18	0.21	0.08	0.283	0.300	0.350	0.133
Coyoacan	0.11	0.14	0.14	0.05	0.183	0.233	0.233	0.083
Viveros	0.13	0.16	0.16	0.04	0.217	0.267	0.267	0.067
Quevedo	0.13	0.16	0.19	0.06	0.217	0.267	0.317	0.100
Copilco	0.13	3.4	0.20	0.15	0.217	3.667	0.333	0.250
Universidad								

Tabla 7. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 6:00 a 8:59 horas.

Estación	Hora pico [min,s]						Hora pico [min,seg]					
	6:00 a 8:59						6:00 a 8:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo	1.08	0.08	0.18	0.13	0.08	0.17	1.133	0.133	0.300	0.217	0.133	0.283
Potrero	0.2	0.12	0.11	0.16	0.07	0.06	0.333	0.200	0.183	0.267	0.117	0.100
La raza	0.13	0.07	1.13	0.19	0.05	0.06	0.217	0.117	1.217	0.317	0.083	0.100
Tlatelolco	0.18	1.32	0.28	0.15	0.06	0.08	0.300	1.533	0.467	0.250	0.100	0.133
Guerrero	0.26	0.41	0.17	0.29	0.04	0.06	0.433	0.683	0.283	0.483	0.067	0.100
Hidalgo	0.19	0.09	0.21	0.21	0.05	0.05	0.317	0.150	0.350	0.350	0.083	0.083

Juarez	0.16	0.08	0.09	1.55	0.03	0.07	0.267	0.133	0.150	1.917	0.050	0.117
Balderas	0.18	2.09	3.07	0.19	0.09	0.07	0.300	2.150	3.117	0.317	0.150	0.117
Niños Heroes	0.15	0.08	0.11	0.27	0.05	0.09	0.250	0.133	0.183	0.450	0.083	0.150
Hospital General	0.19	0.14	0.14	0.12	0.08	0.17	0.317	0.233	0.233	0.200	0.133	0.283
Centro médico	0.18	0.08	0.25	0.22	0.08	0.07	0.300	0.133	0.417	0.367	0.133	0.117
Etiopia	0.12	0.07	0.13	2.06	0.06	0.07	0.200	0.117	0.217	2.100	0.100	0.117
Eugenia	0.12	0.07	0.11	0.14	0.06	0.06	0.200	0.117	0.183	0.233	0.100	0.100
Division del norte	0.25	0.12	0.09	4.12	0.06	0.2	0.417	0.200	0.150	4.200	0.100	0.333
Zapata	0.16	0.08	0.20	0.27	0.08	0.07	0.267	0.133	0.333	0.450	0.133	0.117
Coyoacan	2.13	1.35	2.17	0.14	0.09	0.07	2.217	1.583	2.283	0.233	0.150	0.117
Viveros	0.38	0.12	0.22	0.23	0.03	0.08	0.633	0.200	0.367	0.383	0.050	0.133
Quevedo	0.44	0.14	2.36	0.28	0.05	0.08	0.733	0.233	2.600	0.467	0.083	0.133
Copilco	0.2		0.24	0.23	0.02	0.17	0.333		0.400	0.383	0.033	0.283
Universidad												

Tabla 8. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 9:00 a 11:59 horas.

Estación	Hora valle [min,s]					Hora valle [min,s]				
	9:00 a 11:59					9:00 a 11:59				
Indios Verdes										
Deportivo 18 de marzo	0.12	0.15	0.03	0.13	0.03	0.200	0.250	0.050	0.217	0.050
Potrero	0.11	0.06	0.04	0.14	0.03	0.183	0.100	0.067	0.233	0.050
La raza	0.11	0.04	0.03	0.35	0.1	0.183	0.067	0.050	0.583	0.167
Tlatelolco	0.19	0.05	0.04	0.14	0.09	0.317	0.083	0.067	0.233	0.150
Guerrero	0.12	0.34	0.04	0.2	0.05	0.200	0.567	0.067	0.333	0.083
Hidalgo	0.25	0.06	0.09	0.18	0.03	0.417	0.100	0.150	0.300	0.050
Juarez	1.39	0.22	0.04	0.16	0.05	1.650	0.367	0.067	0.267	0.083
Balderas	0.54	0.07	0.03	4.05	0.04	0.900	0.117	0.050	4.083	0.067
Niños Heroes	0.11	0.06	0.05	2	0.04	0.183	0.100	0.083	2.000	0.067
Hospital General	0.11	0.06	0.05	0.17	0.04	0.183	0.100	0.083	0.283	0.067
Centro médico	0.48	0.05	0.05	0.31	0.04	0.800	0.083	0.083	0.517	0.067
Etiopia	0.11	0.04	0.06	0.24	0.03	0.183	0.067	0.100	0.400	0.050
Eugenia	0.08	0.05	0.04	0.22	0.04	0.133	0.083	0.067	0.367	0.067
Division del norte	0.12	0.06	0.03	0.2	0.05	0.200	0.100	0.050	0.333	0.083
Zapata	0.17	0.05	0.03	0.27	0.07	0.283	0.083	0.050	0.450	0.117
Coyoacan	0.1	0.05	0.05	0.21	0.09	0.167	0.083	0.083	0.350	0.150
Viveros	0.1	0.05	0.03	0.14	0.03	0.167	0.083	0.050	0.233	0.050
Quevedo	0.1	0.05	0.04	0.2	0.1	0.167	0.083	0.067	0.333	0.167
Copilco	0.1	0.06	0.03	1.02	0.09	0.167	0.100	0.050	1.033	0.150
Universidad										

Tabla 9. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 12:00 a 14:59 horas.

Estación	Hora pico [min,s]						Hora pico [min,s]					
	12:00 a 14:59						12:00 a 14:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo		0.26	0.06	0.13	0.05	0.09		0.433	0.100	0.217	0.083	0.150
Potrero		0.2	0.07	0.14	0.06	0.11		0.333	0.117	0.233	0.100	0.183
La raza		0.32	0.07	0.19	0.04	0.1		0.533	0.117	0.317	0.067	0.167
Tlatelolco		0.15	0.06	0.09	0.03	0.22		0.250	0.100	0.150	0.050	0.367
Guerrero	0.2	0.29	0.06	0.16	0.05	0.09	0.333	0.483	0.100	0.267	0.083	0.150
Hidalgo	4.21	0.33	0.07	0.18	0.03	0.07	4.350	0.550	0.117	0.300	0.050	0.117
Juarez	0.14	0.13	0.05	0.13	0.03	0.06	0.233	0.217	0.083	0.217	0.050	0.100
Balderas	0.11	0.15	0.06	0.22	0.04	0.07	0.183	0.250	0.100	0.367	0.067	0.117
Niños Heroes	0.08	0.16	0.16	0.3	0.03	0.1	0.133	0.267	0.267	0.500	0.050	0.167
Hospital General	0.18	2.22	0.17	0.25	0.03	0.07	0.300	2.367	0.283	0.417	0.050	0.117
Centro médico	0.15	0.16	0.19	0.59	0.04	0.05	0.250	0.267	0.317	0.983	0.067	0.083
Etiopia	0.16	0.11	0.36	7.39	0.03	0.08	0.267	0.183	0.600	7.650	0.050	0.133
Eugenia	0.15	1.31	0.1	0.17	0.05	0.07	0.250	1.517	0.167	0.283	0.083	0.117
Division del norte	0.09	0.33	0.16	0.4	0.03	0.09	0.150	0.550	0.267	0.667	0.050	0.150
Zapata	0.17	0.43	0.18	0.24	0.02	0.1	0.283	0.717	0.300	0.400	0.033	0.167
Coyoacan	0.13	0.45	0.11	0.16	0.03	0.21	0.217	0.750	0.183	0.267	0.050	0.350
Viveros		0.17	0.25	0.18	0.03	0.09		0.283	0.417	0.300	0.050	0.150
Quevedo		0.18	0.33	0.19	0.02	0.21		0.300	0.550	0.317	0.033	0.350
Copilco		0.23	0.52	0.24	0.03	0.2		0.383	0.867	0.400	0.050	0.333
Universidad												

Tabla 10. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 15:00 a 17:59 horas.

Estación	Hora valle [min,s]						Hora valle [min,s]					
	15:00 a 17:59						15:00 a 17:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo		0.08	0.06	0.05	0.53	0.16		0.133	0.100	0.083	0.883	0.267
Potrero		0.04	0.14	0.05	0.15	0.17		0.067	0.233	0.083	0.250	0.283
La raza		0.05	0.04	0.02	0.32	0.13		0.083	0.067	0.033	0.533	0.217
Tlatelolco		0.06	0.38	0.04	0.26	0.2		0.100	0.633	0.067	0.433	0.333
Guerrero	0.16	0.06	0.09	0.04	0.15	0.18	0.267	0.100	0.150	0.067	0.250	0.300
Hidalgo	0.19	0.08	0.2	0.06	0.21	0.17	0.317	0.133	0.333	0.100	0.350	0.283
Juarez	0.12	0.09	0.17	0.44	0.11	0.49	0.200	0.150	0.283	0.733	0.183	0.817
Balderas	1.58	0.05	0.01	0.06	0.35	0.27	1.967	0.083	0.017	0.100	0.583	0.450
Niños Heroes	0.16	0.08		0.03	0.41	0.24	0.267	0.133		0.050	0.683	0.400
Hospital General	0.17	0.09		0.03	0.36	0.23	0.283	0.150		0.050	0.600	0.383
Centro médico	0.22	0.11		0.04	0.17	1.12	0.367	0.183		0.067	0.283	1.200
Etiopia	0.13	0.04		0.06	1.16	0.37	0.217	0.067		0.100	1.267	0.617

Eugenia	0.17	0.15		0.04	0.39	0.52	0.283	0.250		0.067	0.650	0.867
Division del norte	1.44	0.04		0.03	0.15	0.36	1.733	0.067		0.050	0.250	0.600
Zapata	6.51	0.09		0.05	0.59	0.31	6.850	0.150		0.083	0.983	0.517
Coyoacan	0.31	0.08		0.04	1.25	0.17	0.517	0.133		0.067	1.417	0.283
Viveros		0.04		0.04	1.01	0.37		0.067		0.067	1.017	0.617
Quevedo		0.05		0.04	0.19	1.15		0.083		0.067	0.317	1.250
Copilco		0.05		0.05	0.54	0.36		0.083		0.083	0.900	0.600
Universidad												

Tabla 11. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 18:00 a 19:59 horas.

Estación	Hora pico [min,s]						Hora pico [min,s]					
	18:00 a 19:59						18:00 a 19:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo		0.28	0.03	0.08	0.07	0.28		0.467	0.050	0.133	0.117	0.467
Potrero		0.12	0.06	0.05	0.03	0.17		0.200	0.100	0.083	0.050	0.283
La raza		0.14	0.04	0.03	0.05	0.11		0.233	0.067	0.050	0.083	0.183
Tlatelolco	0.05	0.16	0.06	0.16	0.04	0.11	0.083	0.267	0.100	0.267	0.067	0.183
Guerrero	0.09	0.11	0.05	0.08	0.05	0.13	0.150	0.183	0.083	0.133	0.083	0.217
Hidalgo	0.15	0.07	0.06	0.13	0.13	0.21	0.250	0.117	0.100	0.217	0.217	0.350
Juarez	0.07	0.09	0.04	0.05	0.06	0.1	0.117	0.150	0.067	0.083	0.100	0.167
Balderas	0.36	0.18	0.04	0.05	0.13	0.44	0.600	0.300	0.067	0.083	0.217	0.733
Niños Heroes	0.15	0.1	0.04	0.04	0.06	0.11	0.250	0.167	0.067	0.067	0.100	0.183
Hospital General	0.07	0.09	0.04	0.04	0.07	0.19	0.117	0.150	0.067	0.067	0.117	0.317
Centro médico		0.08	0.05	0.1	0.05	0.24		0.133	0.083	0.167	0.083	0.400
Etiopia		0.06	0.06	0.08	0.05	0.11		0.100	0.100	0.133	0.083	0.183
Eugenia		0.2	0.03	0.05	0.13	0.22		0.333	0.050	0.083	0.217	0.367
Division del norte		0.12	0.04	0.03	0.16	0.1		0.200	0.067	0.050	0.267	0.167
Zapata		0.16	0.03	0.04	0.06	0.16		0.267	0.050	0.067	0.100	0.267
Coyoacan		0.07	0.06	0.04	0.06	0.09		0.117	0.100	0.067	0.100	0.150
Viveros		0.12	0.05	0.06	0.04	0.13		0.200	0.083	0.100	0.067	0.217
Quevedo		0.05	0.06	0.16	0.05	0.12		0.083	0.100	0.267	0.083	0.200
Copilco		0.04	0.05	0.03	0.05	0.2		0.067	0.083	0.050	0.083	0.333
Universidad												

Tabla 12. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 20:00 a 24:00 horas.

Estación	Hora valle [min,s]				Hora valle [min,s]			
	20:00 a 24:00				20:00 a 24:00			
Indios Verdes								
Deportivo 18 de marzo			0.15	0.04			0.250	0.067
Potrero			0.06	0.06			0.100	0.100
La raza			0.04	0.03			0.067	0.050
Tlatelolco	0.04	0.07	0.05	0.03	0.067	0.117	0.083	0.050

Guerrero	0.16	0.08	0.34	0.02	0.267	0.133	0.567	0.033
Hidalgo	0.17	0.08	0.06	0.03	0.283	0.133	0.100	0.050
Juarez	0.11	0.07	0.22	0.03	0.183	0.117	0.367	0.050
Balderas	0.03	0.06	0.02	0.08	0.050	0.100	0.033	0.133
Niños Heroes	0.12	0.07	0.06	0.05	0.200	0.117	0.100	0.083
Hospital General	0.06		0.06	0.03	0.100		0.100	0.050
Centro médico			0.05	0.03			0.083	0.050
Etiopia			0.04	0.05			0.067	0.083
Eugenia			0.05	0.11			0.083	0.183
Division del norte			0.06	0.03			0.100	0.050
Zapata			0.05	0.07			0.083	0.117
Coyoacan			0.05	0.03			0.083	0.050
Viveros			0.05	0.16			0.083	0.267
Quevedo			0.05	0.17			0.083	0.283
Copilco			0.06	0.03			0.100	0.050
Universidad								

- **Estación a Estación**

Tabla 13. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 5:00 a 5:59 horas.

Estación	Hora valle [min,s]				Hora valle [min,s]			
	5:00 a 5:59				5:00 a 5:59			
Indios Verdes								
Deportivo 18 de marzo	3.11	3.55	3.14	3.3	3.183	3.917	3.233	3.500
Potrero	2.06	2.35	2.11	2.35	2.100	2.583	2.183	2.583
La raza	1.44	1.45	1.43	2.13	1.733	1.750	1.717	2.217
Tlatelolco	2.14	2.14	2.09	2.09	2.233	2.233	2.150	2.150
Guerrero	1.35	1.37	1.38	1.25	1.583	1.617	1.633	1.417
Hidalgo	1.13	1.05	1.09	1.11	1.217	1.083	1.150	1.183
Juarez	0.45	0.5	0.46	1.19	0.750	0.833	0.767	1.317
Balderas	1.19	1.2	1.14	2.29	1.317	1.333	1.233	2.483
Niños Heroes	1.12	1.14	1.11	1.1	1.200	1.233	1.183	1.167
Hospital General	1.06	1.05	1.05	1.06	1.100	1.083	1.083	1.100
Centro médico	1.16	1.17	1.16	1.15	1.267	1.283	1.267	1.250
Etiopia	1.37	2.01	1.35	1.56	1.617	2.017	1.583	1.933
Eugenia	1.24	1.25	1.24	1.25	1.400	1.417	1.400	1.417
Division del norte	1.44	1.14	1.15	1.1	1.733	1.233	1.250	1.167
Zapata	1.19	1.20	1.16	1.2	1.317	1.333	1.267	1.333
Coyoacan	1.41	1.40	1.36	1.49	1.683	1.667	1.600	1.817
Viveros	1.24	1.24	1.2	1.28	1.400	1.400	1.333	1.467
Quevedo	1.17	1.26	1.24	1.23	1.283	1.433	1.400	1.383
Copilco	1.57	1.51	1.46	2.03	1.950	1.850	1.767	2.050
Universidad	3.2	2.59	2.41	2.28	3.333	2.983	2.683	2.467

Tabla 14. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 6:00 a 8:59 horas.

Estación	Hora pico [min,s]						Hora pico [min,s]					
	6:00 a 8:59						6:00 a 8:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo	3.26	1.32	2.49	3.45	3.42	6.16	3.433	1.533	2.817	3.750	3.700	6.267
Potrero	2.48	1.03	1.57	1.57	3.32	2.41	2.800	1.050	1.950	1.950	3.533	2.683
La raza	1.45	2.11	1.46	1.47	1.33	7.35	1.750	2.183	1.767	1.783	1.550	7.583
Tlatelolco	2.12	1.35	2.2	2.16	1.59	2	2.200	1.583	2.333	2.267	1.983	2.000
Guerrero	1.56	1.13	1.35	1.37	1.27	1.28	1.933	1.217	1.583	1.617	1.450	1.467
Hidalgo	1.12	2.42	1.14	1.17	1.09	1.11	1.200	2.700	1.233	1.283	1.150	1.183
Juarez	0.48	1.46	0.49	0.5	0.54	0.44	0.800	1.767	0.817	0.833	0.900	0.733
Balderas	1.12	1.12	1.21	1.23	1.19	1.09	1.200	1.200	1.350	1.383	1.317	1.150
Niños Heroes	1.13	1.09	1.15	1.15	1.06	1.06	1.217	1.150	1.250	1.250	1.100	1.100
Hospital General	1.04	1.14	1.04	1.05	1.04	1.05	1.067	1.233	1.067	1.083	1.067	1.083
Centro médico	1.12	1.31	1.12	1.2	1.21	1.18	1.200	1.517	1.200	1.333	1.350	1.300
Etiopia	1.32	1.23	1.34	1.41	1.52	1.53	1.533	1.383	1.567	1.683	1.867	1.883
Eugenia	1.36	1.12	1.27	2.01	1.2	1.20	1.600	1.200	1.450	2.017	1.333	1.333
Division del norte	1.14	1.19	1.14	1.15	1.05	1.09	1.233	1.317	1.233	1.250	1.083	1.150
Zapata	1.18	1.41	1.15	1.21	1.13	1.16	1.300	1.683	1.250	1.350	1.217	1.267
Coyoacan	1.46	1.30	1.42	1.43	1.49	1.40	1.767	1.500	1.700	1.717	1.817	1.667
Viveros	1.24	1.22	1.26	1.31	1.24	1.26	1.400	1.367	1.433	1.517	1.400	1.433
Quevedo	1.27	1.49	1.27	1.25	1.14	1.2	1.450	1.817	1.450	1.417	1.233	1.333
Copilco	1.5	8	2.11	1.55	1.56	1.56	1.833	8.000	2.183	1.917	1.933	1.933
Universidad	3.11	2.5	2.34	2.41	2.3	2.43	3.183	2.833	2.567	2.683	2.500	2.717

Tabla 15. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 9:00 a 11:59 horas.

Estación	Hora valle [min,s]						Hora valle [min,s]				
	9:00 a 11:59						9:00 a 11:59				
Indios Verdes										
Deportivo 18 de marzo	2.4	3.07	2.5	3.55	4.02		2.667	3.117	2.833	3.917	4.033
Potrero	1.5	2.01	1.48	2.23	3		1.833	2.017	1.800	2.383	3.000
La raza	1.5	1.4	1.39	1.49	3.08		1.833	1.667	1.650	1.817	3.133
Tlatelolco	2.19	2.03	1.57	2.11	6.17		2.317	2.050	1.950	2.183	6.283
Guerrero	1.47	1.14	1.26	1.33	4.09		1.783	1.233	1.433	1.550	4.150
Hidalgo	1.24	1.12	1.1	1.08	1.13		1.400	1.200	1.167	1.133	1.217
Juarez	0.52	0.45	0.43	0.45	0.45		0.867	0.750	0.717	0.750	0.750
Balderas	1.38	1.09	1.08	1.28	1.09		1.633	1.150	1.133	1.467	1.150
Niños Heroes	1.24	1.06	1.05	1.19	1.07		1.400	1.100	1.083	1.317	1.117
Hospital General	1.14	1.02	1.03	1.07	1.07		1.233	1.033	1.050	1.117	1.117
Centro médico	1.22	1.39	1.1	1.15	1.14		1.367	1.650	1.167	1.250	1.233
Etiopia	1.48	1.56	1.51	1.33	1.53		1.800	1.933	1.850	1.550	1.883

Eugenia	1.38	1.25	1.34	1.22	1.21	1.633	1.417	1.567	1.367	1.350
Division del norte	1.26	1.07	1.05	1.12	1.07	1.433	1.117	1.083	1.200	1.117
Zapata	1.31	1.14	1.15	1.15	1.17	1.517	1.233	1.250	1.250	1.283
Coyoacan	1.58	1.38	1.46	1.53	1.5	1.967	1.633	1.767	1.883	1.833
Viveros	1.4	1.25	1.24	1.2	1.26	1.667	1.417	1.400	1.333	1.433
Quevedo	1.36	1.22	1.14	1.23	1.18	1.600	1.367	1.233	1.383	1.300
Copilco	2.05	1.56	1.53	1.42	1.55	2.083	1.933	1.883	1.700	1.917
Universidad	2.5	2.27	1.38	2.42	2.21	2.833	2.450	1.633	2.700	2.350

Tabla 16. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 12:00 a 14:59 horas.

Estación	Hora pico [min,s]						Hora pico [min,s]					
	12:00 a 14:59						12:00 a 14:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo		3.01	4.01	3.23	3.59	2.49		3.017	4.017	3.383	3.983	2.817
Potrero		2.08	2.35	2.14	2.26	1.46		2.133	2.583	2.233	2.433	1.767
La raza		1.44	2.3	1.59	1.44	1.23		1.733	2.500	1.983	1.733	1.383
Tlatelolco		2.13	3.22	2.51	2.02	1.21		2.217	3.367	2.850	2.033	1.350
Guerrero		1.37	1.27	1.34	1.31	1.35		1.617	1.450	1.567	1.517	1.583
Hidalgo	1.17	1.13	1.15	1.09	1.13	1.16	1.283	1.217	1.250	1.150	1.217	1.267
Juarez	0.48	0.51	0.47	0.45	0.49	1.12	0.800	0.850	0.783	0.750	0.817	1.200
Balderas	1.19	1.2	1.08	1.16	1.11	1.23	1.317	1.333	1.133	1.267	1.183	1.383
Niños Heroes	1.09	1.14	1.11	1.52	1.09	1.31	1.150	1.233	1.183	1.867	1.150	1.517
Hospital General	1.05	1.05	1.03	1.03	1.1	1.13	1.083	1.083	1.050	1.050	1.167	1.217
Centro médico	1.21	1.19	1.13	1.13	1.18	1.03	1.350	1.317	1.217	1.217	1.300	1.050
Etiopia	1.04	1.39	1.34	1.31	1.54	1.52	1.067	1.650	1.567	1.517	1.900	1.867
Eugenia	1.1	1.27	1.24	1.23	1.24	1.16	1.167	1.450	1.400	1.383	1.400	1.267
Division del norte	1.12	1.16	1.19	1.12	1.1	0.45	1.200	1.267	1.317	1.200	1.167	0.750
Zapata	0.45	1.23	1.57	1.16	1.14	1.09	0.750	1.383	1.950	1.267	1.233	1.150
Coyoacan	1.14	1.4	1.36	1.35	1.52	1.34	1.233	1.667	1.600	1.583	1.867	1.567
Viveros		1.25	1.27	1.21	1.25	2.51		1.417	1.450	1.350	1.417	2.850
Quevedo		1.27	1.32	1.23	1.14	1.59		1.450	1.533	1.383	1.233	1.983
Copilco		1.51	1.49	1.46	1.55	2.14		1.850	1.817	1.767	1.917	2.233
Universidad		3.4	3.21	2.49	3.12	3.23		3.667	3.350	2.817	3.200	3.383

Tabla 17. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 15:00 a 17:59 horas.

Estación	Hora valle [min,s]						Hora valle [min,s]					
	15:00 a 17:59						15:00 a 17:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo		4.43	2.25	3.38	0.14	2.3		4.717	2.417	3.633	0.233	2.500
Potrero		2.47	1.58	2.41	0.06	1.56		2.783	1.967	2.683	0.100	1.933
La raza		3.42	1.47	4.29	0.07	1.16		3.700	1.783	4.483	0.117	1.267
Tlatelolco		2.02	1.07	3.12	0.04	1.28		2.033	1.117	3.200	0.067	1.467

Guerrero		1.31	1.31	1.37	0.05	1.49		1.517	1.517	1.617	0.083	1.817
Hidalgo	1.1	1.13	1.15	1.16	0.05	1.18	1.167	1.217	1.250	1.267	0.083	1.300
Juarez	0.45	1.14	0.48	0.48	0.06	1.1	0.750	1.233	0.800	0.800	0.100	1.167
Balderas	1.14	1.19	1.16	1.14	0.06	1.25	1.233	1.317	1.267	1.233	0.100	1.417
Niños Heroes	1.11	1.15		1.15	0.06	1.57	1.183	1.250		1.250	0.100	1.950
Hospital General	1.02	1.09		1.08	0.05	1.41	1.033	1.150		1.133	0.083	1.683
Centro médico	1.13	1.16		1.15	0.06	1.05	1.217	1.267		1.250	0.100	1.083
Etiopia	1.04	1.56		1.59	0.07	2.21	1.067	1.933		1.983	0.117	2.350
Eugenia	1.09	1.22		1.25	0.05	1.2	1.150	1.367		1.417	0.083	1.333
Division del norte	1.11	1.1		1.17	0.07	0.5	1.183	1.167		1.283	0.117	0.833
Zapata	0.47	1.14		1.19	0.06	1.14	0.783	1.233		1.317	0.100	1.233
Coyoacan	1.12	1.53		2	0.06	1.33	1.200	1.883		2.000	0.100	1.550
Viveros		1.27		1.3	0.07	2.03		1.450		1.500	0.117	2.050
Quevedo		1.17		1.18	0.1	1.5		1.283		1.300	0.167	1.833
Copilco		1.54		2	0.05	2.09		1.900		2.000	0.083	2.150
Universidad		2.26		2.32	0.06	2.59		2.433		2.533	0.100	2.983

Tabla 18. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 18:00 a 19:59 horas.

Estación	Hora pico [min,s]						Hora pico [min,s]					
	18:00 a 19:59						18:00 a 19:59					
Indios Verdes												
Deportivo 18 de marzo		4.35	3.18	3.44	3.5	3.22		4.583	3.300	3.733	3.833	3.367
Potrero		2.41	2.42	2.13	5.28	2.45		2.683	2.700	2.217	5.467	2.750
La raza		3.11	3.24	3.44	2.48	1.42		3.183	3.400	3.733	2.800	1.700
Tlatelolco		7.52	5.53	2.49	2.07	2.11		7.867	5.883	2.817	2.117	2.183
Guerrero	1.12	2.26	5.22	2.4	1.35	1.31	1.200	2.433	5.367	2.667	1.583	1.517
Hidalgo	0.47	1.43	1.48	2.35	1.17	1.09	0.783	1.717	1.800	2.583	1.283	1.150
Juarez	1.11	1.04	1.2	0.49	1.51	0.48	1.183	1.067	1.333	0.817	1.850	0.800
Balderas	1.09	2.47	1.57	1.14	1.43	1.19	1.150	2.783	1.950	1.233	1.717	1.317
Niños Heroes	1.04	2.27	1.11	1.06	1.12	1.11	1.067	2.450	1.183	1.100	1.200	1.183
Hospital General	1.14	2.07	1.04	2.22	1.06	1.02	1.233	2.117	1.067	2.367	1.100	1.033
Centro médico		1.18	1.11	1.15	1.4	1.11		1.300	1.183	1.250	1.667	1.183
Etiopia		1.54	1.52	1.54	1.57	1.29		1.900	1.867	1.900	1.950	1.483
Eugenia		1.22	1.22	1.25	1.57	1.22		1.367	1.367	1.417	1.950	1.367
Division del norte		1.08	1.06	1.18	1.35	1.12		1.133	1.100	1.300	1.583	1.200
Zapata		1.16	1.14	1.16	1.2	1.17		1.267	1.233	1.267	1.333	1.283
Coyoacan		1.55	1.56	2.1	1.48	1.36		1.917	1.933	2.167	1.800	1.600
Viveros		1.26	1.26	2.15	1.28	1.19		1.433	1.433	2.250	1.467	1.317
Quevedo		1.14	1.13	1.28	1.15	1.23		1.233	1.217	1.467	1.250	1.383
Copilco		1.52	1.54	1.59	1.55	1.47		1.867	1.900	1.983	1.917	1.783
Universidad		2.25	2.26	2.35	2.27	2.37		2.417	2.433	2.583	2.450	2.617

Tabla 19. Datos del tiempo pasados a minutos y segundos en un horario de 20:00 a 24:00 horas.

Estación	Hora valle [min,s]				Hora valle [min,s]			
	20:00 a 24:00				20:00 a 24:00			
Indios Verdes								
Deportivo 18 de marzo			3.07	2.53			3.117	2.883
Potrero			2.01	3.15			2.017	3.250
La raza			1.4	1.49			1.667	1.817
Tlatelolco			2.03	2.17			2.050	2.283
Guerrero	1.14	1.12	1.14	1.41	1.233	1.200	1.233	1.683
Hidalgo	0.45	0.45	1.12	1.16	0.750	0.750	1.200	1.267
Juarez	1.12	1.09	0.45	0.51	1.200	1.150	0.750	0.850
Balderas	1.1	1.08	1.09	4.46	1.167	1.133	1.150	4.767
Niños Heroes	1.04	1.03	1.06	4.37	1.067	1.050	1.100	4.617
Hospital General	5.12	1.12	1.02	1.08	5.200	1.200	1.033	1.133
Centro médico			1.39	1.18			1.650	1.300
Etiopia			1.56	2.02			1.933	2.033
Eugenia			1.25	1.3			1.417	1.500
Division del norte			1.07	1.13			1.117	1.217
Zapata			1.15	1.24			1.250	1.400
Coyoacan			1.38	1.49			1.633	1.817
Viveros			1.25	1.33			1.417	1.550
Quevedo			1.22	1.19			1.367	1.317
Copilco			1.56	1.57			1.933	1.950
Universidad			2.27	2.4			2.450	2.667

- Arranques

Para los tiempos de arranque del tren, se juntaron todos los tiempos, para evitar tener tanta información solo se mostrará un resumen de estos, aquí no se separó por horario, ya que el arranque era constante.

Tabla 19. Resumen de los tiempos de cada arranque en cada estación de la línea 3.

Promedio	0.13 seg
Desviación Estándar	0.10 seg
Max	1.42 min
Min	0.03

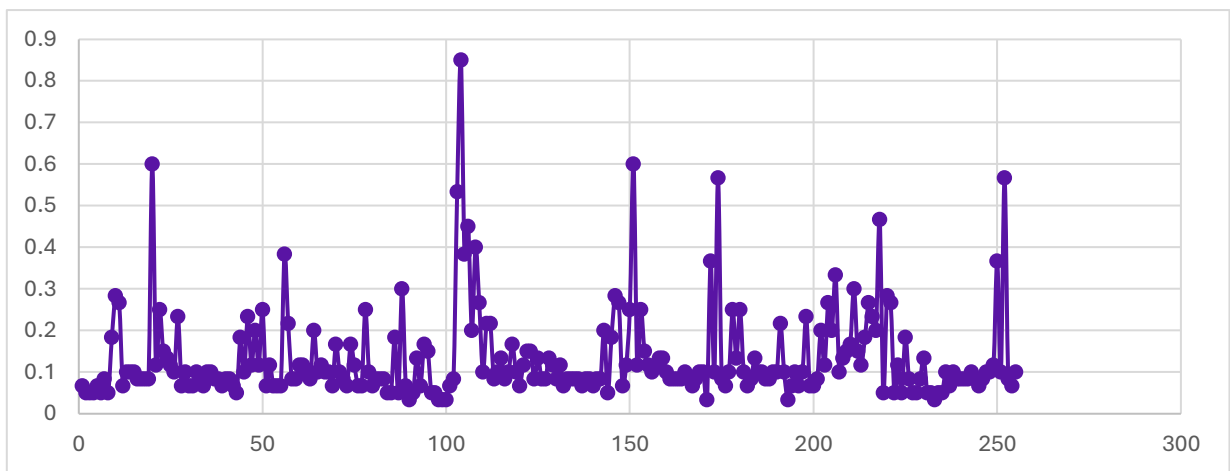


Figura 1. Gráfica de todos los arranques