EVALUACIÓN OPERATIVA DE COLAS EN LA ESTACIÓN AGUACATALA DEL METRO DE MEDELLÍN

Jesús D. Cantellón
Emanuel Serna
Juan E. Toro

Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingenierías
Universidad EAFIT
Carrera 49 #7 sur 50
Medellín, 050022, COLOMBIA

RESUMEN

El aumento en la oferta de servicios y las colas resultantes en la estación Aguacatala del Metro de Medellín resaltan la importancia de diseñar soluciones que aseguren una circulación eficiente, cómoda y segura para los usuarios. El estudio presentado en este documento propone abordar este desafío mediante la modelación del funcionamiento de la estación Aguacatala, centrándose específicamente en la gestión de las colas, utilizando la metodología de Simulación de Eventos Discretos (DES). Se evalúa el impacto del uso de los servicios disponibles en la estación mediante un escenario de referencia, midiendo los tiempos de espera y la longitud de las colas en la plataforma. Como resultado, se generan salidas visuales que tienen por objetivo identificar bajo que situaciones los tiempos de espera y las condiciones de aglomeración excederían ciertos umbrales.

1 INTRODUCCIÓN

Gran parte de la movilidad urbana en la ciudad de Medellín y sus alrededores se apoya en el funcionamiento del sistema ferroviario conocido como el Metro de Medellín. En la región se presentan patrones laborales y educativos que se ven reflejados en el flujo de personas que utiliza el sistema Metro. Bajo esa idea, se identificó la conformación de largas colas en zonas de atención de usuarios en la estación Aguacatala durante las denominadas horas pico. Se realizó un estudio de colas con el fin de medir la eficiencia del servicio en las diferentes zonas de espera presentes en la estación Aguacatala. Durante la realización de este estudio se buscó identificar posibles oportunidades de mejora, optimizar la asignación de recursos y planificar futuros desarrollos con la intención de evaluar correctamente el rendimiento y la calidad de los servicios. Dado que los procesos de venta de la estación se pueden describir con una serie de eventos separados y discretos, que ocurren a lo largo de cierto tiempo, y que alteran el estado del sistema se utilizó Simulación de Eventos Discretos (DES) para modelar el flujo de personas en la estación Aguacatala. En ese orden de ideas, para entender las dinámicas operativas de la estación Aguacatala, se plantea la implementación de un modelo de simulación de eventos discretos utilizando la herramienta `Simul8`.

2 MODELAMIENTO CONCEPTUAL

2.1 Definición del problema

El problema por modelar consiste en la formación de largas colas en la estación Aguacatala del Metro de Medellín, especialmente, durante las horas pico de la mañana y la tarde en los días laborales (lunes a viernes). Esta congestión afecta negativamente la experiencia de los usuarios y la eficiencia del sistema de

transporte masivo. La distribución espacial de los diferentes servicios dentro de la estación y la cantidad de recursos destinados para estos servicios pueden influir negativa o positivamente en la formación de filas. Por lo tanto, es crucial analizar cómo esta distribución y asignación de recursos influye en la dinámica de las colas y buscar soluciones para mejorar el flujo de pasajeros y la operatividad de la estación.

Entre los diversos servicios presentes en la estación Aguacatala se destacan:

- Puntos de venta: En estos habitáculos se realiza la venta de tiquetes y recarga del medio de pago (tarjeta cívica. Los informadores vendedores, cuya cantidad varía según el área y la hora de servicio, son las personas encargadas de manejar estas transacciones.
- Barrera de torniquetes: Este mecanismo regula el flujo de ingreso y salida de la estación. Los torniquetes pueden tener funciones específicas de entrada o salida, o ambas, según la necesidad.
- Máquinas de recarga: Estas máquinas complementan o sustituyen a los puntos de venta en la recarga del medio de pago. Hay máquinas de recarga con devolución y sin devolución.
- Cajero automático: Proporcionan servicios financieros básicos como la dispensación de dinero en efectivo y otras transacciones financieras, ofreciendo a los usuarios una solución conveniente para sus necesidades económicas mientras están en la estación.

La Figura 1 presenta un diagrama de la estación Aguacatala en el cual se pueden apreciar los diferentes servicios disponibles en la estación y la distribución espacial de los mismos.

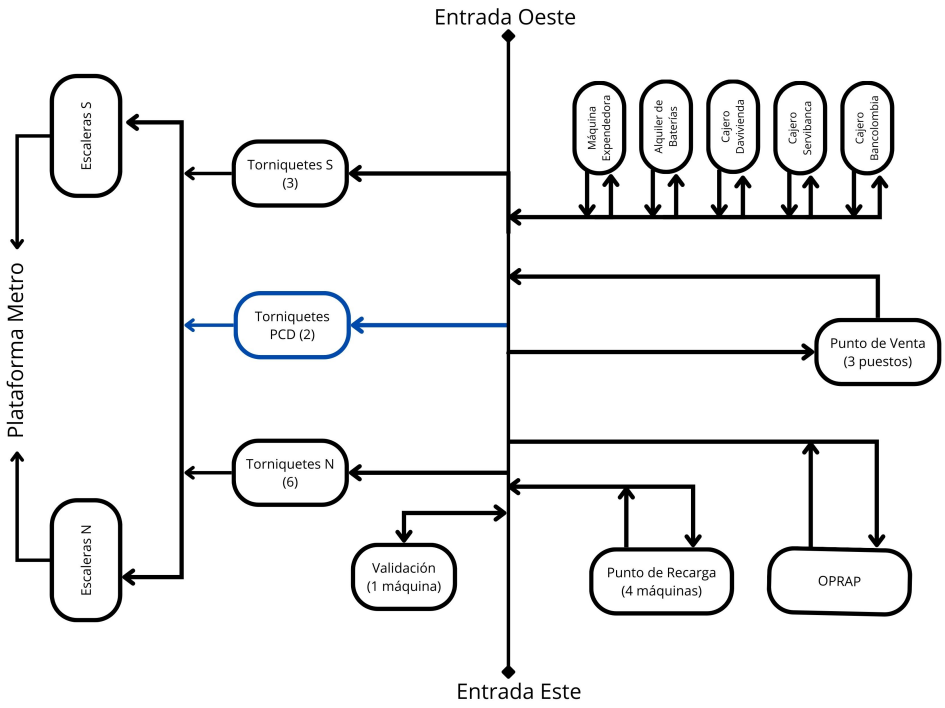


Figura 1: Diagrama de actividades de la estación Aguacatala.

2.2 Metodología por Simulación de Eventos Discretos

La simulación de eventos discretos se presenta como una herramienta esencial para analizar y mejorar la eficiencia de sistemas complejos como la estación de Metro Aguacatala. A través de DES, se puede

modelar con precisión el comportamiento dinámico de las colas y filas que se forman debido a la interacción entre los usuarios y los servicios de la estación. Esta técnica permite incorporar variaciones estocásticas y condiciones específicas del entorno, proporcionando una visión detallada y realista del desempeño del sistema bajo deferentes escenarios. Además, mediante la simulación, es posible experimentar con diversas distribuciones de servicios y asignaciones de recursos sin interrumpir las operaciones reales, evaluando de manera segura y controlada el impacto de diversas estrategias de mejora en la formación y duración de las colas.

2.3 Objetivos de la modelación

El modelo de simulación tiene como propósito analizar, comprender y reducir la formación de colas en la estación Aguacatala del Metro de Medellín, específicamente en relación con la distribución de servicios y la asignación de recursos. Esto permitirá identificar áreas de congestión y evaluar el impacto de diferentes estrategias de operación en el flujo del sistema.

Los objetivos específicos son:

1. Estudiar qué configuración de servicios reduce en un 5% el tiempo máximo de los usuarios en el sistema.
2. Analizar qué servicios están generando colas numerosas con el fin de disminuir la longitud máxima de estas un 10%
3. Determinar qué cantidad de servicios específicos reducen el tiempo promedio en el sistema un 2%

2.4 Entradas y salidas del modelo

Factores Experimentales (descritos en la Tabla 1)

- Distribución espacial de los servicios.
- Número de servicios disponibles.
- Disponibilidad de recursos.

Respuestas (para determinar si se cumplen o no los objetivos propuestos)

- Boxplots del tiempo máximo en el sistema en función de la cantidad de servicios disponibles.
- Gráfico de efectos principales con los diferentes factores experimentales para el tiempo máximo en el sistema.
- Gráficos de línea de los tiempos máximos en el sistema de todos los usuarios en diferentes simulaciones.
- Gráficos de línea de las longitudes de colas en los diferentes servicios.
- Número de servicios para identificar con que cantidad no se cumplen los objetivos propuestos.

2.5 Contenido del modelo

2.5.1 Alcance

El alcance del modelo se presenta en la Tabla 1.

2.5.2 Nivel de detalle

El nivel de detalle del modelo está descrito en las Tablas 2 y 3.

Tabla 1: Descripción del alcance del modelo de simulación.

Componente	Incluido/Excluido	Justificación
Usuarios que ingresan a la estación	Incluido	Flujo a través del sistema metro.
Usuarios que salen de la estación	Excluido	No se modelará a las personas que salgan de los trenes.
Punto de venta	Incluido	Factor experimental, actividad principal del sistema.
Torniquetes	Incluido	Factor experimental.
Máquinas de Recarga	Incluido	Factor experimental.
Máquina de Validación	Incluido	Factor experimental.
Cajeros Automáticos	Incluido	Factor experimental
Corresponsal Bancario (OPRAP)	Incluido	Factor experimental
Máquina Expendedora	Excluido	Actualmente fuera de servicio.
Alquiler de Baterías	Excluido	No se utiliza lo suficiente, no afecta al sistema en general.
Parqueadero de bicicletas	Excluido	Está ubicado en el segundo piso de la estación.
Abordaje	Excluido	Considerándola como la salida del modelo.
Colas de Servicios incluidos	Incluido	Necesario para responder al tiempo de espera y al tamaño de la cola.
Colas de otros servicios	Excluido	Colas pequeñas que no influyen en el comportamiento del sistema.
Informador vendedor	Incluido	«Usado» en puntos de venta, necesario para turnos de servicio.
Operador de estación	Excluido	Su función la puede reemplazar el modelador.
Policía / Vigilancia	Excluido	No participa en las actividades del sistema.

Tabla 2: Nivel de detalle presentado por componente del sistema, descripción de este, estado de excluido o incluido y comentarios justificando el estado.

Componente	Detalle	Incluido/Excluido	Comentarios
Usuario	Tiempos entre llegadas de usuarios, variando el radio por hora del día.	Incluido	Modelado como una distribución que cambia de parámetros cada ciertas horas. Se requiere para el flujo de usuarios dentro del sistema metro.
	Tiempos entre llegadas de usuarios, variando el radio por día de la semana.	Excluido	No será considerado porque solo se modelan los días laborales y se asume por simplicidad que estos tiempos entre llegadas son los mismos para todos todos los días.
	Tipo de usuario que utiliza algún servicio del metro.	Excluido	No se segregará a los usuarios debido a que, para efectos practicos, no hay diferencias significativas en el comportamiento de los diferentes perfiles que influyan en el sistema.
	Destino del usuario: Entra al sistema Metro o sale del sistema Metro.	Excluido	Por razones de tiempo, recursos y dificultad no se consideran a los usuarios que salen de la estación (del metro) sino solo los que entran a la estación.
Informador Vendedor	Número de informadores vendedores y turnos.	Incluido	Modelado basándonos en los datos proporcionados por el Metro. Se necesita un mejor análisis de ocupación. Factor experimental.
Punto de Venta	Cantidad	Incluido	Modelado desde el número real de puestos en el punto de venta. Factor experimental para analizar el flujo a través de ellos.
	Tasa de uso por hora del día.	Incluido	Se requiere para el flujo de usuarios en el punto de venta.
	Tasa de uso por día de la semana.	Excluido	No se considerará esto porque este flujo de llegada es igual para todos los días de la semana.
	Ubicación	Incluido	Factor experimental para analizar el flujo a través de este.
	Cola	Incluido	Interfiere con el flujo del sistema.
Torniquetes	Cantidad	Incluido	Modelado desde el número real de los tipos de torniquetes. Factor experimental para analizar el flujo a través de ellos.
	Tasa de uso por hora del día.	Incluido	Se requiere para el flujo de usuarios en los torniquetes.
	Tasa de uso por día de la semana.	Excluido	No se considerará esto porque este flujo de llegada es igual para todos los días de la semana.
	Ubicación	Incluido	Factor experimental para analizar el flujo a través de ellos.
	Cola	Incluido	Interfiere con el flujo del sistema.

Tabla 3: Continuación de la Tabla 2.

Componente	Detalle	Incluido/Excluido	Comentarios
Máquinas de Recarga	Cantidad	Incluido	Modelado desde el número real de máquinas. Factor experimental para analizar el flujo a través de ellas.
	Tasa de uso por hora del día.	Incluido	Se requiere para el flujo de usuarios en las máquinas de recarga.
	Tasa de uso por día de la semana.	Excluido	Se excluirá porque el comportamiento de estas máquinas en todos los días de semana es el mismo.
	Ubicación	Incluido	Factor experimental para analizar el flujo a través de ellas.
	Cola	Incluido	Interfiere con el flujo del sistema.
Máquina de Validación	Cantidad	Incluido	Modelado desde el número real de máquinas. Factor experimental para analizar el flujo a través de ellas.
	Tasa de uso de por hora del día.	Incluido	Se requiere para el flujo de usuarios en las máquinas de validación.
	Tasa de uso por día de la semana.	Excluido	Se excluirá porque el comportamiento de estas máquinas en todos los días de semana es el mismo.
	Ubicación	Incluido	Factor experimental para analizar el flujo a través de ellas.
	Colas	Incluido	Interfiere con el flujo del sistema.
Cajeros Automáticos	Cantidad	Incluído	A pesar de que en la estación se encuentran 3 cajeros automáticos, solo se tiene en cuenta el más utilizado.
	Tasa de uso por hora del día.	Incluido	Se requiere para analizar la evolución de los comportamientos de los procesos del cajero automático por día.
	Tasa de uso por día de la semana.	Excluido	Se excluirá porque el comportamiento del cajero en todos los días de semana es el mismo.
	Ubicación	Incluido	Factor experimental para analizar el flujo a través de ellos.
	Cola	Incluido	Interfiere con el flujo del sistema.
OPRAP	Tasa de uso por hora del día.	Incluido	Se requiere para el flujo de usuarios en el OPRAP.
	Tasa de uso por día de la semana.	Excluido	No se incluirá porque para efectos practicos el flujo de llegadas de los usuarios al OPRAP es el mismo para todos los dias de semana.
	Ubicación	Excluido	Se asumirá fijo y no se considerará como factor experimental.
	Cola	Incluido	Interfiere con el flujo del sistema.

2.5.3 Supuestos

- Todos los pasajeros siguen un comportamiento predecible y racional al entrar, salir y moverse dentro de la estación.
- Las taquillas y los cajeros siempre tienen dinero para devolver.
- Las llegadas al sistema siempre siguen una distribución exponencial con parámetros que varían cada media hora.
- El comportamiento del modelo es el mismo para todos los días de simulación (entre lunes y viernes).
- Los dos puntos de atención del OPRAP están disponibles de forma continua durante el tiempo que esté abierto dicho local.
- El 65% de los usuarios ingresan a la estación por la entrada Este mientras que el 35% restante por la entrada Oeste.
- Durante el día se mantiene la misma disciplina de enrutamiento para todos los usuarios.

2.5.4 Simplificaciones

- Solo se tiene en cuenta el flujo de personas que entra a la estación.
- Eventos externos de la ciudad, como el clima, conciertos o partidos no se tienen en cuenta para el modelo.
- Se considera que todos los usuarios tienen la misma velocidad de desplazamiento, ocupan el mismo espacio y pueden acceder fácilmente a cualquier parte de la estación.
- El personal del metro como operadores de estación, auxiliares o vigilancia no influye en el flujo del modelo.
- No hay límite de personas que pueden esperar en las filas de los servicios.
- Todos los usuarios que entran al sistema tienen como destino pasar los torniquetes.
- No hay obstáculos o interferencias significativas que impidan el movimiento fluido de los pasajeros dentro de la estación.
- Todos los usuarios que utilizan algún servicio bancario dentro de la estación, posteriormente se dirigen al punto de venta o a la máquina de recarga.
- Se separa la actividad de recarga por máquina en dos actividades distintas: Máquina de recarga con devolución y la otra sin devolución.
- De los tres cajeros automáticos presentes en la estación solo se modela el único que genera colas (Bancolombia).

3 ANTECEDENTES

A continuación se describen brevemente dos artículos que utilizan DES para resolver problemas simulares al presentado en este estudio.

3.1 A discrete-event public transportation simulation model to evaluate travel demand management impacts on waiting times and crowding conditions

Soza-Parra et al. (2023) desarrollan una herramienta de simulación para evaluar el impacto de diversas medidas de gestión de la demanda y oferta de transporte público. Se enfocan en el contexto de la pandemia de COVID-19 y el metro de Santiago de Chile como estudio de caso. Analizan cómo diferentes escenarios afectan los tiempos de espera y las condiciones de aglomeración en vehículos y plataformas. Centran sus resultados en analizar los tiempos máximos y promedios de espera en las horas pico de manera detallada, lo cual puede ser una perspectiva útil para enfocar el análisis operativo de la estación Aguacatala del metro de Medellín.

3.2 Modeling and Simulation of Metro Transit Station Walkway as a State-dependent Queuing System based on the Phase-Type Distribution

El artículo de Khattak et al. (2016). proporciona valiosas metodologías para modelar y simular el comportamiento de estaciones de tren mediante un sistema de colas dependiente del estado basado en la distribución de Tipo-Fase (PH). Utiliza DES para analizar el flujo de pasajeros y evaluar el rendimiento de las instalaciones, comparando los resultados con modelos analíticos para verificar su precisión. Proporciona antecedentes matemáticos sobre la distribución PH y ofrece ideas para modelar el proceso de llegada de pasajeros y el tiempo de servicio en un sistema de colas. En resumen, estas metodologías pueden ser aplicadas eficazmente para modelar las colas en la estación Aguacatala del Metro de Medellín.

4 DATOS DEL MODELO

Todos los tiempos están dados en segundos a menos que se indique lo contrario.

Se realiza un análisis exploratorio de los datos para comparar los tiempos entre llegadas de los 5 días de la semana. La gráfica que compara el número de llegadas por hora de lunes a viernes se muestra en la Figura 2. De esta se observa que los tiempos entre llegadas no se ven afectados por el día pero sí dependen de la hora.

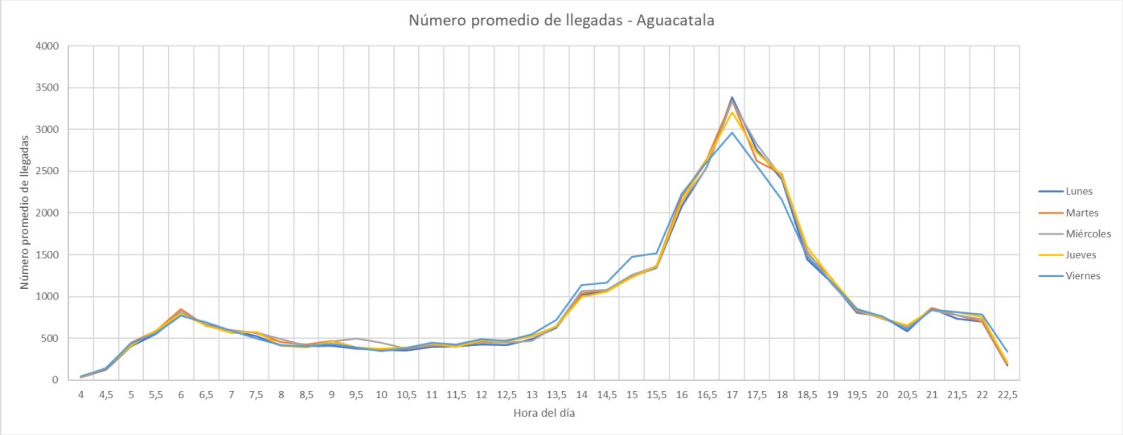


Figura 2: Número promedio de llegadas por cada media hora para los días laborales.

La Tabla 4 muestra las tasas medias de llegada y tiempos entre llegadas por hora del día de la primera semana de febrero y marzo. Los datos de tiempos entre llegadas son utilizados como media de una distribución exponencial negativa.

Note que el horario de funcionamiento de la estación es: 04:00 - 23:00.

4.1 Pruebas de independencia, correlación y homogeneidad

Para evaluar la independencia de los datos tomados, se generaron diagramas de dispersión y de autocorrelación para los tiempos de servicio de cada una de las actividades del sistema. Los resultados presentados en las Figuras 3 y 4 indican la presencia de datos sin correlación (independientes).

Como algunos de los datos fueron tomados en distintos intervalos de tiempo o, por ejemplo, se tomaron tiempos de servicio en el punto de venta pero con distintos operadores, es necesario evaluar la homogeneidad de los datos para asegurarse de que se puedan unir para modelar una misma actividad. Se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para comprobar la homogeneidad de los datos de tiempos de servicio de tres actividades: Torniquetes, punto de venta y máquina de validación.

Tabla 4: Tasas de llegada y tiempo entre llegadas de la estación Aguacatala.

Hora del día	(a) Tasa media de llegada por 30 minutos	(b) Tiempo promedio entre llegadas
04:00-04:30	34.3	52.48
04:30-05:00	134.2	13.41
05:00-05:30	429.6	4.19
05:30-06:00	575.4	3.13
06:00-06:30	805.8	2.23
06:30-07:00	662.3	2.72
07:00-07:30	587.8	3.06
07:30-08:00	547	3.29
08:00-08:30	437.9	4.11
08:30-09:00	408-8	4.40
09:00-09:30	447.4	4.02
09:30-10:00	409.8	4.39
10:00-10:30	378.3	4.76
10:30-11:00	375.5	4.79
11:00-11:30	423.2	4.25
11:30-12:00	412	4.37
12:00-12:30	458.2	3.93
12:30-13:00	456.2	3.95
13:00-13:30	513.6	3.50
13:30-14:00	656.8	2.74
14:00-14:30	1049.2	1.72
14:30-15:00	1087.7	1.65
15:00-15:30	1286.4	1.40
15:30-16:00	1390	1.29
16:00-16:30	2152.5	0.84
16:30-17:00	2598.5	0.69
17:00-17:30	3248.8	0.55
17:30-18:00	2700.3	0.66
18:00-18:30	2379.9	1.76
18:30-19:00	1517	1.19
19:00-19:30	1184.3	1.52
19:30-20:00	833	2.16
20:00-20:30	751.9	2.39
20:30-21:00	618.9	2.91
21:00-21:30	850.1	2.12
21:30-22:00	782.2	2.30
22:00-22:30	732.8	2.46
22:30-23:00	223.2	8.06

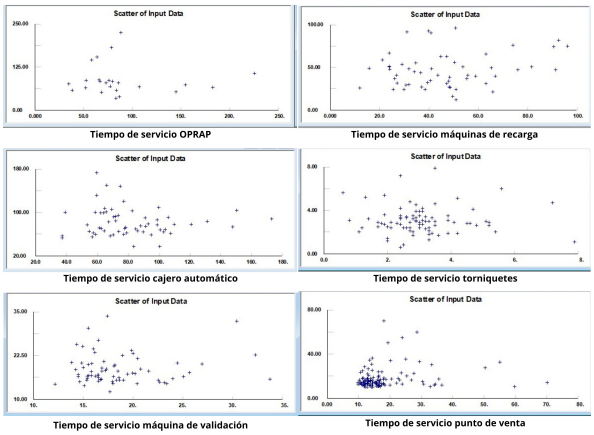


Figura 3: Diagramas de dispersión para los tiempos de servicio de las actividades dentro del sistema.

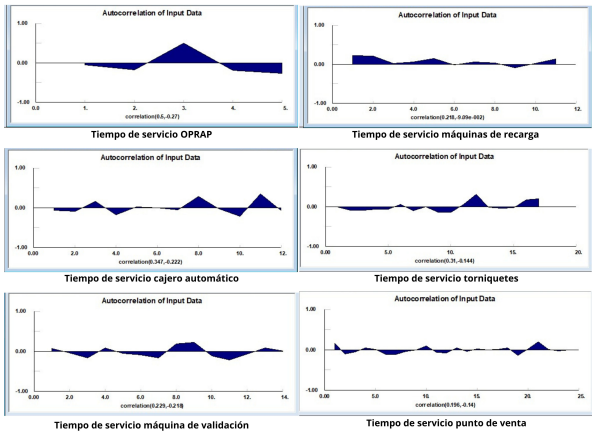


Figura 4: Diagramas de autocorrelación para los tiempos de servicio de las actividades dentro del sistema.

La prueba Kruskal-Wallis va de la siguiente manera:

- H_0: Las muestras provienen de la misma población.
- H_1: Al menos una de las muestras presenta observaciones mayores a las demás

Si al realizar la prueba, el p-valor es menor a 0.05, se rechaza H_0 y, por lo tanto, las muestras deben modelarse por separado. Los resultados de la prueba Kruskal-Wallis para las tres actividades mencionadas anteriormente se observan en la Tabla 5. Estos revelan que las muestras provienen de la misma población y pueden modelarse sin ningún problema.

Tabla 5: Resultados de la prueba de homogeneidad Kruskal-Wallis para muestras de diferentes actividades.

Tiempos de servicio	Estadístico de prueba Kruskal-Wallis	Valor-P
Maquina de validación	0.74	0.39
Torniquetes	3.34	0.07
Punto de venta	1.76	0.19

4.2 Pruebas de bondad de ajuste

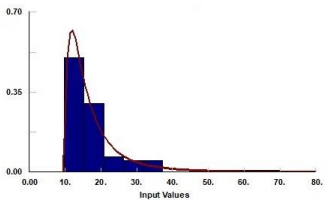
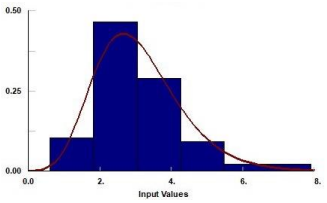
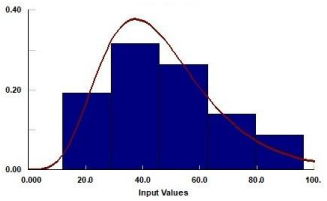
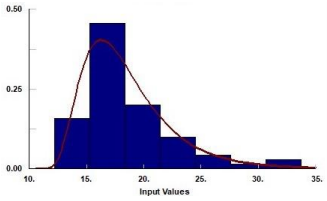
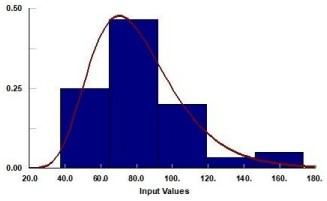
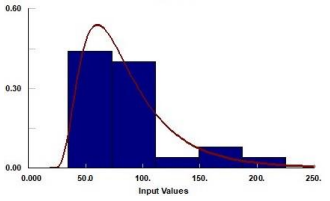
Una vez estudiados los datos de entrada del modelo, se desea ajustarlos a una distribución teórica con el fin de facilitar su implementación dentro del modelo. Para ajustar los datos a distribuciones teóricas se utilizan histogramas, se estiman los parámetros con ayuda de StatFit y, finalmente, se realizan pruebas de bondad de ajuste para docimar la hipótesis de que los datos de entrada pueden aproximarse a cierta distribución de probabilidad.

Las pruebas de bondad de ajuste realizada para comprobar las distribuciones de los datos fueron:

- Kolmogorov-Smirnov
- Anderson-Darling

Los resultados de dichas pruebas, junto con los histogramas y las distribuciones de probabilidad que más se ajustan a los diferentes conjuntos de datos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Distribuciones que mejor se ajustan a los tiempos de servicio dentro de la estación.

Nombre de la variable	Tamaño de muestra	Distribución que mejor se ajusta	Estadístico y valor-p	Estadísticas descriptivas	Histograma
Tiempo de servicio en punto de venta	120	Lognormal	Kolmogorov Smirnov VP 0.555 Anderson-Darling VP 0.813	descriptive statistics data points 120 minimum 9.79 maximum 70.03 mean 18.0988 median 15.11 mode 12.31 standard deviation 9.81748 variance 96.383 coefficient of variation 54.2437 skewness 2.88397 kurtosis 9.77635	
Tiempo de servicio en torni-quetes	86	Lognormal	Kolmogorov Smirnov VP 0.246 Anderson-Darling VP 0.428	descriptive statistics data points 86 minimum 0.6 maximum 7.9 mean 3.10581 median 2.9 mode 2.75 standard deviation 1.26764 variance 1.60691 coefficient of variation 40.815 skewness 1.18405 kurtosis 2.46006	
Tiempo de servicio en máquinas de recarga	57	Lognormal	Kolmogorov Smirnov VP 0.958 Anderson-Darling VP 0.985	descriptive statistics data points 57 minimum 11.96 maximum 96.2 mean 46.8988 median 44.86 mode 47.97 standard deviation 20.2764 variance 411.13 coefficient of variation 43.2343 skewness 0.717291 kurtosis -0.109546	
Tiempo de servicio en máquina de vali-dación	70	Lognormal	Kolmogorov Smirnov VP 0.924 Anderson-Darling VP 0.856	descriptive statistics data points 70 minimum 12.18 maximum 33.72 mean 18.6064 median 17.385 mode 16.02 standard deviation 4.23049 variance 17.8971 coefficient of variation 22.7367 skewness 1.6285 kurtosis 2.79147	
Tiempo de servicio en cajero au-tomático	60	Lognormal	Kolmogorov Smirnov VP 0.93 Anderson-Darling VP 0.844	descriptive statistics data points 60 minimum 37.25 maximum 173.2 mean 81.4745 median 76. mode 62.35 standard deviation 26.4749 variance 700.921 coefficient of variation 32.4947 skewness 1.1963 kurtosis 1.93996	
Tiempo de servicio en OPRAP	25	Lognormal	Kolmogorov Smirnov VP 0.364 Anderson-Darling VP 0.689	descriptive statistics data points 25 minimum 34.7 maximum 225. mean 87.2536 median 77.1 mode 80.85 standard deviation 44.6966 variance 1997.79 coefficient of variation 51.2261 skewness 1.78667 kurtosis 2.5946	

Se tuvieron en cuenta los siguientes datos para incluirlos dentro modelo:

1. **Llegadas**
   - Número de entradas: 2
   - Tiempo entre llegadas:
     (a) Entrada Este: Exponencial (promedio = $b/0.65$)
     (b) Entrada Oeste: Exponencial (promedio = $b/0.35$)
   - Enrutamiento (Hacia donde se dirigen inicialmente los usuarios):
     (a) Torniquetes N: 69.2%
     (b) Torniquetes S: 16.1%
     (c) Punto de venta: 8%
     (d) Máquinas de recargas: 2.3%
     (e) Máquina de validación: 2.3%
     (f) Torniquetes PCD: 0.8%
     (g) OPRAP: Inicialmente 0%, a partir de las 07:00 0.56%
     (h) Cajero automático: 1.3% - %OPRAP
2. **Punto de venta**
   - Número de puestos: 3
   - Tiempo de servicio: Lognormal (promedio = 18.0988, desviación estándar = 9.81748)
   - Enrutamiento:
     (a) Torniquetes N: 79%
     (b) Torniquetes S: 19.1%
     (c) Torniquetes PCD: 1.9%
3. **Torniquetes**
   - Número de torniquetes: 11
   - Tiempo de servicio: Lognormal (promedio = 3.10581, desviación estándar = 1.26764)
   - Fallos:
     (a) Tiempo entre fallos: Exponencial (promedio = 6171)
     (b) Tiempo de reparación: Exponencial (promedio = 30)
4. **Máquinas de recarga**
   - Número de máquinas: 4
   - Tiempo de servicio: Lognormal (promedio = 46.8988, desviación estándar = 20.2764)
   - Enrutamiento:
     (a) Torniquetes N: 77.3%
     (b) Torniquetes S: 18.6%
     (c) Punto de venta: 2.2%
     (d) Torniquetes PCD: 1.9%
5. **Máquina de validación**
   - Número de máquinas: 1
   - Tiempo de servicio: Lognormal (promedio = 18.6064, desviación estándar = 4.23049)
   - Enrutamiento:
     (a) Torniquetes N: 75%
     (b) Punto de venta: 10.6%
     (c) Torniquetes S: 10%
     (d) Máquinas de recarga: 4.4%
6. **Cajero Automático**
   - Número de cajeros: 1
   - Tiempo de servicio: Lognormal (promedio = 81.4745, desviación estándar = 26.4749)

7. **OPRAP**
   - Número de puestos: 2
   - Tiempo de servicio: Lognormal (promedio = 87.2536, desviación estándar = 44.6966)
   - Horario de funcionamiento: 07:00 - 19:00
   - Enrutamiento:
     (a) Máquinas de recarga: 90%
     (b) Punto de venta: 10%
8. **Colas**
   - Capacidad: Ilimitada
   - Prioridad: First-In First-Out
9. **Informador Vendedor**
   - Cantidad máxima: 3
   - Turnos:
     (a) 04:00 - 13:20: 2 funcionarios
     (b) 13:20 - 14:10: 1 funcionario
     (c) 14:10 - 22:15: 3 funcionarios
     (d) 22:15 - 23:30: 2 funcionarios

5 IMPLEMENTACIÓN EN PLATAFORMA DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación diseñado para la estación Aguacatala tiene características específicas para representar el funcionamiento operativo en la plataforma. En primer lugar, el tiempo se simula en segundos y la simulación se lleva a cabo de lunes a viernes, siguiendo los horarios establecidos para la estación. Se han tenido en cuenta los horarios de trabajo del personal del punto de venta y el horario de atención del OPRAP. Además, el modelo se centra exclusivamente en el flujo de personas que ingresan por las entradas este y oeste de la estación. Todos los servicios de la estación considerados se han modelado como actividades con sus respectivas colas. La implementación del modelo en `Simul8` se puede ver en las Figuras 5 y 6.

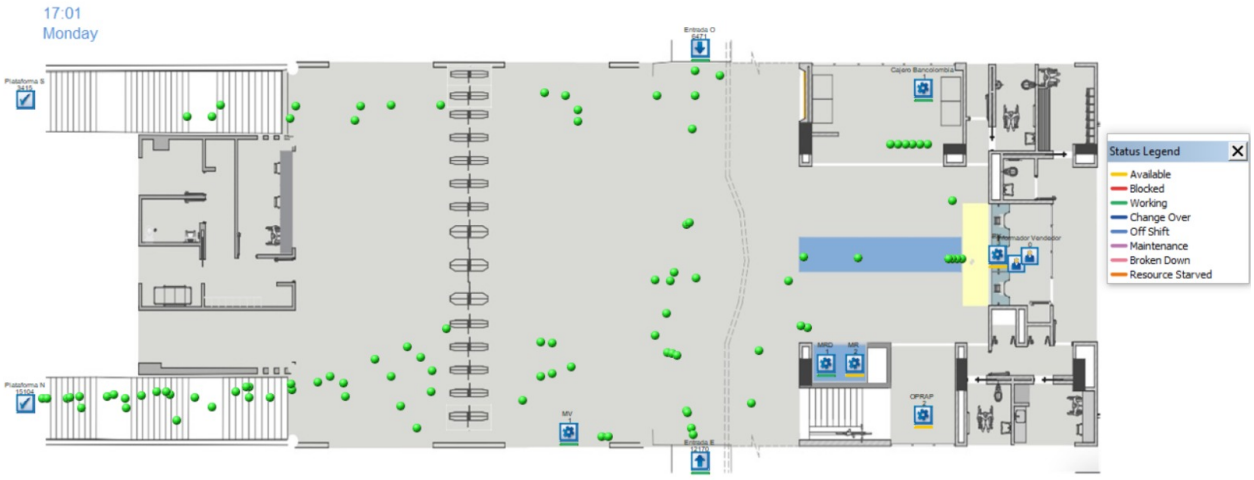


Figura 5: Modelo en Simul8 durante una simulación de la hora pico.

La Figura 6 muestra las diversas conexiones que existen entre las actividades y las colas del modelo. En el problema presentado resultan de gran importancia los tiempos y distancias de recorrido, por lo cual, es necesario establecer tiempos estándares de viaje para todas las conexiones del modelo. La Figura 7 muestra la matriz de tiempos de viaje para dichas conexiones, los datos presentados, fueron obtenidos experimentalmente dentro de la estación.

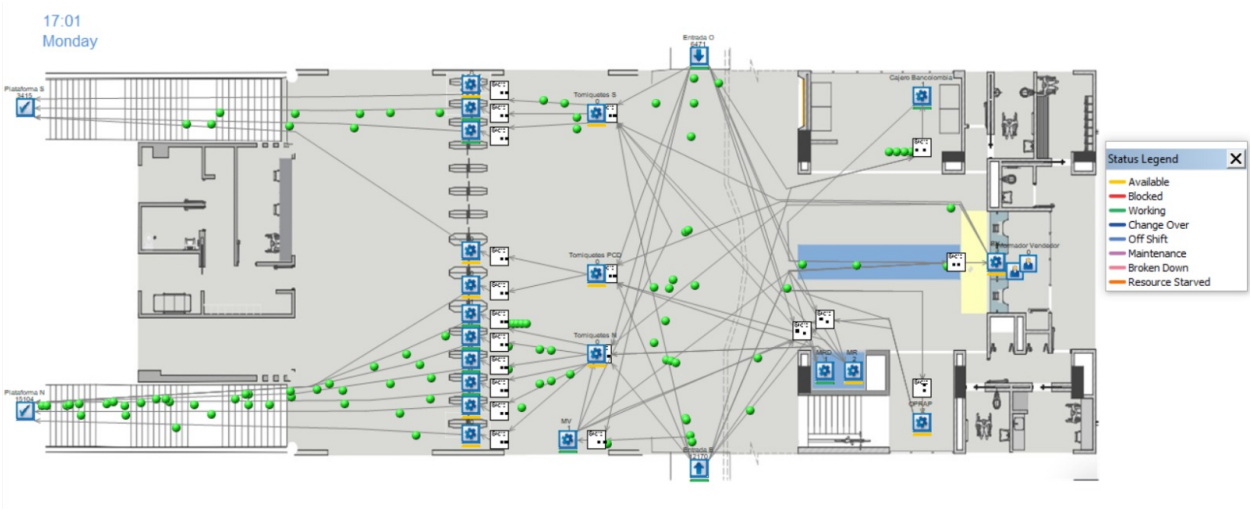


Figura 6: Modelo en `Simul8` durante una simulación de la hora pico con recorridos.

From\To	Cola Bancol	Cola MR	Cola MRD	Cola MV	Cola PAS1	Cola PAS2	Cola Torniq	Cola Torniq	Cola Torniq	Cola TQ1	Cola TQ2	Cola TQ4	Cola TQ5	Cola TQ6	Cola TQ7	Cola TQ8	Cola TQ9	ColaZ_OPR	ColaZ_PV	Cola_TQ3	Plataforma	Plataforma
Cajero Ban	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	-	-	-
Entrada E	15	6	6	5	-	-	9	12	15	-	-	-	-	-	-	-	-	9	30	-	-	-
Entrada O	7	10	10	18	-	-	15	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-	14	30	-	-	-
MR	-	-	-	-	-	-	8	10	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-
MRD	-	-	-	-	-	-	8	10	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	-	-	-
MV	-	9	9	-	-	-	0	-	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33	-	-	-
OPRAP	-	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-	-
PAS1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	-
PAS2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35
PV	-	-	-	-	-	-	17	14	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torniquetes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	6	5	5	6	-	-	-	-	-	6	-	-
Torniquetes	-	-	-	-	6	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torniquetes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	6	-	-	-	-	-
TQ1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-
TQ2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-
TQ3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22	-
TQ4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	-
TQ5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	-
TQ6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26	-
TQ7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23
TQ8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22
TQ9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22

Figura 7: Matriz de tiempos de viaje generada por `Simul8`.

6 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

6.1 Naturaleza del modelo

El modelo implementado de la estación Aguacatala simula un sistema con terminación. En ese orden de ideas, el modelo simula un día de operación (04:00-23:30) en total 19.5 horas.

6.2 Naturaleza de las salidas del modelo

Los resultados más significativos de la modelación son los siguientes: los tiempos máximos y promedios en el sistema para los usuarios en dirección norte y sur; los tiempos máximos y promedios en cola de los usuarios en los diferentes servicios presentes en la estación; y el tamaño máximo y promedio de las colas formadas en los diversos servicios de la estación.

6.3 Manejo de sesgos iniciales

El modelo inicia su simulación con condiciones realistas, lo que significa que no hay personas presentes en el sistema antes de la apertura de la estación. Por lo tanto, no es necesario considerar un periodo de calentamiento del modelo.

6.4 Número de corridas

El número de corridas estimado a través de `Simul8` se puede ver en la Figura 8

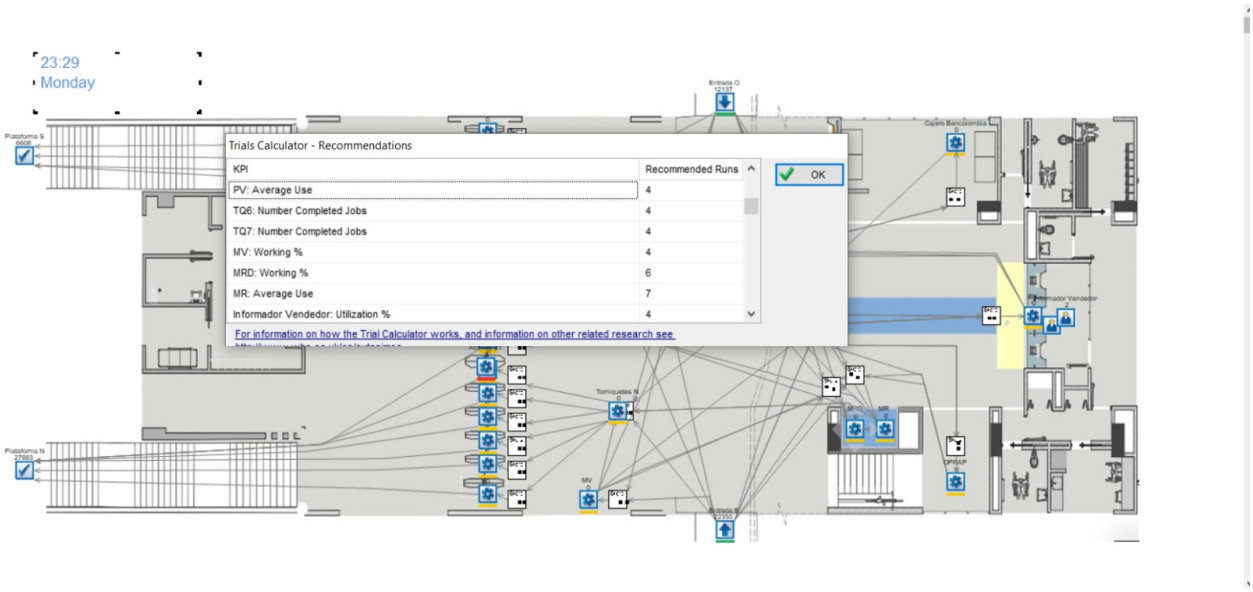


Figura 8: Número de corridas calculado con Trial Calculator de `Simul8`.

6.5 Resultados

Para reportar los resultados, se utilizaron las salidas del modelo propuestas en la Sección 2.4. En las Figuras 9, 10 y 11 están descritos los resultados más significativos tras las diferentes simulaciones.

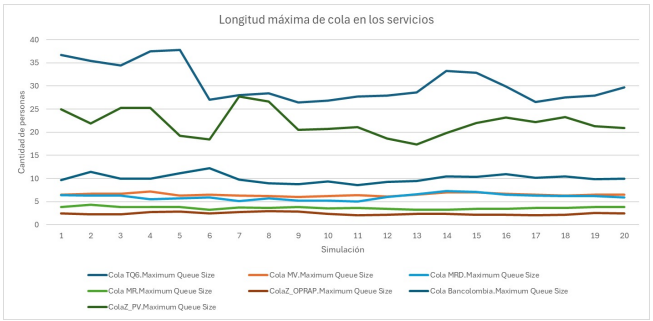


Figura 9: Gráfico de línea de la longitud máxima de la cola en los servicios en diferentes simulaciones.

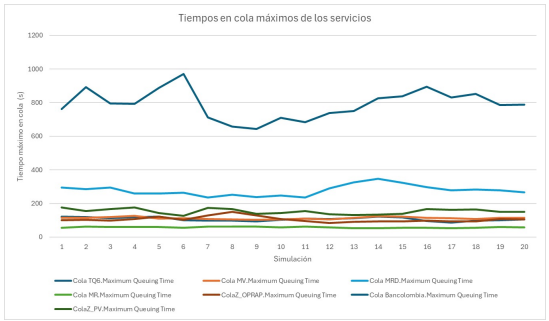


Figura 10: Gráfico de línea del tiempo máximo en colas de la variedad de servicios en diferentes simulaciones.

En la Figura 9 se puede ver que las colas más largas en hora pico son las que se forman en el cajero y en el punto de venta. Sin embargo, en la Figura 10 se puede ver que el máximo tiempo cola de los

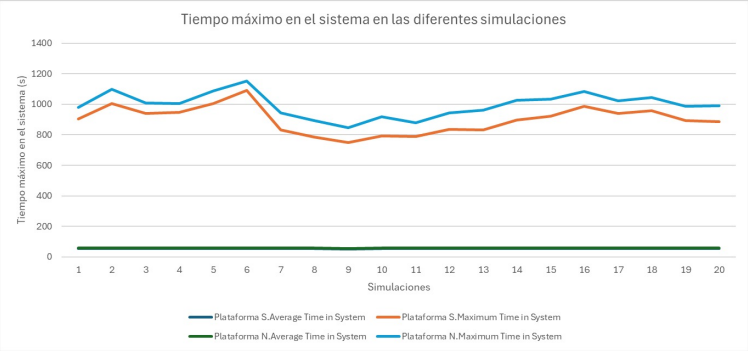


Figura 11: Gráfico de línea del tiempo máximo y promedio en el sistema de los usuarios en diferentes simulaciones.

usuarios se da esperando por ser atendidos en el cajero y en la máquina de recarga con devolución. Estos dos servicios son claves para entender el funcionamiento de la estación y variar su cantidad disponibles podría tener un impacto positivo en el sistema.

Por otro lado, en la Figura 11 se puede ver que los tiempos máximos en el sistema están muy alejados de los tiempos promedios lo que podría reflejar el impacto de la hora pico en la congestión de la estación. Note que los usuarios dirección norte tienen tiempos máximos levemente mayores a los que se dirigen a la estación sur, un fenómeno que realmente sucede la estación Aguacatala.

7 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Para realizar la validación del modelo se analiza la precisión del mismo referente a algunas actividades con respecto al comportamiento real del sistema. Dado que no se tienen todos los datos oficiales proporcionados por el Metro, se estudia la validación para las actividades con las que cuenta con una gran cantidad de datos. Específicamente, la actividad de uso de torniquetes ya que se cuentan con datos de una semana completa en el mes de febrero y otra semana completa en el mes de marzo. Se empieza por analizar la cantidad de personas que ingresan a la estación en un día. Los datos proporcionados por el Metro presentan un promedio de 34540 personas por día, mientras que el modelo desarrollado retornó un promedio de 33990 personas por día con un intervalo de confianza de 33409 a 34565 personas. El valor real se encuentra dentro del intervalo de confianza y además es relativamente próximo al valor simulado, teniendo este ultimo un error de 1.6%. En conclusión, el modelo proporciona resultados confiables en el aspecto señalado.

Por otro lado, se analiza el uso promedio de los torniquetes por día. Se observa en la figura 12 un diagrama de frecuencias de la cantidad de veces promedio que cada torniquete se usa por día. Este diagrama se genera en base a los datos proporcionados por el Metro de Medellín. Se nota que la distribución de uso tiene una forma de montaña con un pico en el torniquete TQ5. Por otro lado, en la Figura 13 se puede visualizar otro diagrama de barras con resultados que se obtuvieron a partir simulación. Se observa que en el resultado simulado, la tendencia de la distribución empírica se mantiene exceptuando que el pico se encuentra en el torniquete TQ6. Además de la distribución, las cifras de frecuencias absolutas son similares entre si por lo que hay suficiente evidencia para confiar en la precisión del modelo.

8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y EXPERIMENTACIÓN

8.1 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se escogieron las siguientes distribuciones correspondientes al tiempo de servicio de los torniquetes, en particular, el más utilizado (TQ6), tiempo de servicio de la máquina de validación (MV), tiempo de servicio de las máquinas de recarga (MR) y (MRD), tiempo de servicio de los puntos de venta (PV), tiempo de servicio en el cajero automático (CA) y las llegadas por la entrada

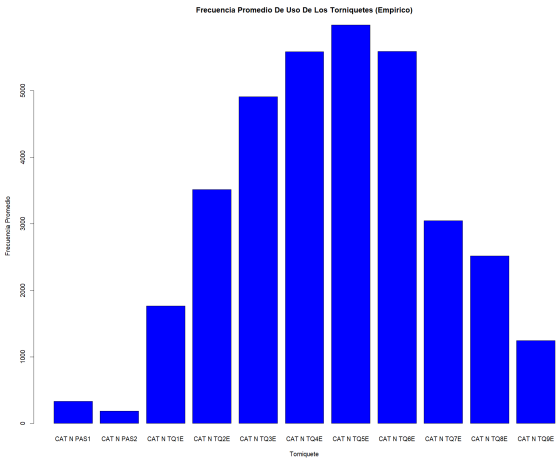


Figura 12: Gráfico de barras de la frecuencia de uso promedio de los torniquetes por dia (Empirico - uso de datos proporcionados)

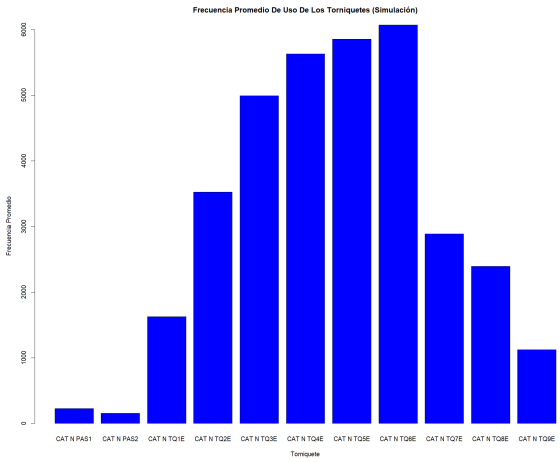


Figura 13: Gráfico de barras de la frecuencia de uso promedio de los torniquetes por dia (Simulación)

Este. El tiempo promedio y tiempo máximo en cola de los servicios anteriormente mencionados fueron las variables de salida escogidas para realizar el análisis de sensibilidad. Los resultados de las simulaciones para el análisis de sensibilidad están descritos en las Tablas 7, 8 y 9.

En la Tabla 7 se puede ver que el tiempo promedio en cola y el tiempo máximo en cola para el torniquete más utilizado dirección norte (TQ6) resultaron sensibles a cambios en la distribución que determina el tiempo de servicio del mismo torniquete.

En la Tabla 8 se puede ver que el tiempo promedio en cola y el tiempo máximo en cola para la maquina de recarga con devolución (MRD) resultaron sensibles a cambios en la distribución que determina el tiempo de servicio de la maquina de recarga con devolución. Los tiempos de espera en la maquina de recarga también demostraron sensibilidad al variar la distribución de la maquina de recarga.

En la Tabla 9 se observa que tanto el tiempo promedio en cola como el tiempo máximo en cola para el punto de venta son sensibles a los cambios en la distribución que determina el tiempo de servicio en dicho punto (PV).

8.2 Experimentación

Con el fin de evaluar el impacto de diferentes configuraciones en el modelo por medio de la experimentación 2^k se escogieron las siguientes variables de salida: máximo tiempo en el sistema de los usuarios que salen dirección norte, máximo tiempo en cola del torniquete más utilizado dirección norte, máximo tiempo en cola del torniquete más utilizado sur, máximo tiempo en cola del punto de venta, máximo tiempo en cola de la máquina de recarga, máximo tiempo en cola de la máquina de recarga con devolución, máximo tiempo en cola de la máquina de validación, máximo tiempo en cola del cajero.

Los cinco factores experimentales escogidos con sus respectivos valores posibles son: número de cajeros (1,2), número de máquinas de recarga (2,3), número de maquinas de recarga con devolución (1,2), número de máquinas de validación (1,2) y número de puntos de venta (2,3).

Para encontrar los resultados de la experimentación se utiliza Experiment Builder en `Simul8` y posteriormente, se realiza un análisis estadístico de los resultados en Rstudio. Es importante mencionar qué debido a la cantidad de variables de salida y factores experimentales, solo se van a mostrar los resultados más dicientes de la experimentación.

Los resultados más importantes del análisis de varianza (ANOVA) son:

Tabla 7: Análisis de sensibilidad para torniquetes y máquina de validación.

Variable de salida	Tiempo promedio en cola		Tiempo máximo en cola	
	TQ6	MV	TQ6	MV
Límite inferior del IC	4.11	3.62	92.17	34.65
Valor promedio del IC	7.09	7.58	135.25	115.94
Límite superior del IC	10.07	11.54	178.34	197.22
Dist_Torniquetes: -10%	5.06	7.52	118.56	114.84
10%	15.29	7.52	190.69	114.84
Sensitivity	1.72	0	0.83	0
Beyond Confidence	1	0	1	0
Dist_MV: -10%	7.10	6.50	134.77	102.59
10%	6.98	11.13	134.17	154.52
Sensitivity	0.02	0.58	0	0.32
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_MR: -10%	7.03	7.52	134.49	114.84
10%	6.98	7.52	134.32	114.84
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_llegadasE: -10%	9.05	7.56	143.07	109.37
10%	6.55	7.71	125.12	120.91
Sensitivity	0.42	0.02	0.20	0.07
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_PV: -10%	7.05	7.52	134.00	114.84
10%	6.85	7.52	134.36	114.84
Sensitivity	0.03	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_Cajero: -10%	7.02	7.52	134.04	114.84
10%	6.97	7.52	133.85	114.84
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0

Tabla 8: Análisis de sensibilidad para máquinas de recarga.

Variable de salida	Tiempo promedio en cola		Tiempo máximo en cola	
	MRD	MR	MRD	MR
Límite inferior del IC	11.94	0.65	165.37	29.87
Valor promedio del IC	32.44	1.66	281.54	57.20
Límite superior del IC	52.95	2.67	397.71	84.98
Dist_Torniquetes: -10%	34.87	1.84	288.98	61.51
10%	34.87	1.84	288.98	61.51
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_MV: -10%	34.02	1.66	287.10	56.79
10%	34.71	1.80	288.98	61.50
Sensitivity	0.01	0.06	0	0.08
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_MR: -10%	23.02	1.31	230.32	51.06
10%	59.60	2.72	430.42	75.98
Sensitivity	0.89	0.69	0.86	0.45
Beyond Confidence	1	1	1	0
Dist_llegadasE: -10%	34.09	1.91	285.60	66.12
10%	32.39	1.76	278.67	60.17
Sensitivity	0.04	0.07	0.02	0.10
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_PV: -10%	34.87	1.84	288.99	61.51
10%	34.87	1.84	288.99	61.51
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_Cajero: -10%	34.87	1.84	288.99	31.51
10%	34.87	1.84	288.99	31.51
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0

Tabla 9: Análisis de sensibilidad para cajero y punto de venta.

Variable de salida	Tiempo promedio en cola		Tiempo máximo en cola	
	CA	PV	CA	PV
Límite inferior del IC	43.97	3.92	289.12	74.26
Valor promedio del IC	90.80	6.24	582.53	106.53
Límite superior del IC	137.64	8.57	875.95	138.79
Dist_Torniquetes: -10%	81.18	6.61	555.26	104.75
10%	81.18	6.61	555.26	104.75
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_MV: -10%	88.94	6.32	573.67	103.80
10%	81.17	6.62	555.26	104.80
Sensitivity	0.08	0.06	0.03	0.01
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_MR: -10%	81.18	6.61	555.27	104.57
10%	81.18	6.64	555.26	105.13
Sensitivity	0	0	0	0
Beyond Confidence	0	0	0	0
Dist_llegadasE: -10%	91.12	10.16	630.28	126.46
10%	84.62	6.93	616.55	113.09
Sensitivity	0.06	0.70	0.02	0.20
Beyond Confidence	0	1	0	0
Dist_PV: -10%	81.18	5.08	555.27	91.59
10%	81.17	22.83	555.27	196.18
Sensitivity	0	3.82	0	1.62
Beyond Confidence	0	1	0	1
Dist_Cajero: -10%	52.14	6.70	429.98	105.88
10%	88.46	6.63	586.23	104.75
Sensitivity	0.39	0.01	0.27	0.01
Beyond Confidence	0	0	0	0

- Cambios en el número de cajeros y en el número de puntos de venta tendrán un gran impacto en el tiempo máximo en el sistema de los usuarios que salen dirección norte, en el tiempo máximo en cola del torniquete más utilizado dirección norte y dirección sur.
- El número de servicios disponibles afecta directamente el tiempo máximo de espera en dicho servicio, por ejemplo, el número de maquinas de recarga con devolución tiene un efecto significativo en el máximo tiempo en cola de la maquina de recarga con devolución.
- La relación entre el número de cajeros y el número de maquinas de recarga con devolución es importante para explicar la variabilidad del máximo tiempo en el sistema de los usuarios con dirección norte y máximo tiempo en cola del torniquete más utilizado dirección norte.
- La interacción entre el número de maquinas de recarga y el número de puntos de venta contribuye significativamente a la variabilidad observada al máximo tiempo en el sistema de los usuarios que salen dirección norte.

Para verificar que tanto se ajustan los residuos estandarizados de la variable máximo tiempo en cola del torniquete más utilizado dirección norte a una distribución normal se realizó una prueba de normalidad Shapiro-Wilk que dio como resultado que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, es decir, el modelo se ajusta a una distribución normal. Gráficamente, se presenta un Q-Qplot que se puede ver en la Figura 14.

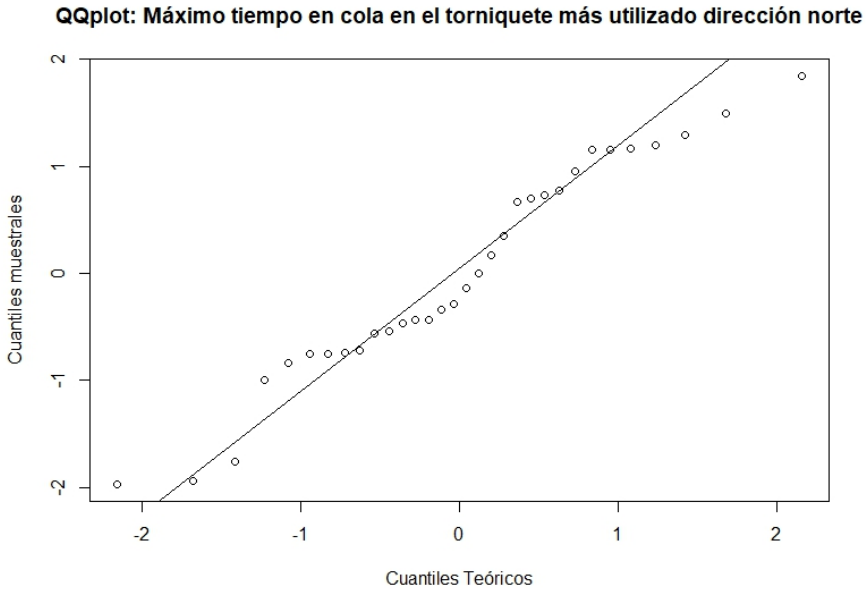


Figura 14: QQplot de máximo tiempo en cola en el torniquete más utilizado dirección norte.

Para analizar las comparaciones múltiples se utilizó Tukey's HSD y los resultados más significativos son:

- Para el máximo tiempo en el sistema de los usuarios que salen dirección norte, el máximo tiempo en cola del torniquete más utilizado dirección norte y el máximo tiempo en cola del torniquete más utilizado sur los 5 factores escogidos muestran diferencias significativas en varios niveles, lo que indicaría que dichos factores influyen considerablemente en los tiempos medidos.
- Por otro lado, la variación del número de máquinas de recarga, número de máquinas de recarga con devolución y el número de máquinas de validación no demuestra cambios significativos en los

otros tiempos máximos medidos que no sean los propios del servicio, es decir, las colas formadas en estas actividades parecen comportarse de forma independiente entre sí.

Se realizaron gran cantidad de boxplots para analizar el comportamiento de las variables de salida con respecto a los posibles valores que pueden tomar los factores experimentales. En primer lugar, los resultados para analizar el máximo tiempo en el sistema de los usuarios que salen dirección norte se pueden ver en las Figuras 15 y 16.

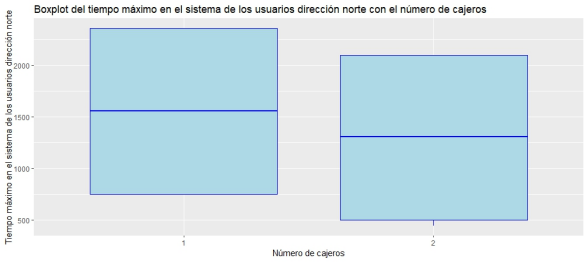


Figura 15: Boxplot de tiempo máximo en el sistema de los usuarios dirección norte variando el número de cajeros.

Figura 16: Boxplot de tiempo máximo en el sistema de los usuarios dirección norte variando el número de puntos de venta.

En la Figura 15 se observa la disminución general de los tiempos máximos en el sistema de los usuarios dirección norte al aumentar el número de cajeros disponibles. También se analiza dicha variable en comparación con el número de puntos de venta disponibles. En la Figura 16 se puede ver que cuando hay tres puntos de venta disponibles en el modelo, el tiempo máximo en el sistema de los usuarios dirección norte disminuye considerablemente.

En otro orden de ideas, los resultados para estudiar el impacto de los factores experimentales en el máximo tiempo en cola de los dos torniquetes más utilizados se pueden ver en las Figuras 17 y 18.

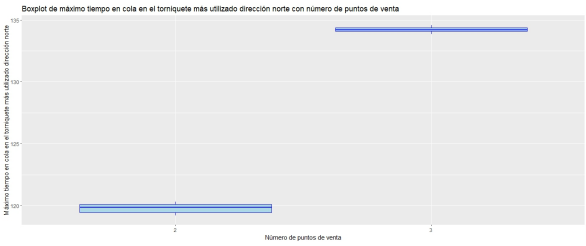


Figura 17: Boxplot de máximo tiempo en cola en el torniquete más utilizado dirección norte variando el número de puntos de venta.

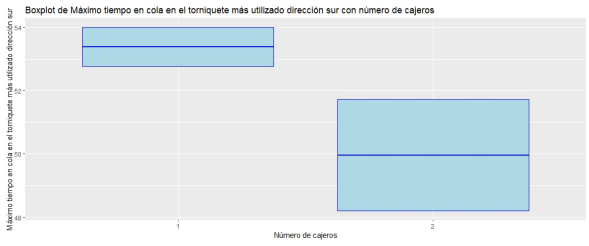


Figura 18: Boxplot de máximo tiempo en cola en el torniquete más utilizado dirección sur variando el número de cajeros.

En la gráfica 17 se pude ver que, al aumentar el número de puntos de venta, el tiempo en cola del torniquete más utilizado dirección norte aumentaría alrededor de diez segundos. Por otro lado, en la Figura 18 se observa una notable disminución en el tiempo máximo en cola del torniquete más utilizado dirección sur al aumentar el número de cajeros disponibles.

También se observó que al aumentar el número de ciertos servicios, el tiempo máximo en cola del servicio se reduce considerablemente. Sin embargo, los factores experimentales que más influyen en el tiempo total que los usuarios pasan en el sistema son el número de puntos de venta y el número de cajeros.

Los boxplots restantes no presentaron una variación significativa con los diferentes valores dados a los factores experimentales.

Los gráficos de efectos principales más reveladores se pueden en las Figuras 19, 20 y 21.

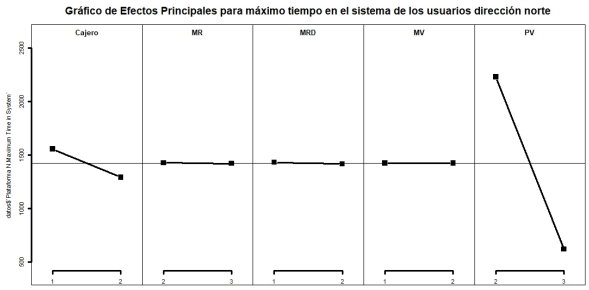


Figura 19: Gráfico de efectos principales para máximo tiempo en el sistema de los usuarios dirección norte.

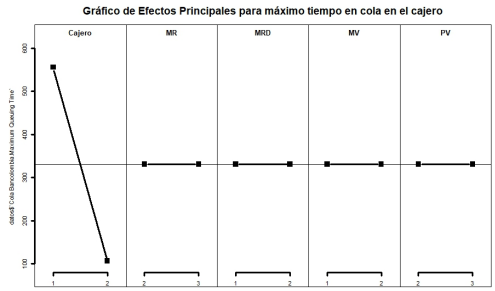


Figura 20: Gráfico de efectos principales para máximo tiempo en cola en el cajero.

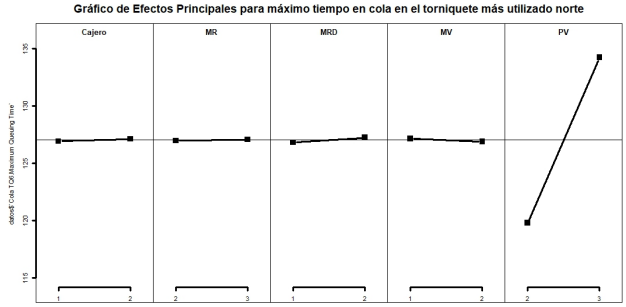


Figura 21: Gráfico de efectos principales para máximo tiempo en cola en el torniquete más utilizado dirección norte.

A partir de las gráficas 19, 20 y 21 se puede concluir lo siguiente:

- El número de máquinas de recarga, el número de máquinas de recarga con devolución y el número de máquinas de validación tienen un impacto similar, mientras que el número de cajeros y el número de máquinas de validación tienen un impacto mayor el tiempo máximo que los usuarios pasan en el sistema dirección norte.
- El tiempo máximo en cola del cajero se reduciría notablemente (alrededor de seis minutos) si se aumentara el número de cajeros.
- Como se viene viendo en los resultados anteriores, aumentar el número de puntos de venta aumenta el tiempo máximo en cola de los en el torniquete más utilizado.

Los resultados de los gráficos de interacciones no demostraron que la interacción de factores experimentales tuviera un gran impacto en los tiempos medidos. Es posible que los factores no se potencien mutuamente, lo que sugiere que optimizar cada factor individualmente podría ser más eficaz que buscar combinaciones específicas de factores.

8.3 Simulación y optimización

Los experimentos realizados en la Sección 8.2 indican que el sistema generaría mejores resultados si se varían la cantidad de servicios en algunas de las actividades. Las Figuras 9 y 10 muestran que las colas más congestionadas del sistema y en las que los usuarios se toman más tiempo son la cola para el cajero, la cola para la máquina de recarga con devolución y la cola para el punto de venta.

Como se describió en la Sección 4, existen un total de 4 máquinas de recarga, 1 de estas máquinas devuelve dinero a los usuarios que la utilizan, y, este detalle, provoca que los usuarios tiendan a utilizarla en mayor porcentaje con relación a las otras. Una de las soluciones que se proponen es tomar una de las máquinas de recarga sin devolución y reemplazarla por una máquina con devolución. De esta forma, se asegura que el sistema cuente con el espacio adecuado para incluir esta máquina. Caso contrario a lo que pasa con el punto de venta, el cual cuenta con 3 puestos, pero no es posible aumentarlos dentro del mismo espacio en donde funcionan.

Las Tablas 10 y 11 muestran los resultados de simular el modelo aumentando el número de cajeros automáticos (Bancolombia) de 1 a 2 y reemplazando una máquina sin devolución por una que sí cumpla con este aspecto. Al realizar estos cambios, es necesario también modificar el enrutamiento del modelo, ya que los usuarios tienden a usar con mayor frecuencia las máquinas con devolución. La proporción de usuarios que hacen uso de las máquinas con devolución en lugar de las sin devolución es de 6 personas por cada 10. Solo se consideró cambiar una de las máquinas para no llegar a resultados ficticios que no puedan ser aplicados en un contexto real.

Los resultados presentados en las Tablas 10 y 11 muestran mejoras significativas en los tiempos máximos en el sistema y en los tiempos y tamaños de las colas para el cajero y las máquinas de recarga con devolución. Se evidencian también ligeros cambios en los tamaños máximos de las colas de los torniquetes, algunas de estas, en particular, las colas para los torniquetes sur (TQ7, TQ8 y TQ9), disminuyen sus longitudes máximas, probablemente, debido a que cuentan con un menor flujo de usuarios en comparación con los torniquetes norte (TQ1- TQ6). Las colas para máquinas de validación y OPRAP no presentaron cambios tras aplicar las mejoras al modelo.

Aunque los porcentajes de mejora de la cola de las máquinas de recarga sin devolución puedan resultar alarmantes, los promedios tras mejoras observados en la Tabla 11 no lo son. Es decir, aunque los tiempos y tamaños aumentaron en lugar de disminuir, siguen siendo valores sobre los cuales el sistema puede funcionar de manera correcta (se gana mucho a cambio de perder poco).

La cola que se vio negativamente afectada en mayor medida fue la cola para el punto de venta. Esto se debe a que en el modelo todos los usuarios que hacen uso del cajero, luego se dirigen hacia el punto de venta. Como el flujo del cajero presentó una gran mejora, la cola del punto de venta tiende a congestionarse más rápidamente durante las horas pico. No obstante, los tiempos de servicio del punto de venta son lo suficientemente buenos para asegurar un tiempo máximo en cola menor a 200 minutos.

En conclusión, las estrategias de mejoramiento y soluciones implementadas luego de la experimentación, permitieron cumplir en gran medida los objetivos planteados en la Sección 2.3. Las Tablas 10 y 11 dan evidencia de que en algunos de estos objetivos se consiguieron resultados mucho mejores a los esperados. Es importante aclarar que si se consideran los factores no tomados en cuenta, explicados en la Sección 2.5.4, los resultados de la optimización pueden variar.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Considerando los supuestos y simplificaciones de las Secciones 2.5.3 y 2.5.4, el modelo implementado es una herramienta útil para simular el flujo entrante de personas en la estación Aguacatala del metro de Medellín.

A partir del análisis de sensibilidad y la experimentación se determinan elementos claves en la estación Aguacatala que afectan tanto positiva o negativamente el flujo de personas, los cuales son los tiempos de servicio de los torniquetes, el punto de venta, el cajero y la máquina de recarga con devolución. Por otro

Tabla 10: Comparación entre resultados originales y resultados tras la solución propuesta.

Salida del modelo	Promedio tras mejora	Promedio inicial	Porcentaje de mejora
Plataforma S - Tiempo promedio en el sistema	53.76	54.78	2%
Plataforma S - Tiempo máximo en el sistema	414.89	905,66	54%
Plataforma N - Tiempo promedio en el sistema	57.41	58.31	2%
Plataforma N - Tiempo máximo en el sistema	489.57	980.40	50%
Cola TQ1 - Tamaño máximo de cola	5.07	5	-1%
Cola TQ4 - Tiempo máximo en cola	22.27	22	-1%
Cola TQ5 - Tamaño máximo de cola	26.6	26.93	1%
Cola TQ6 - Tiempo máximo en cola	121.46	121.36	0%
Cola TQ7 - Tamaño máximo de cola	6.07	6.47	6%
Cola TQ8 - Tiempo máximo en cola	62.52	69.44	10%
Cola MV - Tamaño máximo de cola	6.47	6.47	0%
Cola MV - Tiempo máximo en cola	115.12	115.12	0%

Tabla 11: Continuación de la Tabla 10.

Salida del modelo	Promedio tras mejora	Promedio inicial	Porcentaje de mejora
Cola MRD - Tamaño máximo de cola	6.4	6.4	0%
Cola MRD - Tiempo promedio en cola	8.59	30.15	72%
Cola MRD - Tiempo máximo en cola	145.3	295.33	51%
Cola MR - Tamaño máximo de cola	3.2	3.8	16%
Cola MR - Tiempo promedio en cola	2.32	1.23	-89%
Cola MR - Tiempo máximo en cola	69.5	55.5	-25%
Cola OPRAP - Tamaño máximo de cola	2.47	2.47	0%
Cola OPRAP - Tiempo máximo en cola	100.37	100.37	0%
Cola Cajero - Tamaño promedio de cola	0.03	0.49	95%
Cola Cajero - Tamaño máximo de cola	3.33	9.67	66%
Cola Cajero - Tiempo promedio en cola	5.72	109.16	95%
Cola Cajero - Tiempo máximo en cola	134.17	761.67	82%
Cola PV - Tamaño máximo de cola	28	25	-12%
Cola PV - Tiempo promedio en cola	15.02	13.32	-13%
Cola PV - Tiempo máximo en cola	188.06	176.9	-6%
Informador Vendedor - Utilización%	34.74	34.74	0%

lado, el número de cajeros disponibles, puntos de venta y máquinas de recarga con devolución tienen gran impacto en las horas pico. Tomando esto en consideración, se desarrollaron estrategias de mejoramiento que cumplieron parcialmente los objetivos planteados.

La distribución espacial de los servicios juega un papel clave en la formación de colas y la congestión que se genera en la estación. Estudiar el impacto de cómo se distribuyen espacialmente las filas podría ser una opción de mejoramiento del modelo.

Si se quiere acercar el modelo con el funcionamiento real del sistema se recomienda explorar el efecto de segregar los usuarios. La clasificación de las personas entrantes a la estación tendría un impacto directo en las distribuciones que describen el tiempo de servicio de las diferentes actividades presentes, las cuales demostraron ser determinantes en el flujo del sistema. Siguiendo ese orden de ideas, se recomienda incluir en el modelo los usuarios que llegan a la estación por medio del sistema ferroviario y se disponen a salir por los torniquetes de la plataforma.

Por último, se plantea la posibilidad de complementar la modelación de eventos discretos con simulación basada en agentes. Estudiar qué decisiones individuales de los usuarios tienen impacto en la formación de colas de los diferentes servicios disponibles en la estación sería útil para determinar otras estrategias de mejoramiento aplicables en la estación Aguacatala del metro de Medellín y otras estaciones del sistema metro que presenten problemas de congestión y formación de largas colas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su sincero agradecimiento a Miguel Alfonso Melo Ruales por su ayuda en la recolección de datos y por sus valiosas indicaciones iniciales que motivaron la realización de este proyecto. Además, agradecen a Paula Alejandra Escudero Marin por su contribución y comentarios específicos a lo largo de varias etapas del proceso, los cuales fueron de gran utilidad para el desarrollo y mejora del modelo de simulación.

REFERENCES

Khattak, A., Y. Jiang, L. Hu, and Z. Juanxiu. 2016, 12. "Modeling and Simulation of Metro Transit Station Walkway as a State-dependent Queuing System based on the Phase-Type Distribution". *International Journal of Traffic and Transportation Engineering* 5:103–111.

Soza-Parra, J., I. Tiznado-Aitken, and J. C. Muñoz. 2023. "A discrete-event public transportation simulation model to evaluate travel demand management impacts on waiting times and crowding conditions". *Journal of Public Transportation* 25:100075.

BIOGRAFÍA DE AUTOR

JESUS D. CANTELLÓN es un estudiante de Ingeniería Matemática de la Escuela de Ciencias e Ingeniería de la Universidad EAFIT. Sus intereses de investigación son el Análisis de Datos y el Machine Learning. Su dirección de correo electrónico es jdcantelle@eafit.edu.co.

EMANUEL SERNA es un estudiante del pregrado de Ingeniería Matemática de la Escuela de Ciencias aplicadas e Ingenierías en la Universidad EAFIT. Entre sus mayores intereses en investigación están los modelos de optimización, los procesos estocásticos y el análisis de datos. Su dirección de correo electrónico es esernar1@eafit.edu.co.

JUAN E. TORO es estudiante en el programa de Ingeniería Matemática en la Universidad EAFIT. Sus intereses de investigación incluyen la analítica, el machine learning y los métodos de optimización multicriterio. Su dirección de correo electrónico es jetoroc@eafit.edu.co.