



¿Qué factores influyen en el tiempo de detención de un tren para dejar y recoger pasajeros? Un enfoque econométrico

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

Marina Dragicevic¹, Alumna de cuarto año

Gonzalo Suazo¹, Alumna de cuarto año

Juan Carlos Muñoz¹, Profesor Asociado

¹DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y LOGÍSTICA

INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se explica el tiempo de detención de un tren de Metro en una estación en función de la cantidad de gente que se sube y se baja del tren, la densidad de pasajeros al interior del vehículo y el nivel de ocupación del andén. Un modelo que prediga estos tiempos permite identificar los factores que podrán gestionarse para así reducir estas demoras.

Acortar los tiempos de detención permitiría mejorar la experiencia del usuario que sube y baja del tren, disminuir tiempos de viaje y aumentar la frecuencia efectiva que es posible ofrecer en la línea con una flota dada.

Otros autores han estudiado el tiempo de servicio de pasajeros para sistemas de buses, que es un caso similar al analizado en esta investigación. Existen, por ejemplo, modelos lineales muy simples dependientes del número de pasajeros que suben y bajan [4]. Otros modelos consideran tiempos de entrada distintos por pasajeros según el medio de pago utilizado al ingresar al bus [1]. Sin embargo, esta situación no aplica al caso del Metro, ya que el pago es anterior al ingreso al andén. Además, un aspecto relevante en el caso del Metro de Santiago son los niveles de fricción entre los pasajeros en el tren y en el andén, que rara vez se presentan en servicios de buses. Estudios en China concluyen que una alta congestión afecta el tiempo de subida y bajada por pasajero de manera considerable [2]. Por

otra parte, la práctica de contención de pasajeros se implementó el año 2012 en el Metro de São Paulo, Brasil, y obtuvo buena acogida por los usuarios ya que disminuía las molestias en el proceso de subir y bajar del tren [3], lo que muestra que este aspecto sí es importante para estos.

El modelo propuesto en este artículo fue calibrado para datos de la estación Baquedano del Metro de Santiago de Chile. Esta estación presenta uno de los más altos niveles de congestión al interior del tren y del andén durante los periodos punta. La fricción entre las personas demora la detención del tren, lo que reduce la oferta efectiva, y empeora la calidad de la experiencia de viaje. Para poder aminorar esta fricción y los retrasos parece necesario conocer y cualificar los factores que determinan el flujo de detención de los trenes. Éste es el propósito último de este artículo.

METODOLOGÍA

Recolección de datos

Para calibrar el modelo explicativo del tiempo de detención de los trenes se tuvo acceso a filmaciones de las puertas de los vagones que se detienen en Baquedano. Esta situación permitía contar las personas que entraban y salían de la puerta crítica del tren, e identificar también el nivel de congestión en el andén. De esta forma, se obtuvo un total de 386 observaciones, cada una correspondiente a la llegada de un tren a la estación.

Tras observar el comportamiento de la gente en el andén, resultó evidente que ésta se concentra más en el centro de éste que en sus extremos pues ahí se encuentra el acceso más restringido para trasbordar en la estación. A partir de esto, se concluyó que son estas puertas las que determinan el tiempo que el tren debe estar en la estación para permitir el intercambio de personas. Estas puertas se consideraron críticas en el proceso, por lo que por simplicidad, y sin pérdida de generalidad, se decidió estudiar una de esas puertas en lugar de todo el tren, ya que la detención del tren responde a lo que sucede en las llamadas puertas críticas. Así, se usó la cámara que permitía ver la parte central del andén, y para cada medición se eligió la puerta que tuviera el tiempo de interacción más largo.

El tiempo de detención comenzaba cuando se iniciaba la apertura de puertas y concluía cuando terminaba la transferencia de pasajeros en la puerta crítica. Este último instante podía no coincidir con el instante de cierre de puertas, pues el tren podía permanecer detenido por otro tipo de motivos. Para cada detención de trenes se registraron las variables que se explican en la Tabla 1, en donde se explica además cómo se obtuvieron.

Tabla 1. Análisis de tensiones máximas en estado estacionario.

Variable	Obtención
Personas Entran	Se contó la cantidad de personas que entran por la puerta crítica
Personas Salen	Se contó la cantidad de personas que salen por la puerta crítica
Baldosas antes	Se identificó la cantidad de baldosas en el suelo del andén ocupadas por pasajeros en el momento justo antes de que se abran las puertas, y se utilizó como una medida indicativa del nivel de congestión del andén antes de la llegada del tren. Esta variable va desde 0 hasta 6 baldosas
Baldosas después	Análogo a baldosas antes, pero indica el nivel de congestión que deja el tren, medido en el momento en que se acababa la interacción entre personas subiendo y bajando del tren
Densidad carro	Indica la densidad del carro correspondiente a la puerta crítica elegida, obtenida a partir de las mediciones del pesaje del tren realizado entre las estaciones Baquedano y la estación inmediatamente aguas abajo (proporcionada por Metro)

Obtención del modelo explicativo

Sobre la base de los datos anteriores, se realizaron distintos modelos de regresión lineal múltiple considerando distintas interacciones entre variables que pudieran resultar significativas. Para ver la relación individual entre el tiempo de detención del tren y cada una de las variables, se graficó cada una de las variables versus el tiempo de detención del tren. A partir de estos gráficos se ajustó una función inicial que explicara de mejor forma la posible relación, para así tener una noción del efecto de cada variable sobre el tiempo de detención. Se observó que todas las variables medidas tenían, en términos generales, una correlación positiva. Es decir, las variables tienden a subir y bajar junto con el tiempo de detención. También se puede notar que la variable referente a la densidad de pasajeros dentro del carro tiene una tendencia más exponencial que lineal.

Posteriormente se realizó un proceso iterativo en donde, partiendo con un modelo que incluía las cinco variables descritas anteriormente, se incluyeron también distintas interacciones entre ellas para buscar un mejor ajuste. Se evitó la **colinealidad**, cuidando de incluir variables que fueran independientes entre ellas.

Se probaron distintas modificaciones en los modelos, utilizando sólo variables que podían sustentarse lógicamente y revisando cuáles de estas entregaban un mejor resultado. Para evaluar la validez del modelo, en primer lugar se buscó consistencia lógica del valor de los coeficientes de las variables. Por ejemplo, como se espera que al haber más personas en el andén el tiempo de detención aumente, la constante de esta variable debiera ser positiva. En segundo lugar, el valor de la constante que presentara el modelo debía ser cercano a cero con un bajo test estadístico t , ya que es de esperar que si las variables estudiadas tienen valor cero, el tiempo de detención asociado debiera ser lo más pequeño posible. En tercer lugar, se buscó que cada una de las variables tuviera una alta significancia en su test estadístico t , con valores mayores a 1,96 para asegurar un intervalo de confianza al 5%. Finalmente, se intentó aumentar el coeficiente de determinación (R^2), el cual mide cuán explicativo es el modelo respecto a los datos observados.

Finalmente, se obtuvo el modelo que se presenta en la Tabla 2, que ofreció el mejor ajuste.

Tabla 2. Variables creadas para la modelación.

Variable	Descripción
TD	Tiempo de detención del tren (variable dependiente)
PE	Corresponde a la cantidad de personas que entran en la puerta crítica durante el intercambio, es decir, a la variable Personas Entran
PB	Corresponde a la interacción entre las variables Personas Salen y Baldosas Antes. Es decir: (Personas Salen · Baldosas Antes)
BD	Corresponde a la densidad de personas en el andén luego de realizado el intercambio, es decir, a la variable Baldosas Después
ED	Corresponde a una nueva variable sobre la Densidad Carro. Es decir: $e^{(\text{Constante} \cdot \text{Densidad})}$

Análisis del modelo obtenido

Los coeficientes del modelo que logró predecir de mejor manera el tiempo de detención en vagón (en segundos) se muestran en la Tabla 3, junto con los test estadísticos t . Para la variable ED se estimó el coeficiente θ partiendo del valor obtenido con el ajuste exponencial en el gráfico de tiempo de intercambio versus la densidad del carro, que era igual a 0,196. Se varió este valor para maximizar el R^2 . Se observó que al disminuir la constante aumentaba el valor del R^2 ajustado, pero al mismo tiempo disminuía la significancia de la variable PB (test t), por lo que se disminuyó la constante hasta que se obtuvo un aumento en el R^2 ajustado menor al 0,001%. Por último, se eligió un θ igual a 0,174, con lo que el modelo arrojó un R^2 ajustado de 0,6542.

Tabla 3. Valores de los coeficientes y los test estadísticos t en cada una de las variables

Variable	Coefficiente	Test Estadístico t
Constante	0,74	0,72
PE	0,15	3,98
PB	0,02	1,60
BD	0,60	4,33
ED	4,93	10,88

El test estadístico fue realizado con una significancia del 95% respecto de todas las variables, a excepción de la constante y de la variable PB. La poca significancia estadística de la constante indica que no posee mucha explicación en el modelo. Por otro lado, la variable PB posee un test- t menor al mínimo exigido (1,645), pero se considera conveniente incluirla en el modelo, ya que es una variable lógica que explica la interacción entre las personas que desean abandonar el vagón y la densidad del andén que impide su movilidad.

Al analizar las condiciones promedio que presentan las variables explicativas dentro del conjunto de datos, se obtiene un valor promedio de cada una de ellas, con las cuales es posible calcular la fracción del tiempo total promedio de detención que cada variable representa si se observara esta situación promedio. El resultado se observa en la Tabla 4.

Al analizar el modelo y utilizando los promedios de las variables se obtuvo cuánto explicaba cada una de las variables el tiempo de detención promedio del vagón, que son 18,24 segundos. El cálculo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4. Valores del test estadístico *t* en cada una de las variables

Variable	Promedio (s)	Tiempo promedio explicado por la variable
PE	12,88	1,98
PB	17,57	0,39
BD	2,87	1,71
ED	2,72	13,42

Estos resultados muestran que el tiempo promedio de detención se ve explicado en un 73,55% por la densidad que trae el tren. Por otro lado, la variable de las personas que salen y el nivel de ocupación del andén (PB) no aporta en forma significativa al tiempo de detención, siendo un 2,137% del tiempo total.

El gráfico en la Figura 1 muestra la comparación entre los valores observados de tiempos de intercambio respecto de los modelados. Se observa que existe una tendencia de los datos hacia la línea de 45°, que es lo esperado, ya que indica que el tiempo modelado es igual al observado. Sin embargo, para tiempos observados sobre los 28 segundos el modelo tiende a subestimar este valor. Esto refleja que hay aspectos del proceso real que el modelo no está captando cuando los valores del tiempo aumentan. Sin embargo, no fue posible identificar un modelo que considerara este efecto.

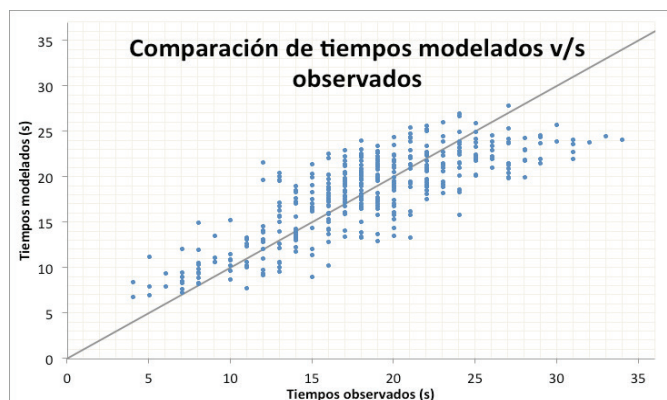


Figura 1. Gráfico de tiempos modelados versus observados.

Análisis de mejoras al sistema

Al estudiar la posibilidad de intervenir en estación Baquedano de modo de reducir el tiempo de detención de los trenes, usando el modelo explicativo, se observa que sólo es posible intervenir algunas variables. Por ejemplo, no es posible modificar Densidad Carro ni el número de personas que bajan y suben, puesto que éstas son elementos exógenos que dependen directamente de los viajes que los pasajeros deben realizar. Sin embargo, la ocupación del andén luego del intercambio de pasajeros, sí puede modificarse si se reduce el número de pasajeros en el andén al momento de llegar el vagón.

Mediante un adecuado sistema de contención de pasajeros, es posible administrar la cantidad deseada de personas que esperen en el andén al momento de llegar el tren. El objetivo de esta medida no es disminuir la densidad del tren a la salida de la estación, sino disminuir la fricción entre los pasajeros que suben y bajan del tren. Observando la Tabla 4 se puede apreciar que las variables a modificar (PB y BD) tienen en suma una influencia de 11,55% sobre el total del tiempo de detención. Es decir, generando un buen sistema de contención de pasajeros se podría disminuir en un 12% aproximadamente el tiempo de detención del vagón, sumado a la mejoría en la calidad de viaje de cada uno de los pasajeros. Por ejemplo, si se logra reducir la densidad a la mitad, se reduciría el tiempo de parada en aproximadamente 6%.

CONCLUSIONES

A partir del modelo obtenido para explicar el tiempo de detención de los trenes en el andén, se concluye que este tiempo depende en forma exponencial de la densidad del tren, de las personas que entran, de las personas que salen multiplicadas por las baldosas ocupadas antes del intercambio y de las baldosas ocupadas después de éste. Se obtuvo un modelo que presenta un buen ajuste (coeficiente

de correlación de 0,6527) aun cuando las esperas al parar el vehículo que superan los 28 segundos son subestimadas por el modelo. Esto último permite concluir que es posible que existan aspectos relevantes en el intercambio que no lograron ser captados por las variables incluidas en este modelo.

Por otra parte, los resultados obtenidos a partir de la modelación permiten concluir que se puede aspirar a reducir el tiempo de detención de los trenes mediante la implementación de un sistema de contención de pasajeros antes de entrar al andén. Esta medida permitiría mejorar la experiencia de los usuarios y además de aminorar los períodos de detención necesarios para el intercambio, lo que potencialmente podría mejorar la frecuencia de los trenes. Dado que la estación analizada es una de las más congestionadas en la línea, una reducción en el tiempo de detención debiera aumentar la frecuencia de despacho de trenes, generando un efecto positivo también en las estaciones aguas abajo.

PRINCIPIO CIENTÍFICO UTILIZADO

Para la modelación se empleó una regresión lineal la cual se explica a continuación:

$$y = \theta_0 + \theta_1 \cdot X_1 + \theta_2 \cdot X_2 + \dots + \theta_n \cdot X_n$$

Para esta investigación en particular, la variable dependiente corresponde al tiempo de detención del vagón y las variables independientes X_n fueron las que se probaron de manera que predijeran de mejor forma esta pausa de detención. Es decir, se buscó un mayor índice R^2 (el cual explica qué tan bien se ajusta esta recta respecto de la predicción de los datos) manteniendo siempre una estructura lógica detrás.

GLOSARIO

Calibrar: Proceso de ajuste de los parámetros de modelación para reproducir de mejor manera los valores observados.

Colinealidad: Un modelo presenta colinealidad cuando entre las variables dependientes existe dependencia. Es decir, cuando al modificar una de estas variables, las otras se ven afectadas. Esto puede traer problemas en la capacidad de predicción del modelo.

Fricción: Concepto utilizado para referirse a la interacción entre las personas que van en sentidos opuestas al momento de abrirse las puertas, lo que genera roces entre ellos y, por lo tanto, molestia de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Metro de Santiago por la facilitación de los videos y datos para poder realizar un correcto levantamiento de la información, basado en horas de alta congestión. Por último, agradecer también a Homero Larraín y Juan de Dios Ortúzar, que nos ayudaron con dudas surgidas a lo largo de la investigación.

REFERENCIAS

1. Fernández, R.; Del Campo, M.; Swett, C. Data collection and calibration of passenger service time models for the Transantiago System. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Santiago, Chile, 2008.
2. Liu, J., Deng, W., y Yi, F. (2011) Passenger boarding and alighting times at bus stops. ICCTP 2011: 2740-2749.
3. Metro de São Paulo, Gerência de Operações, área de pesquisa. Informações sobre Controle de Fluxo no Metro –sp. Estudos e Informações, 2013.
4. Pretty, R.L.; Russel, D.J. Bus boarding rates. Australian Road Research 18 (3): 145-152, 1988.

EQUIPO DE INVESTIGADORES

- 1 Marina Dragicevic
- 2 Gonzalo Suazo
- 3 Profesor Juan Carlos Muñoz



1

2

3