

# EXPERIMENTOS DE LABORATORIO A ESCALA REAL PARA ESTUDIAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS PASAJEROS MEDIANTE MARCAS DELANTE DELAS PUERTAS DEL TRANSPORTE PÚBLICO

Rodrigo Fernández<sup>1\*</sup>, Patrick Le-May<sup>1</sup>

<sup>1</sup>. Universidad de los Andes, Chile

---

\*Autor para  
correspondencia:  
[rfa@miuandes.cl](mailto:rfa@miuandes.cl)

## RESUMEN

En este artículo se busca encontrar la mejor demarcación en andenes para gestionar el flujo de pasajeros en puertas del transporte público. El objetivo es hacer más eficiente los procesos de carga y descarga, disminuir el tiempo de transferencia de pasajeros o *dwell time* y, por consiguiente, reducir las demoras en estaciones. El estudio se hizo en el Laboratorio de Dinámica Humana (LDH) de la Universidad de los Andes, Chile, el cual cuenta con una maqueta a escala real del hall de un vehículo de transporte público. Mediante cámaras en diferentes ángulos se registraron procesos de subida y bajada para distintos esquemas de demarcación del andén. Como resultado se obtuvo tanto el mejor esquema de demarcación, así como aquel menos eficiente.

**Palabras clave** transporte público, pasajeros, comportamiento

## ABSTRACT

*In this article we studied the best marking scheme on platforms to manage the behaviour of passengers in front of public transport doors. The study was carried out in the Human Dynamics Laboratory (HDL) at Universidad de los Andes, Chile, which has a real-scale model of the hall of a public transport vehicle and its adjacent platform. The research objective is to make boarding and alighting processes more efficient to reduce vehicle delays at stations. In order to achieve this objective, five marking schemes on the platform were studied in our laboratory. As a result, both the best scheme as well as the least efficient were obtained. We are aware that our results are limited to the experimental conditions in the laboratory, but they may shed light on how to manage passenger behaviour on platforms with low-cost measures.*

**Keywords** public transport, passengers, behaviour

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta los resultados de una línea de investigación que estudia, a través de experimentos de laboratorio a escala real, cómo el diseño de vehículos y andenes afecta al Tiempo de Servicio de Pasajeros (PST), también llamado *dwel time* (Fernández et al., 2010; 2015). El TSP es el tiempo que un vehículo de transporte público permanece en una estación transfiriendo pasajeros, desde su parada hasta que vuelve a avanzar. En adelante, nos referiremos a "estación" para indicar cualquier lugar de transferencia de pasajeros. Asimismo, por "vehículo" se entenderá cualquier vehículo de transporte público, como un tren de metro, un tranvía, un autobús normal o un autobús articulado. El TSP afecta a los retrasos en las estaciones, que, a su vez, influyen en los tiempos de espera de los pasajeros, en sus tiempos de viaje y, en general, en todo el sistema de transporte público. También permite a los operadores de transporte público calcular el tamaño de su flota, el tipo de vehículo, la asignación de conductores, el kilometraje de los vehículos y los costos de explotación.

La ventaja de los experimentos de laboratorio a escala real es que podemos probar el comportamiento de los pasajeros frente a diferentes diseños de vehículos, plataformas y control de flujos que no pueden hacerse en terreno o en circunstancias que no se dan en la realidad. Por ejemplo, cómo se comportan los pasajeros en un vehículo con puertas de 2,5 m (es sabido que no existen vehículos con puertas de ese ancho).

El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de los experimentos realizados en el Laboratorio de Dinámica Humana (HDL) de la Universidad de los Andes, Chile. Los experimentos estudiaron el efecto que tiene el control del flujo de pasajeros en los tiempos de embarque y desembarque. En particular, se analizó cómo la demarcación del andén afecta al comportamiento de los pasajeros; especialmente, para que los pasajeros que esperan para subir no obstruyan a los que están bajando. La obstrucción de las puertas es habitual en los sistemas de metro en hora punta porque los vehículos están abarrotados y los pasajeros que esperan están ansiosos al ver que no podrán subir al tren. En consecuencia, se colocan delante de las puertas y bloquean el flujo de pasajeros que baja.

Nuestra metodología consistió en experimentos en los que se mantuvieron constantes el ancho de las puertas y las brechas verticales y horizontales entre el andén y el vehículo. Se estudiaron cinco esquemas de señalización en el andén. Estudiantes universitarios hicieron las veces de pasajeros en los experimentos, por lo que los valores resultantes no son directamente transferibles a un sistema real. Nuestro objetivo era comparar las tendencias y las diferencias relativas entre los esquemas. Posteriormente, el mejor esquema puede llevarse al terreno para corroborar su eficacia. Del mismo modo, es posible determinar qué esquema no debe utilizarse en la práctica.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Hay seis variables principales que afectan al TSP, dos pertenecen a la demanda de los pasajeros y las otras cuatro se refieren a los procesos de embarque y desembarque (TRB, 2000). Estos factores son: (a) el número de pasajeros que suben y bajan del vehículo; (b) el tamaño y el diseño de las estaciones; (c) el método de cobro de la tarifa; (d) el tipo de vehículo; (e) el movimiento de

los pasajeros dentro del vehículo; y (f) el embarque y desembarque de rodados como carros de compra, coches para bebé o de sillas de ruedas. Todos estos factores cambian con el diseño de las estaciones, las características de los vehículos, el tipo de pasajeros y los niveles de demanda.

Existe un amplio número de modelos para calcular el TSP, la mayoría de ellos centrados en el sistema de buses. A continuación se explican los más relevantes.

Levinson (1983) fue uno de los primeros en realizar estudios y señala que el TSP se ve afectado por la actividad de los pasajeros, la puerta que se utiliza para subir y bajar, el número de pasajeros que pagan con monedas o billetes, la frecuencia de las paradas y la hora del día. Por su parte, Pretty y Russel (1988) proponen el siguiente modelo.

$$T = C + \max\{\sum_{i=1}^m a_i ; \sum_{j=1}^n b_j\} \quad (1)$$

Donde  $T$  es nuestro TSP;  $a_i$  el tiempo de embarque del pasajero  $i$ ;  $b_j$  es el tiempo de bajada del pasajero  $j$ ;  $n$  es el número de pasajeros que embarcan;  $m$  el número de pasajeros que salen; y  $C$  un tiempo muerto por apertura y cierre de puertas.

Lin y Wilson (1992) afirman que el TSP se ve afectado por muchos factores. Sin embargo, la mayoría de estos factores son constantes, a excepción de la demanda y el comportamiento de los pasajeros. Hay otras variables, como el tiempo que el conductor espera para cerrar las puertas o si algún pasajero tiene una discapacidad. Estas no pueden utilizarse para predecir el rendimiento del sistema, porque son imprevisibles. Por eso, su modelo no incluye estos factores como variables, pero sí dentro del error de predicción. Lo que sí tiene en cuenta es el número de pasajeros que sube y baja y el número de pasajeros a bordo del vehículo. Por tanto, para el caso particular de un vehículo de una sola puerta, el tiempo necesario para subir y bajar es:

$$DOT = a + bDONS + cDOFFS + d(DONS + DOFF)STD \quad (2)$$

Donde  $DOT$  es el tiempo que la puerta permanece abierta;  $DONS$  el número de pasajeros que suben por la puerta;  $DOFFS$  el número de pasajeros que bajan por la misma puerta;  $STD$  es el número de personas que están de pie en el vehículo; y  $DT$  el tiempo de parada del vehículo. Por último,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  son los parámetros que hay que calibrar.

Si el vehículo tiene  $n$  puertas, entonces  $DT = \max \{DOT_1, DOT_2, \dots, DOT_n\}$  y, si el vehículo tiene  $m$  vagones  $DT = \max \{DT_1, DT_2, \dots, DT_m\}$ . Los parámetros se estimaron en los trenes de la Línea Verde de la Autoridad de Transporte de la Bahía de Massachusetts (MBTA).

Puong (2000) propone un modelo basado en datos observados en la línea roja de la MBTA. Su estudio muestra que el TSP es una función lineal con el número de pasajeros que suben y bajan y no lineal con el número de pasajeros a bordo.

En un estudio exhaustivo en autobuses de Sídney, Tirachini (2013) calibró modelos de TSP. El objetivo era cuantificar las diferencias entre los métodos de pago, la edad de los pasajeros, el

número de escalones para subir al vehículo, la fricción entre los pasajeros que suben y bajan y los pasajeros que permanecen dentro del vehículo. La ecuación 3 muestra uno de sus modelos más sencillos.

$$d = c + b_e B_e + b_c B_c + b_s B_s + b_t B_t + aA + \varepsilon \quad (3)$$

Donde  $d$  es el TSP;  $A$  es el número de pasajeros que bajan;  $a$  es el tiempo de bajada por pasajero (s/pax);  $B_k$  es el número de pasajeros que pagan con el sistema  $k$  (tarifa exacta, dando cambio, gratis, pase diario);  $b_k$  son los respectivos tiempos de embarque por pasajero (s/pax) y  $\varepsilon$  es el error residual.

En las estaciones de tren de los Países Bajos, Wiggeraad (2001) observó que el TSP está determinado por un tiempo de parada fijo, definido para cada estación, el número de pasajeros que suben y bajan, las características del tren y de la infraestructura, los procesos de llegada y salida de los trenes, la distribución de los pasajeros en la estación y el periodo del día. Llega a la conclusión que el TSP es mayor que el tiempo fijo que se ha definido para cada estación y que el TSP es similar en las horas punta y en las horas valle. También observa que hay una concentración de pasajeros en torno al lugar de parada del tren y que el tiempo medio de subida y bajada de los pasajeros es de aproximadamente un segundo. Además, las puertas más anchas reducen el tiempo de embarque y desembarque de los pasajeros en aproximadamente un 10%. Por el contrario, las puertas más estrechas aumentan el tiempo de embarque y desembarque en aproximadamente el mismo porcentaje.

Heinz (2003) midió los tiempos de subida y bajada de diferentes tipos de trenes en Suecia, teniendo en cuenta el tipo de servicio, la brecha vertical entre el andén y el tren, el ancho de las puertas y el porcentaje de pasajeros con equipaje. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1** Tiempos promedio de subida y bajada de pasajeros en trenes suizos

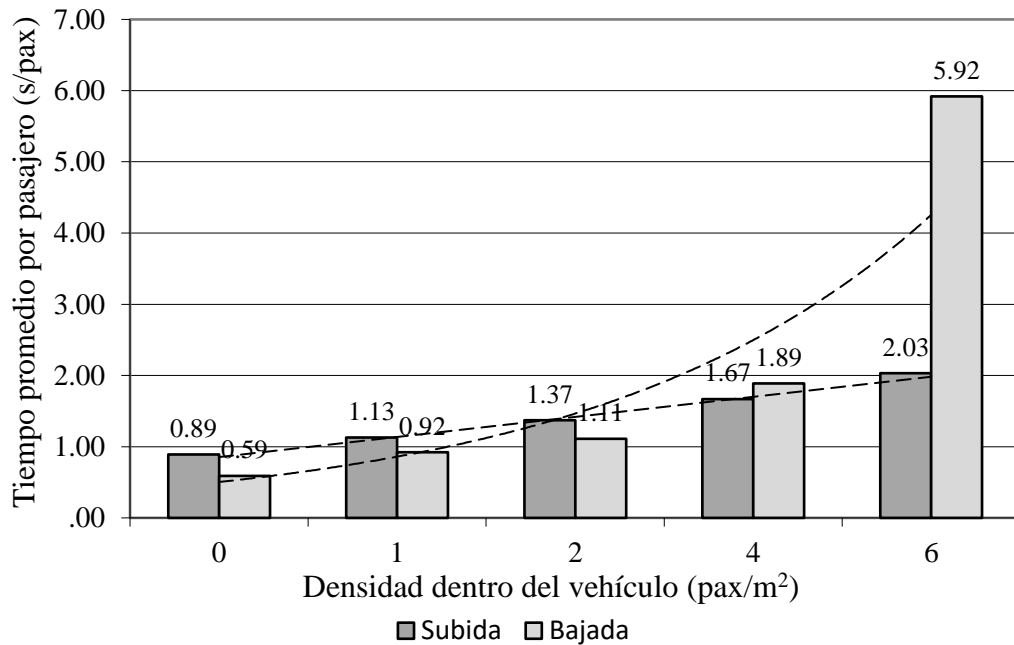
| Tipo de servicio     | Brecha vertical (m) | Ancho de puertas (m) | Pasajeros con equipaje | Tiempo promedio de subida (s/pax) | Tiempo promedio de bajada (s/pax) |
|----------------------|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Local                | 0.03                | 1.19                 | 0%                     | 1.51                              | 0.88                              |
| Local                | 0.10                | 1.41                 | 0%                     | 1.38                              | 0.93                              |
| Local                | 0.42                | 0.77                 | 0%                     | 1.66                              | 1.40                              |
| Local                | 0.42                | 1.15                 | 0%                     | 1.19                              | 1.11                              |
| Regional             | 0.57                | 0.90                 | 9%                     | 1.94                              | 1.38                              |
| Regional             | 0.57                | 0.90                 | 4%                     | 2.96                              | 2.02                              |
| Regional             | 0.57                | 1.15                 | 11%                    | 1.98                              | 1.22                              |
| Regional             | 0.02                | 1.15                 | 7%                     | 1.61                              | 1.04                              |
| Regional             | 0.05                | 1.15                 | 2%                     | 2.26                              | 1.70                              |
| Regional             | 0.39                | 1.90                 | 8%                     | 1.75                              | 1.22                              |
| Regional/Aeropuerto  | 0.00                | 0.82                 | 14%                    | 1.71                              | 1.42                              |
| Regional/Aeropuerto  | 0.44                | 1.46                 | 57%                    | 1.99                              | 1.56                              |
| Regional/Aeropuerto  | 0.02                | 1.46                 | 56%                    | 1.65                              | 1.59                              |
| Regional             | 0.67                | 0.60                 | 16%                    | 3.85                              | 2.30                              |
| Regional/Interurbano | 0.67                | 0.75                 | 10%                    | 2.55                              | 2.18                              |
| Interurbano          | 0.67                | 0.74                 | 23%                    | 3.83                              | 3.77                              |
| Interurbano          | 0.67                | 0.63                 | 31%                    | 4.22                              | 4.53                              |
| Interurbano          | 0.72                | 1.30                 | 12%                    | 3.17                              | 2.08                              |

En los modelos anteriores, los parámetros se calcularon mediante regresión lineal. En cambio, Daamen et al. (2008) estudiaron el comportamiento de los pasajeros de ferrocarril mediante experimentos de laboratorio a escala real. En los experimentos obtuvieron la capacidad de las puertas frente a cambios en las brechas verticales y horizontales, el ancho de las puertas y los pasajeros con y sin equipaje. Los resultados indican que, al aumentar el brecha vertical y horizontal, la capacidad de las puertas se reduce hasta un 15%. Por otro lado, si hay pasajeros con equipaje, la capacidad de las puertas disminuye hasta un 25%. La tabla 2 presenta los resultados.

**Tabla 2** Capacidad de una Puerta de 80 cm (pax/s)

| Brecha vertical (cm) | Brecha horizontal (cm) |      |      |                        |      |      |
|----------------------|------------------------|------|------|------------------------|------|------|
|                      | Pasajeros con equipaje |      |      | Pasajeros sin equipaje |      |      |
|                      | 5                      | 15   | 30   | 5                      | 15   | 30   |
| 5                    | 0.91                   |      | 0.85 | 0.69                   |      | 0.73 |
| 20                   |                        | 0.89 | 0.88 |                        | 0.62 | 0.64 |
| 40                   | 0.81                   |      | 0.77 | 0.65                   |      | 0.63 |
| 60                   |                        | 0.84 | 0.77 |                        | 0.60 | 0.56 |

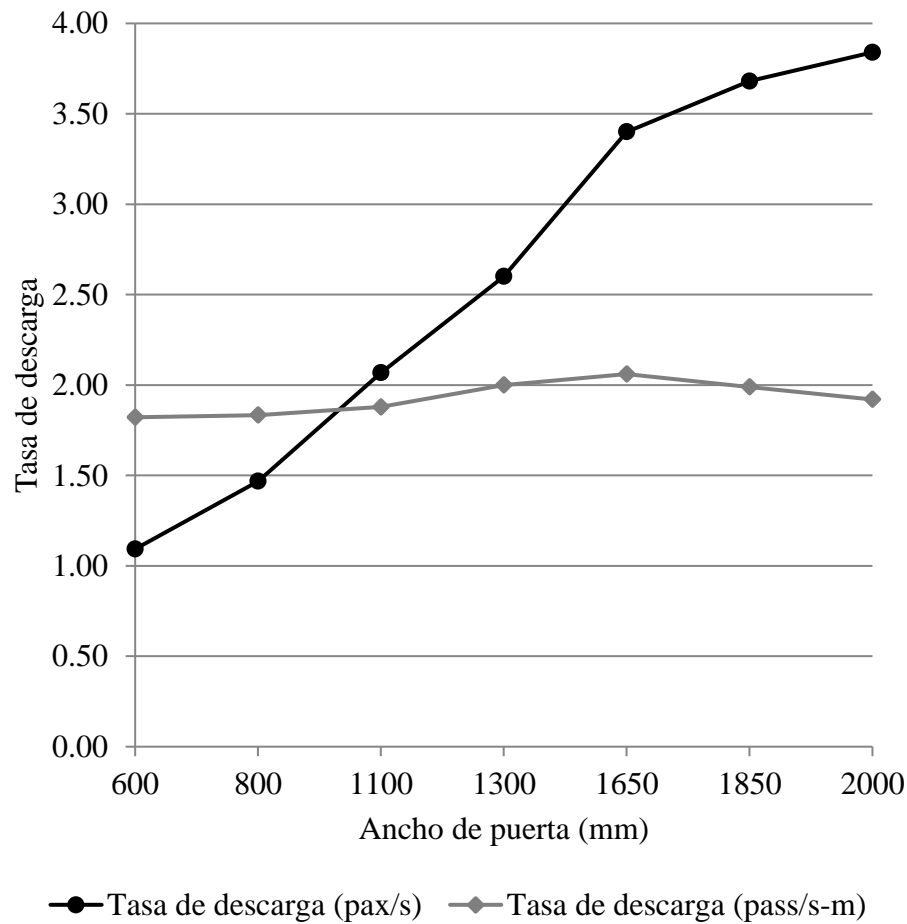
Siguiendo este enfoque, Fernández et al. (2010) obtuvieron los tiempos de subida y bajada de pasajeros mediante experimentos de laboratorio realizados en el Pedestrian Accessibility Movement Environment Laboratory (PAMELA) del University College London. Los escenarios consideraron diferentes métodos de pago, anchos de puerta, brechas verticales y densidad de pasajeros a bordo del vehículo. La Figura 1 muestra el efecto de la densidad de pasajeros en el tiempo de subida y bajada por pasajero.



**Figura 1** Tiempos promedios de subida y bajada con respecto a la densidad de pasajeros

Como puede verse en la Figura 1, hay un aumento lineal del tiempo de embarque por pasajero como consecuencia de la densidad, pero, en cambio, el tiempo de bajada por pasajero tiende a aumentar exponencialmente. Esto se explica por el hecho de que cuando los pasajeros suben, empujan a los que están a bordo; en cambio, cuando los pasajeros bajan, deben abrirse paso entre los que están de pie.

Del mismo modo, Fernández et al. (2015) midieron la capacidad de descarga de una puerta de un vehículo en el Laboratorio de Dinámica Humana (HDL) de la Universidad de los Andes, Chile. La línea negra de la Figura 2 muestra el aumento de la copa de descarga en función del ancho de la puerta. Como puede verse en la Figura, la tasa aumenta con el ancho de la puerta; sin embargo, más allá de una puerta de 1,65 m de ancho el retorno es marginal. Esto puede observarse en la línea gris que muestra la tasa de descarga dividida por el ancho de la puerta: el máximo es 2,06 pax/s-m para una puerta de 1,65 m.



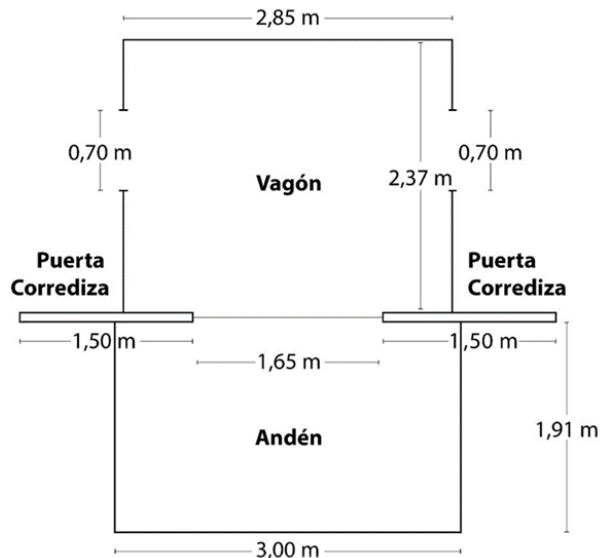
**Figura 2** Tasa de descarga a través de una puerta de transporte público

### 3. EXPERIMENTOS

#### 3.1. Diseño de experimentos

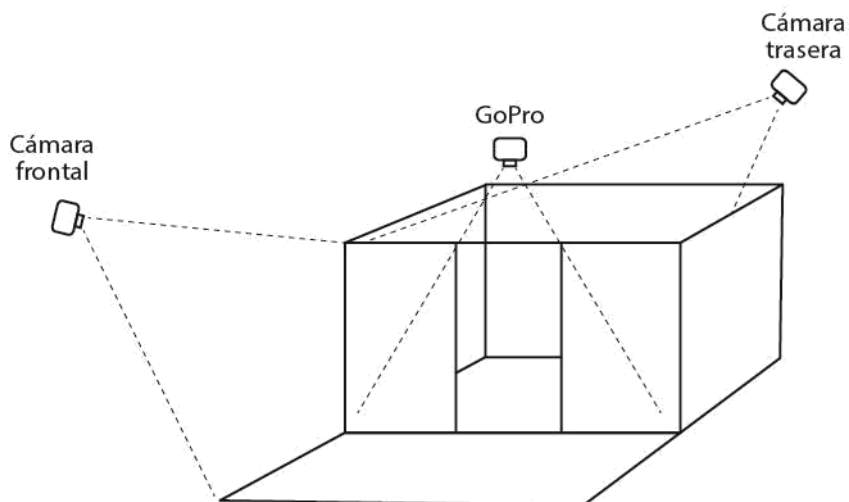
Cuando se realizan experimentos, las variables se separan en dos tipos: variables experimentales y variables contextuales. Las experimentales son las que el investigador modificará para obtener los resultados del experimento, en nuestro caso, cómo influyen demarcación del andén en el comportamiento de los pasajeros. Las variables contextuales son aquellas que no se modifican, pero que también influyen en el comportamiento. En nuestro caso, fueron puertas de 1,65 m de ancho, brechas horizontales y verticales nulas, y densidad de 4 pasajeros por metro cuadrado dentro de la maqueta al inicio de cada proceso de embarque y/o desembarque.

Se realizaron 30 simulaciones de procesos de embarque y/o desembarque para cada esquema de demarcación. Cada esquema se estudió en días diferentes y participaron unas 40 personas cada día. Cada día asistieron más o menos las mismas personas y se pidió a los participantes que se mezclaran antes de cada proceso de embarque y/o desembarque. La señalización de las zonas de espera en el andén se realizó con cinta adhesiva. La Figura 3 muestra el plano del HDL.

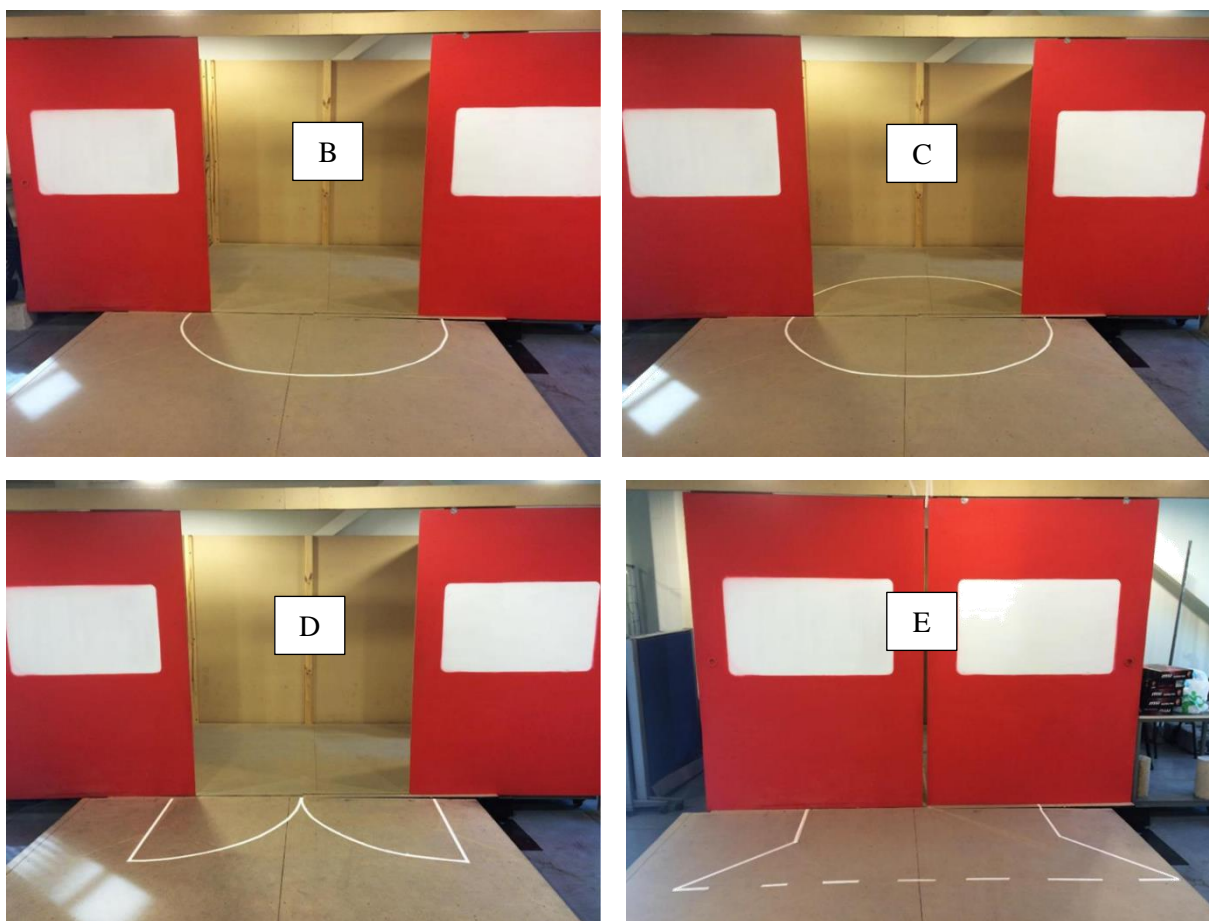


**Figura 3** Plano de la maqueta en el HDL

Para calcular los tiempos de embarque ( $T_{si}$ ), de desembarque ( $T_{bi}$ ) y de embarque y desembarque simultáneos ( $T_{sbi}$ ), se utilizaron los siguientes criterios. El proceso comienza cuando la mitad del cuerpo del primer pasajero cruza una línea imaginaria de separación entre el vehículo y el andén. El proceso termina cuando la mitad del cuerpo del último pasajero cruza la misma línea. Las puertas permanecen abiertas hasta que el proceso de embarque y/o desembarque se completa. Los procesos de embarque y desembarque se grabaron con una cámara GoPro gran angular situada en el dintel de la puerta, así como con una cámara frontal y otra trasera, como ilustra la Figura 4.



**Figura 4** Ubicación de las cámaras para grabar los experimentos.



**Figura 5** Esquemas de demarcación en cada experimento

Se han estudiado cinco esquemas. El primero, el esquema A, es el caso base, sin ningún tipo de demarcación. Los esquemas restantes (B, C, D y E) se muestran en la Figura 5. El esquema C



incluye una zona de exclusión en el interior del vehículo. Esto puede ser difícil de aplicar en la realidad, pero, como se mencionó anteriormente, la ventaja de la experimentación en laboratorio es que se probar un diseño inusual. Obsérvese que en el esquema D un pasajero puede situarse en medio de la puerta. Esto puede considerarse un obstáculo, pero según Helbing et al. (2000) no es así. Por último, en el esquema E la puerta se ve cerrada por ninguna razón en particular. El cálculo de los datos se registró en la forma indicada en la Tabla 3.

**Tabla 3** Formulario de registro de datos y cálculo de variables

| Run N°   | Boarding pass   | Boarding time (s) | Alighting pass  | Alighting time (s) | Boarding & alighting pass | Boarding & alighting time (s) | Average boarding time (s/pax)  | Average alighting time (s/pax) | Average board & alight time (s/pax) |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1        |                 |                   |                 |                    |                           |                               |                                |                                |                                     |
| 2        |                 |                   |                 |                    |                           |                               |                                |                                |                                     |
| i        | P <sub>si</sub> | T <sub>si</sub>   | P <sub>bi</sub> | T <sub>bi</sub>    | P <sub>sbi</sub>          | T <sub>sbi</sub>              | $\beta_{1i}=T_{si}/P_{si}$     | $\beta_{2i}=T_{bi}/P_{bi}$     | $\beta_{3i}=T_{sbi}/P_{sbi}$        |
| ...      |                 |                   |                 |                    |                           |                               |                                |                                |                                     |
| n        |                 |                   |                 |                    |                           |                               |                                |                                |                                     |
| $\Sigma$ | P <sub>s</sub>  | T <sub>s</sub>    | P <sub>b</sub>  | T <sub>b</sub>     | P <sub>sb</sub>           | T <sub>sb</sub>               | $\beta_1=\Sigma_i\beta_{1i}/n$ |                                | $\beta_2=\Sigma_i\beta_{2i}/n$      |

En el formulario anterior, los tiempos promedio de embarque y/o desembarque por pasajero se denotan por la variable respectiva  $\beta_k$ , donde T<sub>bi</sub> y T<sub>si</sub> es el tiempo total de operación de desembarque y embarque, respectivamente (como en un sistema de metro bien ordenado); y T<sub>sbi</sub> es el tiempo total cuando los pasajeros embarcan y desembarcan al mismo tiempo (como en un comportamiento desordenado).

### 3.2. Resultados

Según los cálculos de la Tabla 3, se obtuvieron los tiempos promedios de embarque y desembarque que figuran en el Tabla 4. Hay que señalar en la tabla que el número de pasajeros varía ligeramente dentro de los esquemas porque éstos se probaron en días diferentes y participaron cerca de 40 personas cada vez. Aunque siempre se ha intentado mantener aproximadamente la misma densidad de 4 pax/m<sup>2</sup>.

**Tabla 4** Tiempos medios de embarque y/o desembarque

| Esquema de demarcación | P <sub>s</sub> (pax) | T <sub>s</sub> (s) | $\beta_1$ (s/pax) | P <sub>b</sub> (pax) | T <sub>b</sub> (s) | $\beta_2$ (s/pax) | P <sub>sb</sub> (pax) | T <sub>sb</sub> (s) | $\beta_3$ (s/pax) |
|------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| A                      | 17*                  | 11.0               | 0.64              | 15                   | 11.0               | 0.74              | 32                    | 17.3                | 0.54              |
| B                      | 27                   | 14.4               | 0.54              | 16                   | 8.4                | 0.52              | 43                    | 22.6                | 0.53              |
| C                      | 24                   | 14.0               | 0.59              | 16                   | 9.7                | 0.60              | 40                    | 22.0                | 0.55              |
| D                      | 25                   | 15.1               | 0.61              | 15                   | 11.0               | 0.71              | 40                    | 23.1                | 0.58              |
| E                      | 27                   | 13.0               | 0.48              | 16                   | 7,3                | 0.46              | 43                    | 21.2                | 0.49              |

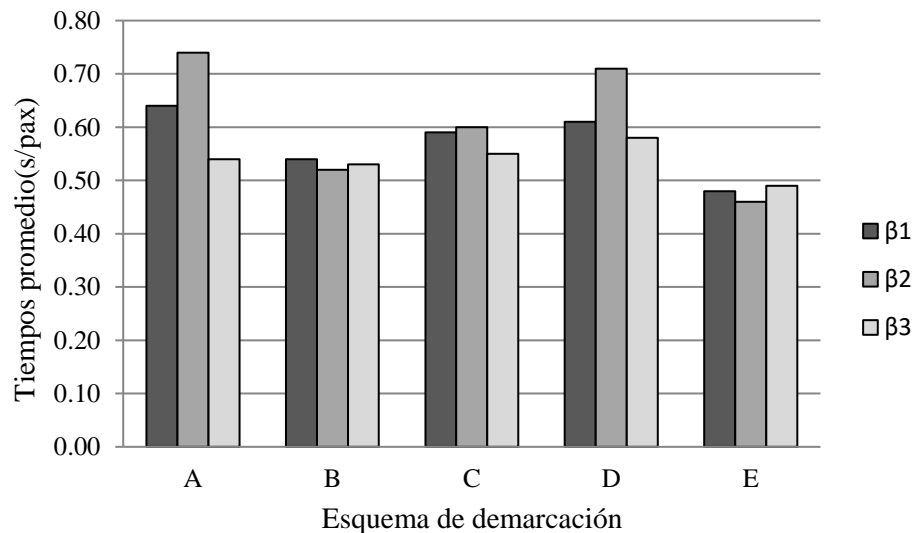
\* En este esquema, el número de voluntarios no era suficiente para satisfacer la densidad dentro del carro. Por este motivo, se redujo la superficie interna para mantener la densidad experimental de 4 pax/m<sup>2</sup>.

En la Tabla 4 se puede observar que en todos los esquemas los tiempos promedio de embarque o desembarque son inferiores al caso base, denominado esquema A, excepto en dos casos de embarque y desembarque simultáneos. Esto se explica en la siguiente sección.

En cuanto a la comparación entre los esquemas B, C, D y E, el que produce el menor tiempo medio es el esquema E, es decir, un marcado en forma de copa. El segundo óptimo es el esquema B, semicircular. Por el contrario, el esquema D, "mariposa", es el menos eficaz. La Figura 6 muestra gráficamente los resultados y la Tabla 5 presenta las diferencias porcentuales entre los esquemas.

**Tabla 5** Diferencias sin y con marcas en el andén

| Comparación | Diferencias con respecto al esquema A (%) |           |           |
|-------------|---|-----------|-----------|
|             | $\beta_1$                                 | $\beta_2$ | $\beta_3$ |
| A-B         | -15                                       | -29       | -2        |
| A-C         | -8  | -19       | -2        |
| A-D         | -5  | -4        | +7        |
| A-E         | -25                                       | -38       | -9        |



**Figura 6** Comparación entre los sistemas de marcado

### 3.3. Análisis estadístico

Para determinar si los tiempos medios de cada esquema con respecto al caso sin marcar (A) son estadísticamente diferentes, se aplicó la prueba t de Student de diferencia de medias para un nivel de significación del 95%. La hipótesis nula  $H_0$  significa que la diferencia entre los tiempos medios con respecto al caso A no es estadísticamente significativa. Los cálculos se realizaron con el software EasyFit (MathWave, 2019) y las conclusiones respecto a los resultados experimentales se presentan en la Tabla 6. Se observa que donde dice "Aceptar  $H_0$ " significa que la prueba no rechazó la hipótesis nula.

**Tabla 6** Análisis estadístico de los tiempos medios

| Comparación | Conclusiones   |                |                |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
|             | $\beta_1$      | $\beta_2$      | $\beta_3$      |
| A-B         | Rechazar $H_0$ | Rechazar $H_0$ | Aceptar $H_0$  |
| A-C         | Rechazar $H_0$ | Aceptar $H_0$  | Aceptar $H_0$  |
| A-D         | Aceptar $H_0$  | Aceptar $H_0$  | Rechazar $H_0$ |
| A-E         | Rechazar $H_0$ | Rechazar $H_0$ | Rechazar $H_0$ |

A = sin marcas; B = semicírculo; C = mariposa; D = círculo; E = copa

Se puede observar en la tabla que en el caso del tiempo promedio de embarque ( $\beta_1$ ) no es posible establecer que el esquema D se diferencie del A, donde “aceptar” debe estadísticamente entenderse como que “no fue posible rechazar”. En cambio, en todos los demás los valores de  $\beta_1$  son estadísticamente diferentes de A. Para el tiempo promedio de desembarque ( $\beta_2$ ) no se ha podido comprobar que los esquemas C y D sean mejores que A, pero las marcas B y E consiguen reducir  $\beta_2$ . En el caso del tiempo promedio de embarque y desembarque simultáneo ( $\beta_3$ ) se demuestra que los esquemas D y E son estadísticamente diferentes de A. Sin embargo, el esquema D produce un aumento significativo del 7% respecto al esquema A. Esto sugiere que no es recomendable una demarcación tipo mariposa.

En resumen, los resultados son diversos, pero queda claro que el esquema tipo copa (E), reduce entre un 9% y un 38% los tiempos medios de embarque y/o desembarque respecto a la no utilización de marcas en el andén. También se destaca que el esquema B reduce entre un 15% y un 29% los tiempos medios de embarque ( $\beta_1$ ) y desembarque ( $\beta_2$ ), pero no tiene ningún efecto sobre  $\beta_3$ .

Haciendo algunas suposiciones y utilizando los valores de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  de la Tabla 6, se puede hacer la siguiente comparación entre el esquema A y el esquema E. Un sistema BRT de 10 km y 20 estaciones disminuiría la demora total en las estaciones en un 13% (de 11,3 min a 9,8 min) y reduciría el tiempo total de viaje en un 6% (de 23,2 min a 21,8 min). En consecuencia, la velocidad comercial aumentaría de 26 a 28 km/h. Aunque los porcentajes parecen menores, si se tiene en cuenta la demanda de pasajeros, el número de horas al año y el valor del tiempo de viaje de los usuarios, el beneficio compensará la inversión en señalización.

#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado el efecto de diferentes esquemas de señalización en el andén sobre el comportamiento de los pasajeros para reducir los tiempos medios de subida y bajada en los vehículos de transporte público. La metodología consistió en experimentos a escala real realizados en el Laboratorio de Dinámica Humana de la Universidad de los Andes, Chile, en una maqueta de un vehículo de transporte público. Los resultados indican que una demarcación tipo copa es la más eficaz para reducir los tiempos promedios. Además, una demarcación semicircular reduce el tiempo de embarque o de desembarque, pero no los tiempos de embarque y desembarque simultáneos.

La experimentación en laboratorio como método de investigación ofrece la oportunidad de estudiar casos en los que se controla una variable, mientras que el resto permanece constante. La ventaja de este enfoque en nuestro caso fue que podemos probar el comportamiento de los pasajeros en diferentes condiciones de la gestión de su flujo. Así, fue posible probar nuevos escenarios de demarcación de andenes frente a las puertas de un vehículo de transporte público.

Reconocemos que las limitaciones de la metodología son al menos dos. En primer lugar, los experimentos se realizaron en un modesto laboratorio a escala real, por lo que las conclusiones se limitan a esta instalación. En segundo lugar, los sujetos que participaron en los experimentos eran estudiantes; es decir, personas homogéneas en cuanto a condiciones físicas. Sin embargo, lo que se pretendía en este estudio era calcular las diferencias relativas – no las absolutas – entre los esquemas de demarcación en andenes. Esto nos permite establecer cuál es el mejor esquema, así como el menos eficiente.

Las investigaciones futuras que utilicen este enfoque experimental son, entre otras, la comprobación del comportamiento de sujetos heterogéneos, como personas de diferentes edades, sexo y condiciones de movilidad, así como el estudio del impacto de la densidad de pasajeros en la plataforma y a bordo del vehículo.

Por último, sería interesante que los operadores de transporte público, a la luz de estas conclusiones, realizaran experiencias piloto para validar nuestros resultados experimentales, en particular los porcentajes de reducción de las demoras en las estaciones y los tiempos de viaje. Esto no fue posible en este estudio porque, en las condiciones de covid-19, la demanda de transporte público se redujo drásticamente y no se pudieron realizar estudios de campo debido a las restricciones impuestas por las autoridades de transporte público.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los estudiantes de la Universidad de los Andes, Chile, que ayudaron en los experimentos en el Laboratorio de Dinámica Humana. También se agradece a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas por los fondos que permitieron contratar a los sujetos que participaron en los experimentos.

## REFERENCIAS

Daamen, W., Lee, Y. y Wiggensraad, P. (2008) Boarding and alighting experiments: an overview of the set up and performance and some preliminary results on the gap effects. *Transportation Research Record* **2042**, 71-81.

Fernández, R., Valencia, V. y Seriani, S. (2015) On passenger saturation flows. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **78**, 102-112.

Fernández, R., Zegers, P., Weber, G. y Tyler, N. (2010) Influence of platform height, door width, and fare collection on bus dwell time. Laboratory evidence for Santiago de Chile. *Transportation Research Record* **2143**, 59-66.

Heinz, W. (2003). Passenger service times on trains. Theory, measurements and models, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI).

Helbing, D., Farkas, I. y Vicsek T. (2000) Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* **407**, 487-490

Levinson, H.S. (1983) Analysing transit travel time performance. *Transportation Research Record* **915**, 1-6.

Lin, T.M. y Wilson, N.H.M. (1992) Dwell time relationships for light rail systems. *Transportation Research Record* **1361**. 287–295.

MathWave (2019) <https://mathwave.com.cutestat.com/>

Pretty, R.L. y Russel, D.J. (1988) Bus boarding rates. *Australian. Road Research* **18**, 145–152.

Puong, A. (2000) Dwell Time Model and Analysis for the MBTA Red Line. *Research Memo 02139-04307*, Massachusetts Institute of Technology, Boston.

Tirachini, A. (2013) Bus dwell time: the effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Transportmetrica A: Transport Science* **9**, 28-49.

TRB (2000) *Highway Capacity Manual 2000*. Transportation Research Board, Washington D.C.

Wiggenraad, P.B.L. (2001) Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations - analysis of data collected at 7 stations in October 2000. TRAIL Research School, Delft.