

Experiencias en laboratorio para el diseño de la interfaz vehículo-andén en estaciones del transporte público

LABORATORY EXPERIENCES FOR THE DESIGN FOR THE VEHICLE-PLATFORM INTERFACE IN PUBLIC TRANSPORT STATIONS

Rodrigo Fernández*, Sebastián Seriani, Sebastián Saitua

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes (Chile)

* Autor para correspondencia:
rfa@uandes.cl

RESUMEN

El objetivo esta investigación es estudiar el comportamiento de pasajeros en la interfaz vehículo-andén en estaciones de transporte público, de modo de sugerir recomendaciones de diseño y operación. La metodología consiste en experimentos a escala real en el Laboratorio de Dinámica Humana de la Universidad de los Andes. La ventaja de este método es que se pueden extraer conclusiones sin necesidad de observar en terreno vehículos e infraestructuras existentes. Se encontró diseños que disminuyen los tiempos de subida y bajada por pasajero, algunos no intuitivos. El estudio separado de brechas horizontales y verticales indica que una brecha vertical de 20 cm y una horizontal de 5 cm reducen los tiempos de subida y bajada. El efecto combinado de brechas verticales y horizontales reduce estos tiempos si la suma de ambas es 17 cm. También se observó que la máxima tasa de bajada es de 2 pasajeros por segundo por metro de ancho, para una puerta de 1,65 m.

Palabras clave: transporte público, estaciones, diseños, experimentos

ABSTRACT

The objective of this research is to study the behavior of passengers in the vehicle-platform interface in public transport stations, to suggest design and operation recommendations. The methodology consists of real-scale experiments in the Human Dynamics Laboratory of the Universidad de los Andes. The advantage of this approach is that conclusions can be drawn without the need to observe existing vehicles and infrastructures. Designs that reduce the boarding and alighting time per passenger were found; some of them are contra intuitive. The isolated study of the vertical and horizontal gaps indicates that a 20-cm vertical gap and a 5-cm horizontal gap minimize these boarding and alighting times. The combined effect of vertical and horizontal gaps reduces these times when the sum of them is 17 cm. It was also observed that the maximum alighting rate is 2 passengers per second per meter, which is obtained for a 1.65-m door.

Keywords: Public transport, Stations, designs, Experiments

1. INTRODUCCIÓN

No existe en Chile una base de conocimientos empírica sobre cuál es el mejor diseño de vehículos y estaciones para la operación del transporte público. Tampoco hay estudios sistemáticos respecto de cuáles son las mejores medidas para la gestión del tráfico de pasajeros al interior de los vehículos o en los andenes de estaciones de metro o paraderos de buses. Al parecer, la toma de decisiones al respecto ha nacido de la intuición basada en el método de ensayo y error.

En vista de lo anterior, hace 10 años los autores iniciaron una línea de investigación experimental en el laboratorio PAMELA (Pedestrian Accessibility Movement Environment Laboratory) del University College London, la que ha continuado en el Laboratorio de Dinámica Humana (LDH) de la Universidad de los Andes (Santiago-Chile) (Fernández et al., 2010). Su propósito ha sido estudiar el efecto de variables de diseño de vehículos y andenes en el Tiempo de Servicio de Pasajeros (TSP) o *dwell time* (TRB, 2013; Tyler, 2012; Tirachini, 2013). El TSP repercute en las demoras, detenciones y longitudes de colas en estaciones. A su vez, estos impactos tienen efecto en los tiempos de espera de los pasajeros y en sus tiempos de viaje en todo el sistema de transporte público. Estudios realizados en Estados Unidos (Levinson, 1983), Europa (Fernández, 2001) o Europa del Este (Birr et al., 2014) han encontrado que el tiempo que consumen los vehículos de transporte público en paraderos puede variar entre un 30 a 50% del tiempo de viaje. Por otra parte, Gibson et al. (2015) encontraron que, debido a la eficiencia en las operaciones de subida y bajada, en sistemas BRT el tiempo consumido en estaciones es aproximadamente un 10 a 30% del tiempo total de viaje. El TSP permite a las agencias de transporte público, ya sean públicas o privadas, calcular los costos de operación, definir el tamaño de flota y tipo de vehículo, asignar tripulaciones y estimar el kilometraje por vehículo. Lo anterior permite realizar análisis costo-beneficio para evaluar inversiones en infraestructura o mejoras operacionales del transporte público.

El objetivo esta investigación fue estudiar, mediante experimentos a escala real en el LDH de la Universidad de los Andes (UANDES), medidas de ingeniería en la interacción entre vehículos y andenes en estaciones de transporte público, de modo de plantear sugerencias de diseño.

De los experimentos surgieron medidas de diseño que disminuyen los tiempos de subida y bajada, algunas de las cuales tienen resultados no intuitivos, demostrado la utilidad de estudiar escenarios que no necesariamente se dan en la realidad. Esta estrategia de investigación experimental permite levantar la restricción de tener que observar en terreno vehículos e infraestructuras existentes para extraer conclusiones sobre la operación del transporte público (Fernández et al., 2015).

En lo que sigue de este artículo se entenderá por “estación” una estación ferroviaria (metro, tranvía, tren), una estación de BRT (Bus Rapid Transit) o un paradero de buses. Igualmente, “vehículo” se referirá a un bus mono bloque, bus articulado, bus guiado por la vía, tranvía, convoy de metro o de tren.

2. BASE CONCEPTUAL

El TSP es el tiempo que le toma a un vehículo tomar y dejar pasajeros en una estación. Es la principal componente del número de máximo de vehículos que puede atender la estación; es decir su capacidad. Ambas variables se relacionan de acuerdo con las ecuaciones siguientes (Tyler, 2002; TRB, 2010).

$$Q_E = \frac{3600 N}{h_{min}} \quad (1)$$

$$h_{min} = t_c + PST \quad (2)$$

$$PST = \beta_0 + P_{si} + P_{bi} + \max_i \{ P_{si}; P_{bi} \} \quad (3)$$

Donde Q_E es la capacidad de la estación (veh/h); N es el número de vehículos que se detienen al mismo tiempo en la estación; h_{min} es el intervalo mínimo posible entre vehículos (s); t_c es una constante igual al tiempo que toma al vehículo entrar y salir de la estación (s); β_0 es un parámetro que indica el tiempo muerto antes del inicio del proceso de transferencia de pasajeros, como la apertura y cierre de puertas (s); β_1 y β_2 son los tiempos respectivos de subida y bajada por pasajero (s/pax), asumidos constantes; P_{si} y P_{bi} es el respectivo número de pasajeros que sube y baja del vehículo por la puerta i más demandada. En el caso de abordaje y descenso sucesivo (sistemas de metro) se utiliza la suma del tiempo total de subida y bajada. Si el abordaje y descenso es simultáneo porque hay puertas diferenciadas para subir y bajar (caso de los buses), se aplica el máximo.

La manera tradicional ha sido medir el PST, P_{si} y P_{bi} para estimar por regresión los parámetros β_k . Como resultado se han encontrado varias funciones más o menos complejas del PST. Algunos ejemplos son Tirachini (2013), Fernández et al. (2008), Gibson et al (1997), Fernández et al. (1995), York (1993), Pretty y Russel (1988), Cundill y Watts (1973), entre otros. Entre estos, destaca un exhaustivo estudio del PST en distintos tipos de paraderos en Santiago y Valparaíso-Viña del Mar (Tirachini et al., 2015). Solo a modo de ejemplo, se presenta el resultado de Fernández et al. (2008) en los inicios de Transantiago.

$$PST = \beta_0 + \max_i \{ (\beta_1 + \beta_1 \delta_1) P_{si} + (\beta_2 + \beta_2 \delta_2) P_{bi} \} \quad (4)$$

Donde δ_1 y δ_2 son variables mudas que dependen de la cantidad de pasajeros que sube y baja, respectivamente. El resto de las variables y parámetros tienen el mismo significado que en la Ecuación (3). Los valores de los parámetros se muestran en la Tabla 1, donde el estadígrafo t está entre paréntesis bajo cada parámetro. Se observa que, con excepción de un caso (β_2' en servicios alimentadores), todos los demás parámetros resultaron estadísticamente significativos. Además, el coeficiente de ajuste parece apropiado para este tipo de correlaciones con datos reales y fenómenos complejos.

Tabla 1

Parámetros del PST para buses de Transantiago

Parámetro Servicio	β_0 [s]	β_1 [s/pax]	β_1' [s/pax]	β_2 [s/pax]	β_2' [s/pax]	$\delta_1 = 1$ Suben	$\delta_2 = 1$ Bajan	R ²
Troncal	9,32 (4,1)	2,05 (14,2)	0,88 (4,9)	3,32 (8,1)	1,93 (4,4)	≥ 40	≥ 15	0,84
Alimentador	8,04 (2,7)	3,82 (10,4)	2,22 (2,1)	1,80 (13,6)	0,36 (1,7)	≤ 5	≤ 25	0,72

Los resultados indican que el tiempo de embarque por pasajero aumenta a medida que aumenta el número de pasajeros que sube y el tiempo de descenso disminuye a medida que aumentan los pasajeros bajan, fenómeno también reportado por Gibson et al. (1997). Pero estos efectos son diferentes según el tipo de servicio.

En los servicios de troncales, que tienen alta demanda, vehículos de piso bajo y puertas anchas, el proceso de descenso se acelera cuando la cantidad de pasajeros que baja alcanza un valor mayor o igual a 15. Por el contrario, si muchos pasajeros abordan el bus (40 o más) el proceso de embarque es más lento, debido al incremento en la tasa de ocupación que obstruye el flujo de pasajeros hacia el interior del bus.

En los servicios alimentadores se produce el efecto opuesto. Cuando pocos pasajeros abordan (menos de 5), el proceso de embarque es lento y si muchos pasajeros bajan (25 o más), el proceso de descenso se ralentiza. Las observaciones de campo indican que esto se debe a la falta de presión para el abordaje en el primer caso y debido a que los vehículos alimentadores tienen puertas más angostas y escalones en el segundo.

Contrariamente a este método tradicional, nuestra contribución al problema ha sido la obtención de β_1 y β_2 mediante experimentos a escala real realizados en el LDH de la UANDES. Estudios similares han sido reportados por Daamen et al. (2008) y Daamen y Hoogendoorn (2010). La metodología consistió en usar una maqueta de un vehículo de transporte público y de su andén adyacente. En ella se estudiaron variables físicas en busca de valores que redujeran los tiempos de subida y bajada de pasajeros. En los experimentos, individuos simulando ser pasajeros subieron y bajaron del “vehículo” repetidas veces, hasta obtener un tamaño de muestra representativo y resultados estadísticamente significativos. Los sujetos que participaron en los experimentos fueron estudiantes de distintas carreras y cursos de la Universidad de los Andes.

3. EXPERIMENTACIÓN

El LDH es un laboratorio prototipo destinado al estudio del movimiento de personas, desde partes del cuerpo hasta masas de gente. Su objetivo principal, aunque no el único, es la investigación del comportamiento de pasajeros en sistemas de

transporte público, con el fin de entregar recomendaciones de diseño de vehículos, infraestructura y gestión del tráfico peatonal en metros, trenes y buses.

En el laboratorio se puede representar tanto el hall de subida como de bajada de un vehículo de transporte público, como muestran las Figuras 1 y 2 para el caso de un bus. De la misma manera, se puede modelar el hall de un coche de metro (Figura 3)

Para este estudio se realizaron experimentos de las siguientes variables de diseño de un vehículo y andén de transporte público: (a) el ancho de puertas del vehículo; (b) la brecha vertical entre andén y vehículo; (c) la brecha horizontal entre andén y vehículo; y (d) combinaciones de brechas horizontales y verticales (Figura 4).

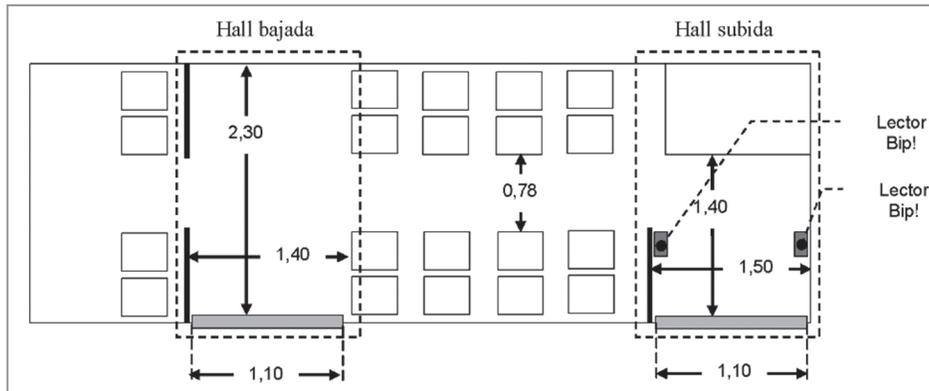


Figura 1. Dimensiones del hall de subida y bajada de un bus (m)

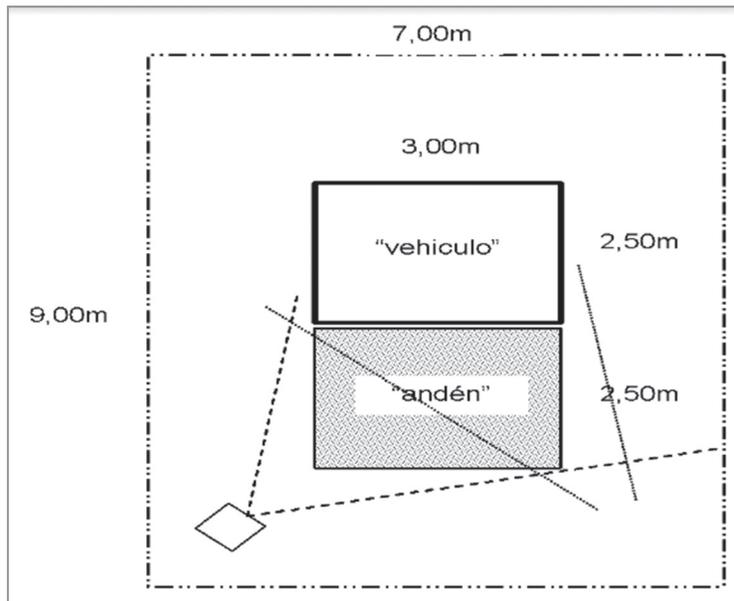


Figura 2. Maqueta que representa el hall de un vehículo de transporte público



Figura 3. Vista de un experimento en el LDH simulando un hall de metro

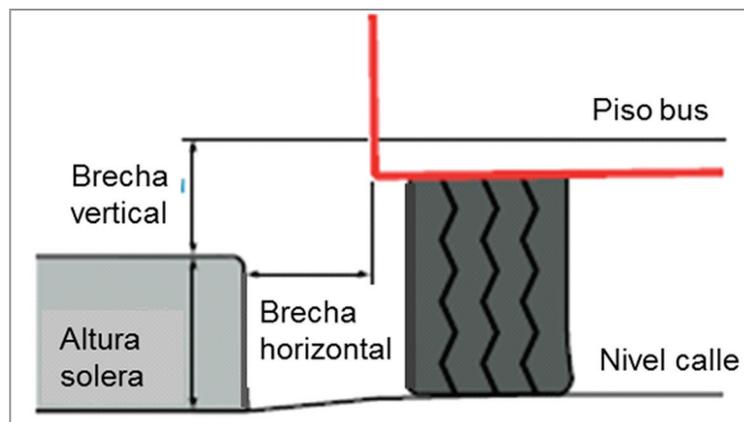


Figura 4. Definición de brechas horizontales y verticales

Cada experimento consistió en el estudio *ceteris paribus* del efecto de una variable independiente sobre las variables dependientes β_1 y β_2 . Cada observación se realizó por separado; es decir, no se realizaron subidas y bajadas simultáneas, dado que se quería aislar el efecto de interacción entre flujos bidireccionales, caso que se estudiará en futuras experiencias (Figura 5).

En los experimentos, individuos simulando ser pasajeros subieron y bajaron del “vehículo” repetidas veces hasta obtener un tamaño de muestra representativo de 30 a 40 repeticiones y resultados estadísticamente significativos ya sea al 5% o 10%.

En todos los casos la densidad de pasajeros dentro del vehículo se mantuvo en 4 pax/m², que es la usual para el diseño de vehículos de transporte público (TRB, 2013).

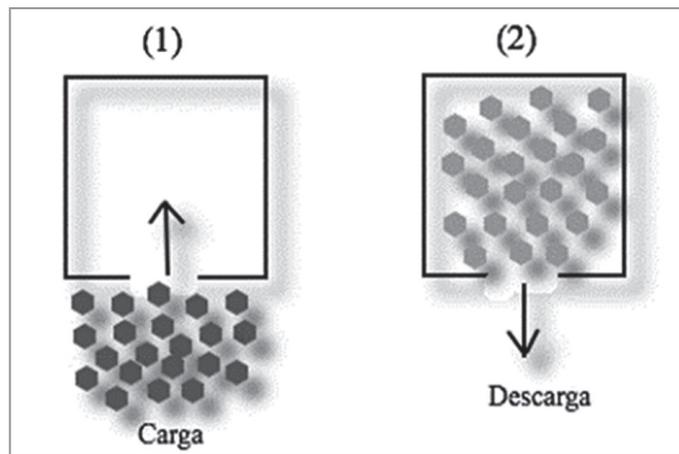


Figura 5. Esquema de cada simulación en el LDH

Las operaciones de subida y bajada fueron grabadas con al menos tres cámaras de video (frontal, vertical sobre la puerta y lateral del interior del vehículo), cuyas imágenes fueron luego procesadas manualmente.

Para el ancho de puertas se estudió solo la tasa de descarga desde puertas de 600 a 2000 mm de ancho, de modo de encontrar su valor máximo (Fernández et al., 2015). Como se aprecia en la Tabla 2, se probaron los anchos de puerta de vehículos urbanos típicos, pero también de aquéllos no existentes. Ello amplió el rango de la variable independiente, aprovechando las ventajas que tiene hacer experimentos en laboratorio. Para aislar la variable experimental de otros efectos, las brechas horizontales y verticales fueron nulas.

Tabla 2
Experimentos de anchos de puertas

Ancho de puerta [mm]	Experimentos
600	No existente
800	Buses Transantiago 8 m
1100	Buses Transantiago 12 y 18 m
1300	Metro Santiago coches antiguos
1650	Metro Santiago coches nuevos
1850	Metro Londres coches nuevos
2000	No existente

El estudio de la brecha vertical buscó determinar el efecto de distintas alturas andén-vehículo sobre β_1 y β_2 . Estos valores se obtienen dividiendo el tiempo total que le toma al conjunto de pasajeros subir o bajar por el número de pasajeros que suben o bajan. La Tabla 3 muestra los valores experimentales y el caso asociado. En este experimento se fijó la brecha horizontal en 0 mm y el ancho de puertas en 1650 mm, producto de los resultados del ancho de puertas.

En la Tabla 3, una parada con andén es una estación con alta demanda en la cual la acera se eleva frente al área de parada. En Santiago suelen denominarse “zonas paga” porque la tarifa se paga a la entrada de estas. En la tabla, las subidas/bajadas desde/hacia la calzada simulan el caso en que el vehículo se detiene lejos de la acera y los pasajeros deben usar la calzada para subir y bajar. Al igual que para el caso del ancho de puertas, se experimentó con brechas no existentes.

Tabla 3
Experimentos de brechas verticales

Brecha vertical [mm]	Experimentos
0	Caso base
50	Parada con andén
100	No existente
150	Parada normal
200	No existente
250	No existente
300	Subida/bajada desde/hacia calzada

En la Tabla 4 se muestran los casos de estudio de las brechas horizontales. El ancho de puertas se fijó en 1650 mm y la brecha vertical se mantuvo en 0 mm. Para estos experimentos se midieron en terreno brechas horizontales, ya que no se conocían valores *a priori*.

Finalmente, en el estudio de la combinación de brechas horizontales y verticales también se realizaron mediciones en terreno y se seleccionaron las mostradas en la Tabla 5. En este caso el ancho de puertas se mantuvo en 1650 mm.

Tabla 4
Experimentos de brechas horizontales

Brecha horizontal [mm]	Experimentos
0	Caso base
50	Metro, mínimo observado
100	Metro, máximo observado
200	Bus, mínimo observado
350	Bus, medio observado
400	Bus, máximo observado

Tabla 5
Experimentos de combinación de brechas horizontales y verticales

Combinaciones de brechas [mm]		Experimentos
Vertical	Horizontal	
0	0	Caso base
50	50	Metro, mínimo
70	100	Metro, máximo
100	150	Bus, zona paga
200	200	Bus, parada promedio
250	300	Bus, parada
300	400	Bus, de/hacia calzada
350	500	Bus, caso extremo

4. RESULTADOS

4.1 Ancho de puertas

Los resultados del efecto del ancho de puertas sobre la tasa máxima de descarga de pasajeros se muestran en la Tabla 6 y en la Figura 6 en pasajeros por segundo y pasajeros por segundo por metro de ancho.

Tabla 6
Valores del flujo de saturación de pasajeros

Ancho de puerta [mm]	Flujo de saturación [pax/s]	Flujo de saturación [pax/s-m]
600	1,09	1,82
800	1,47	1,83
1100	2,07	1,88
1300	2,60	2,00
1650	3,40	2,06
1850	3,68	1,99
2000	3,84	1,92

Como se puede ver en la Figura 6, el flujo de saturación de pasajeros, en pasajero por segundo, crecen con el ancho de puerta, como era de esperar. Sin embargo, hay un rendimiento decreciente a medida que las puertas se vuelven más y más amplias. De hecho, a partir de 1650 mm, la tasa de aumento en el flujo de saturación disminuye. Esto es más evidente si se mira el flujo de saturación en pasajeros por segundo por metro de ancho (pax/s-m). Claramente, el flujo de saturación más alto se alcanza para una puerta de 1650 mm. Por lo tanto, según nuestros datos, este ancho parece ser el mejor desde la perspectiva de la descarga de pasajeros, alcanzando una tasa máxima de 2,06 pax/s-m.

La comparación estadística de los resultados usando la prueba t-Student de diferencias de medias mostró que las variaciones de ancho entre 1100 y 1300 mm son estadísticamente significativas al 10%. Lo mismo ocurre para la variación de ancho entre 1650 y 2000 mm. En los otros casos, las diferencias no son significativas y se deberían al azar. Esta comparación estadística podría ser más concluyente con un mayor tamaño de muestra (Fernández-Undurraga, 2013).

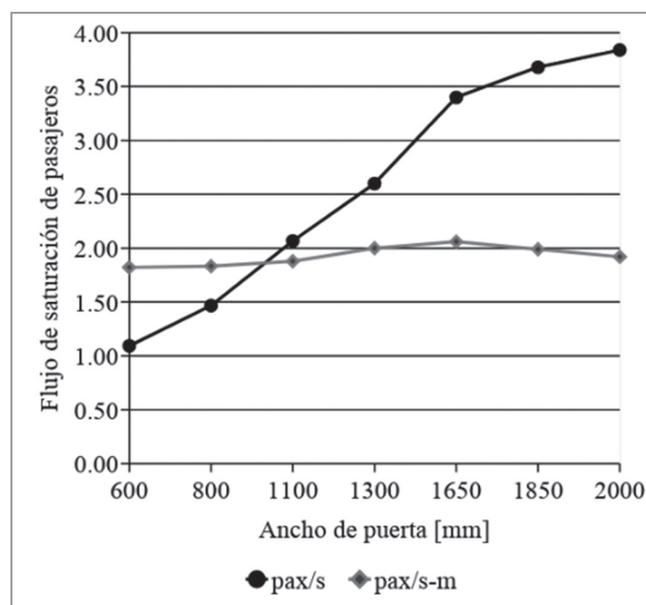


Figura 6. Flujo de saturación de pasajeros en función del ancho de puertas

4.2 Brecha vertical

Los resultados del efecto de la brecha vertical sobre los tiempos marginales de subida y bajada se resumen en la Tabla 7 y Figura 7. Hay que recordar que β_1 es el tiempo marginal de subida por pasajeros y β_2 el de bajada, ambos en segundos por pasajero.

A primera vista, los tiempos marginales pueden parecer bajos, pero hay que considerar dos cosas. Primero, la literatura (TRB, 2000) reporta valores mínimos de tiempos de subida y bajada de 0,5 y 0,4 [s/pax], respectivamente. Además, en puertas por las cuales pueden circular dos filas de pasajeros, que es el caso de nuestros experimentos, los valores se deben ponderar por 0,6; es decir, 0,3 y 0,24 [s/pax], respectivamente. Segundo, en los experimentos participaron solo personas jóvenes simulando ser pasajeros, lo que debiera reducir los tiempos de subida y bajada, en comparación con una muestra heterogénea de pasajeros reales. En todo caso, esta investigación busca determinar las diferencias entre diseños físicos, más que valores absolutos de β_1 y β_2 .

Los resultados muestran que los menores tiempos marginales no se producen para una brecha vertical nula, sino que para una brecha de 200 mm. Curiosamente, esta es la misma altura que tienen los peldaños de todas las escaleras en casas y edificios, lo que sugiere una razón fisiológica para el resultado, la que será materia de futuras investigaciones interdisciplinarias.

De cualquier forma, 200 mm es la brecha que maximizaría la “eficiencia” de las operaciones de subida y bajada. Pero desde el punto de vista de la accesibilidad, una brecha nula es preferible, con una pérdida de eficiencia de entre un 2% en β_1 y 5% en β_2 .

Tabla 7
Efecto de la brecha vertical sobre los tiempos marginales

Brecha vertical [mm]	β_1 [s/pax]	β_2 [s/pax]
0	0,43	0,39
50	0,44	0,38
100	0,45	0,39
150	0,43	0,38
200	0,42	0,37
250	0,44	0,40
300	0,43	0,40

Obsérvese, sin embargo, que una brecha de 50 mm solo aumenta un 2% el tiempo de bajada, sugiriendo que brechas nulas producirá un incremento de solo un 2% tanto en β_1 como en β_2 . En términos prácticos, significa que en buses lo conveniente sería que el piso esté a nivel del andén. En efecto, el análisis de significancia estadística revela que no hay diferencias significativas al 5% entre brechas de 0 y 50 mm (Alonso, 2015).

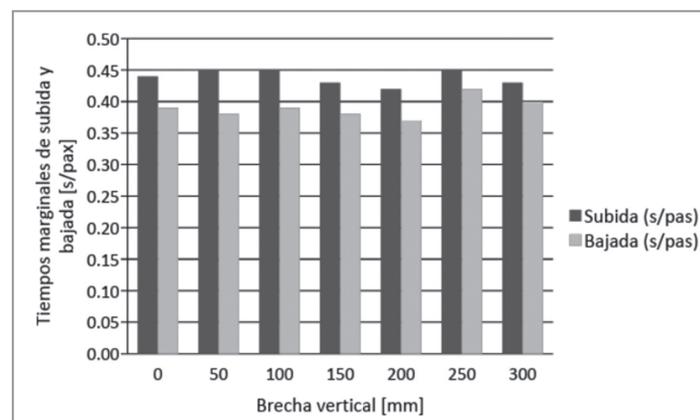


Figura 7. Tiempos marginales como función de la brecha vertical

4.3 Brecha horizontal

La Tabla 8 y Figura 8 entregan los resultados del estudio de brechas horizontales sobre los tiempos marginales de subida y bajada.

Al igual que en el caso de la brecha vertical, se observa que los menores tiempos marginales no corresponden a una brecha horizontal nula. Por el contrario, en el caso de β_1 su menor valor se consigue para una brecha de 50 o 400 mm. Y en el caso de β_2 es indiferente si la brecha es de 50, 100 o 400 mm.

Tabla 8
Efecto de la brecha horizontal en los tiempos marginales

Brecha horizontal [mm]	β_1 [s/pax]	β_2 [s/pax]
0	0,32	0,27
50	0,24	0,22
100	0,25	0,22
200	0,26	0,25
350	0,26	0,24
400	0,24	0,22

Observando el comportamiento en los videos de los experimentos, se constata que, para el curioso resultado de los 400 mm, los pasajeros no suben o bajan, sino que “saltan” hacia el vehículo o el andén para salvar la brecha. Esto es posible dado que, como se indicó más arriba, los sujetos experimentales son jóvenes en buen estado físico. Obviamente, esta no es una recomendación de diseño razonable

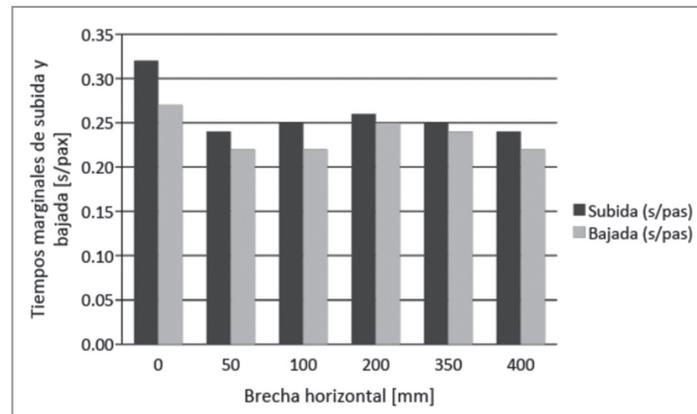


Figura 8. Tiempos marginales como función de la brecha horizontal

Respecto al resultado en el caso de las brechas de 50 o 100 mm, las observaciones del comportamiento indican que una pequeña separación andén-vehículo hace que los sujetos presten más atención a la subida y bajada y, por consiguiente, lo hagan más rápido que en el caso de brecha nula. Es decir, cuando no hay separación los pasajeros “caminan” en vez de subir o bajar.

Lo anterior es confirmado con el análisis de significancia estadística que establece diferencias significativas al 5% al comparar una brecha horizontal nula con una de 50 mm, tanto al subir como al bajar del vehículo (Rodríguez, 2016). Sin embargo, al igual que en el caso de la brecha vertical, es mejor una separación nula que una de 50 mm si el objetivo es la accesibilidad. En tal caso, habría que aceptar una pérdida de eficiencia en los procesos de bajada y subida de entre un 20 a 25%.

4.4 Brecha horizontal y vertical combinadas

El resultado de este experimento se muestra en la Tabla 9 y Figura 9 (Saitua, 2017).¹

Los resultados arrojan que la combinación de una brecha vertical de 70 mm con una horizontal de 100 mm entrega los menores tiempos marginales de subida (β_1) y bajada (β_2). Sin embargo, la prueba t-Student sobre los valores de β_1 no muestra diferencias estadísticamente significativas al 5% con respecto de la combinación 50-50 mm, ni entre ésta y la combinación 0-0 mm. Con respecto a β_2 , por su parte, el análisis muestra diferencias significativas entre la combinación 0-0 mm y 50-50 mm, no así entre ésta y la combinación 70-100 mm.

Luego, en términos prácticos se puede recomendar una combinación 0-0 mm al subir una 50-50 mm para bajar. Como esto es poco factible en una interfaz vehículo-andén, una combinación 0-0 mm parecería apropiada. No obstante, la menor combinación de brechas observadas en el Metro de Santiago fue de 40 mm vertical y 50 mm horizontal. Asimismo, mediciones hechas en buses de Santiago mostraron que la mínima brecha vertical es 60 mm y la horizontal 170 mm. En consecuencia, tratar de conseguir una combinación 50-50 mm en toda interfaz vehículo-andén del transporte público plantea un desafío a la ingeniería.

Tabla 9
Efecto de la combinación de brechas horizontales y verticales

Brechas [mm]		β_1 [s/pax]	β_2 [s/pax]
Vertical	Horizontal		
0	0	0,26	0,23
50	50	0,30	0,25
70	100	0,23	0,19
100	150	0,28	0,24
200	200	0,26	0,22
250	300	0,26	0,21
300	400	0,32	0,27
350	500	0,29	0,25

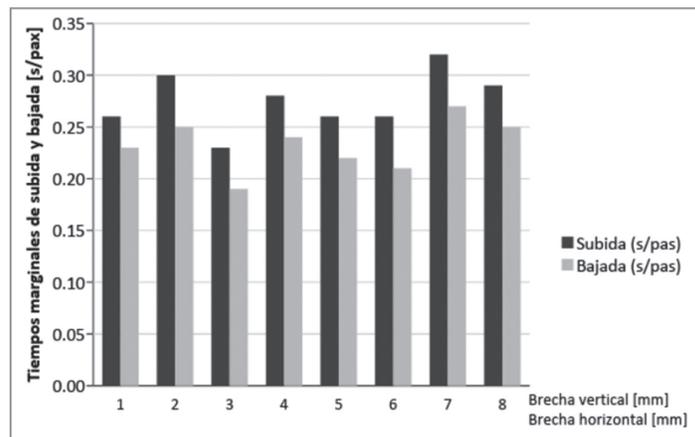


Figura 9. Tiempos marginales como función de la combinación de brecha horizontal

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la aplicabilidad de los experimentos a escala real para determinar los efectos de variables de diseño físico de andenes y vehículos de transporte público. La ventaja de la experimentación en estudios de tráfico radica en que se pueden probar contextos que expanden los existentes. Y una vez demostradas las ventajas de un determinado diseño se pueden aplicar a la realidad. Por ejemplo, si se determina que el ancho de puertas y la altura de chasis de un vehículo es mejor que otro, entonces se mandará a construir el material rodante con esas características y no con las que ofrece el fabricante.

En relación con los resultados del estudio, se pudo determinar lo siguiente:

El ancho de puertas que maximiza la tasa de descarga desde un vehículo transporte público es de 1,65 m, para el cual la tasa es de 2 pax/s-m. Este dato difiere del sacado de la literatura, que indica que la máxima tasa de descarga es el inverso del tiempo marginal de bajada ($1/\beta_2$), reportando valores de entre 0,7 a 1,7 pax/s, sin especificar para qué ancho de puerta.

La brecha vertical que minimiza los tiempos de marginales de subida y bajada es de 20 cm; sin embargo, para maximizar la accesibilidad se puede usar una brecha nula con una pérdida de solo un 5% de eficiencia sobre β_1 y β_2 .

La mejor brecha horizontal para minimizar β_1 y β_2 es 5 cm. Curiosamente, se encontró valores similares de β_1 y β_2 para una brecha de 40 cm. Desde una perspectiva de mera eficiencia ingenieril se podría concluir que los vehículos pueden detenerse lejos del andén sin mayores inconvenientes. No obstante, desde la visión de accesibilidad universal, el diseño se debe limitar a 5 cm.

Respecto al tema de accesibilidad universal al transporte público en Chile no hay nada explícito sobre estándares. La única referencia es que todo acceso a transporte público deberá ser accesible y autovalente por personas con movilidad reducida (MINVU, 2016).

Se encontró que, para el efecto combinado de brechas verticales y horizontales, la suma de estas que entregan menores valores de β_1 y β_2 es de 170 mm (70 mm vertical + 100 mm horizontal). Este resultado concuerda con la literatura respecto a la accesibilidad al transporte público (DfT, 2004), la que indica que la suma debe ser menos a 200 mm y que, si la brecha vertical es 50 mm y la horizontal de 75 mm, se requiere dispositivos para permitir el uso de sillas de ruedas. Nuestros resultados recomiendan una combinación de brecha vertical y horizontal de 50-50 mm.

Se reitera lo indicado en el texto en el sentido que lo que busca esta investigación es determinar las diferencias entre diseños físicos, más que entregar valores absolutos de β_1 y β_2 . En consecuencia, posteriores investigaciones en esta línea de trabajo consideran, entre otros aspectos:

- Validar los resultados obtenidos en vehículos e infraestructuras reales.
- Considerar en los experimentos a sujetos que representen la diversidad de pasajeros en sexo, edad, ropa, carga, condición física, etc.
- Estudiar el efecto sobre β_1 y β_2 de la densidad y tipo de pasajeros dentro del vehículo y en el andén.
- Determinar cuál sería la mejor ubicación de pasamanos horizontales y verticales para un comportamiento adecuado de los pasajeros.
- Explorar el efecto sobre β_1 y β_2 de la gestión de tráfico peatonal en andenes y vehículos.
- Calcular los tiempos de evacuación de vehículos de transporte público ante incidentes.

El Laboratorio de Dinámica Humana de la Universidad de los Andes es el único en su tipo en Chile y uno de los pocos reportados en el mundo. Busca ser un aporte para las agencias de transporte público que deben diseñar y evaluar nuevos dispositivos, vehículos e infraestructuras. Es también provechoso para investigadores en transporte público en sus diferentes niveles para calibrar y validar sus modelos. Finalmente, puede ser de interés para la gestión de la capacidad de estaciones de metro y paraderos de buses, aspecto crítico en varios sistemas de transporte público en Latinoamérica. De esta forma, su utilidad trasciende el ámbito chileno.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento de los proyectos FONDECYT Regular 1080381 y 1120219. Se resalta asimismo el acceso proporcionado por University College London al Pedestrian Accessibility Movement Environment Laboratory (PAMELA). En la Universidad de los Andes se debe reconocer al Fondo de Ayuda a la Investigación (FAI) y el aplicado trabajo de los ayudantes de investigación Joaquín Fernández Undurraga, Andrés Alonso Matte, Jorge Rodríguez Garcés y Sebastián Saitua Rojas.

REFERENCIAS

- Alonso, D. (2015). Recomendaciones para diseño de infraestructura, vehículos y gestión de pasajeros en estaciones del transporte público. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de los Andes, Santiago.
- Birr, K., Jamroz, K. y Kustra, W. (2014) Travel time of public transport vehicles estimation. *Transportation Research Procedia*, 3, 359-365.
- Cundill, M.A. y P.F. Watts (1973). *Bus boarding and alighting times*. Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report LR 521, Crowthorne.
- Daamen, W. y Hoogendoorn, S. (2010). Capacity of doors during evacuation conditions. *Procedia Engineering* 3, 53-66.
- 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: Journal of the Transportation Research Board*, (2042), 71-81.
- DfT (2004). Significant Steps:- technical analysis, Research Commissioned by UK Department for Transport.
- Fernandez, R. Seriani, S. y Valencia, A. (2015). On passenger saturation flows. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 102-112.
- Fernández-Undurraga, J. (2013). Estimación experimental de del flujo de saturación a través de puertas del transporte público. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes, Santiago.
- Fernandez, 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: Journal of the Transportation Research Board*, 2143, 59-66.
- Fernández, R., del Campo, M.A. y Swett, C. (2008). Data collection and calibration of passenger service time models for the Transantiago system. European Transport Conference 2008 (CD-Rom). The Netherlands, 6-8 October 2008.
- Fernández, R. (2001). Modelling Bus Stop Interactions. PhD Thesis, University of London.
- Fernández, R., Gibson, J. y Méndez, M. (1995) Modelación del comportamiento en paraderos formales. En actas del VII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. 17-20 octubre 1995, Santiago, 358-368.
- Gibson, J., Fernández, R. y Albert, A. (1997). Operación de paraderos formales en Santiago. Actas de VIII Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. 11-14 noviembre 1997, Santiago, 397-408.
- Gibson, J., Munizaga, M.A., Scheider, C. y Tirachini, A. (2015). Median busways versus mixed-traffic: estimation of bus travel time under different priority conditions with explicit modelling of delay at traffic signals. Transportation Research Board 94th Annual Meeting, Washington D.C.
- Levinson, H. (1983). Analyzing transit travel performance. *Transportation Research Record* 915.

MINVU (2016). Decreto 50: MODIFICA DECRETO SUPREMO Nº47, DE VIVIENDA Y URBANISMO, DE 1992, ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES EN EL SENTIDO DE ACTUALIZAR SUS NORMAS A LAS DISPOSICIONES DE LA LEY Nº20.422, SOBRE IGUALDAD DE OPORTUNIDADES E INCLUSIÓN SOCIAL DE PERSONAS CON DISCAPACIDAD.

Pretty, R.L. y Russel, D.J. (1988) Bus boarding rates. *Australian Road Research* 18(3), 145-152.

Rodríguez, J. (2016). Estudio experimental de medidas de ingeniería en la interfaz andén-vehículo en estaciones de transporte público. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de los Andes.

Saitua, S. (2017). Experimentos sobre la brecha andén-vehículo en estaciones de transporte público. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad de los Andes.

Tirachini, A., Camus, L. y Cruz, D. (2015). Modelación de tiempos de detención de buses en paraderos de Santiago y Valparaíso-Viña del Mar. *Ingeniería de Transporte*, 19(2), 103-116.

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(1), 28-49.

TRB (2013). *Transit Capacity and Quality of Service Manual TCQSM*, 3rd Edition, TCRP Report 165, Transportation Research Board, Washington, D.C.

TRB (2010) *Highway Capacity Manual HCM 2010*. Transportation Research Board, Washington, D.C.

Tyler, N.A. (2012) *Accessibility and the bus system: from concepts to practice*. Thomas Telford, London.

York, I.O. (1993) *Factors affecting bus-stop times*. Transport Research Laboratory, Project Report 2, Crowthorne.