

## EFECTO DE LA DENSIDAD DE PASAJEROS EN EL ESPACIO OCUPADO POR PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA

Joaquín Valdivieso, Universidad de los Andes [jvaldivieso@miuandes.cl](mailto:jvaldivieso@miuandes.cl)  
Sebastián Seriani, Universidad de los Andes, [sseriani@miuandes.cl](mailto:sseriani@miuandes.cl)

### RESUMEN

El objetivo es estudiar el espacio que ocupa un pasajero con movilidad reducida (PMR) en zonas de espera preferencial de andenes urbanos ferroviarios. Para ello, se ha diseñado un prototipo de área de espera preferencial en el Laboratorio de Dinámica Humana de la Universidad de los Andes (Chile). Con este prototipo definido, se desarrolló un método de detección utilizando el software Petrack para identificar con precisión los límites del espacio ocupado por un usuario de silla de ruedas bajo dos escenarios de diferentes niveles de densidad. Se observó que el espacio ocupado por un usuario de silla de ruedas disminuyó en un 33% a medida que la densidad aumentaba de un nivel medio a alto. Por otro lado, para un nivel de alta densidad, se encontró que el espacio ocupado por un usuario de silla de ruedas es un 61% mayor que el que ocupa un pasajero sin movilidad reducida.

*Palabras claves:* *espacio ocupado, densidad, andén ferroviario, zonas de espera, usuario de silla de ruedas.*

### ABSTRACT

The objective is to study the space occupied by passengers with reduced mobility (PRM) at preferential waiting areas in urban railway platforms. To this, a design of a prototype was carried out in order to represent a preferential waiting area in the Human Dynamics Laboratory of the Universidad de los Andes (Chile). With this defined prototype, a detection method was developed using software Petrack to accurately identify the limits of the space occupied by a wheelchair user under different platform density levels. It was observed that the space occupied by a wheelchair user decreased by 33% as the density increased from a medium to a high level. On the other hand, for a high density level, it was found that the space occupied by a wheelchair user is 61% greater than that occupied by a passenger without reduced mobility.

*Keywords:* *occupied space, density, railway platform, waiting areas, wheelchair user.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el metro en Santiago es el eje principal del sistema de transporte público de la capital, conectando 26 de las 52 comunas que componen la Región Metropolitana gracias a la operación de sus seis líneas. Es considerado el modo con mayor poder estructurante de la ciudad, es decir el de mayor relevancia frente a otros modos de transporte (Subsecretaría de Transportes, 2013). De esta manera, su tasa de ocupación refleja que el 58% de los viajes realizados en el transporte público corresponden al modo de transporte en el sistema de metro (Subsecretaría de Transportes, 2013). Su alta eficiencia asociada a los campos de capacidad, frecuencia y cero emisión, es un fuerte disuador haciendo que las personas opten por este tipo de transporte por sobre otros, es por ello que en un día común laboral, ha llegado a registrar cerca de 3 millones de usuarios en condiciones normales (Metro de Santiago, 2019).

Es en este contexto en donde se han debido establecer ciertas normas, regulaciones y estándares para que el sistema de metro en Santiago sea un modo de transporte con accesibilidad universal. El término de accesibilidad universal se ha definido como “la condición que deben cumplir los entornos, procesos, bienes, productos y servicios para ser comprensibles, utilizables y practicables por todas las personas, en condición de seguridad y comodidad, de la forma más autónoma y natural posible” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2016). Los datos demográficos del país tomados durante el año 2015, justifican la necesidad de implementar la accesibilidad universal, en donde se indica que el número de habitantes que presentan algún tipo de discapacidad corresponde al 16,7% de la población total de Chile, mientras que en Santiago el total de personas con discapacidad corresponde al 17,2% lo que es equivalente a 1.188.757 de personas (Ministerio de Desarrollo Social, 2015). Ahora bien, como los modos de transportes deben ser accesibles por todas las personas incluyendo así las personas con discapacidad y movilidad reducida, solo resta determinar quiénes son las personas que se clasifican en estas categorías. Una persona con discapacidad es “aquella que teniendo una o más deficiencias físicas, mentales, sea de causa psíquica o intelectual, o sensoriales, de carácter temporal o permanente, al interactuar con diversas barreras presentes en el entorno, ve impedida o restringida su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con las demás” (Ministerio de Planificación, 2011). Por otro lado, una persona con movilidad reducida (PMR en adelante) es un subgrupo del grupo de personas con discapacidad, y en el ámbito del transporte público se le define como “aquella persona que por causa de su discapacidad, presenta dificultad para acceder o utilizar el transporte público” (Ministerio de Planificación, 2011).

En este mismo sentido Metro de Santiago (2019) ha generado diversas medidas para intentar asegurar una correcta accesibilidad universal tanto para PMR tales como pasajeros en silla de ruedas. Entre ellas se puede destacar la instalación de ascensores en sus estaciones garantizando el acceso para todos los usuarios a los andenes, delimitaciones de espacios preferenciales al interior de los vagones y la demarcación de zonas de espera en los andenes de estaciones. Esta última medida, se divide en dos tipos de zonas. La primera zona de espera es la de emergencia, la cual está bajo el monitoreo constante de las cámaras de seguridad en caso de que ocurra algún incidente. Por otra parte, la segunda zona de espera es preferencial para PMR, la cual está delimitada con una línea azul al borde del andén y señalización adecuada para garantizar una accesibilidad de forma autovalente a los vagones de Metro (ver Ilustración 1).

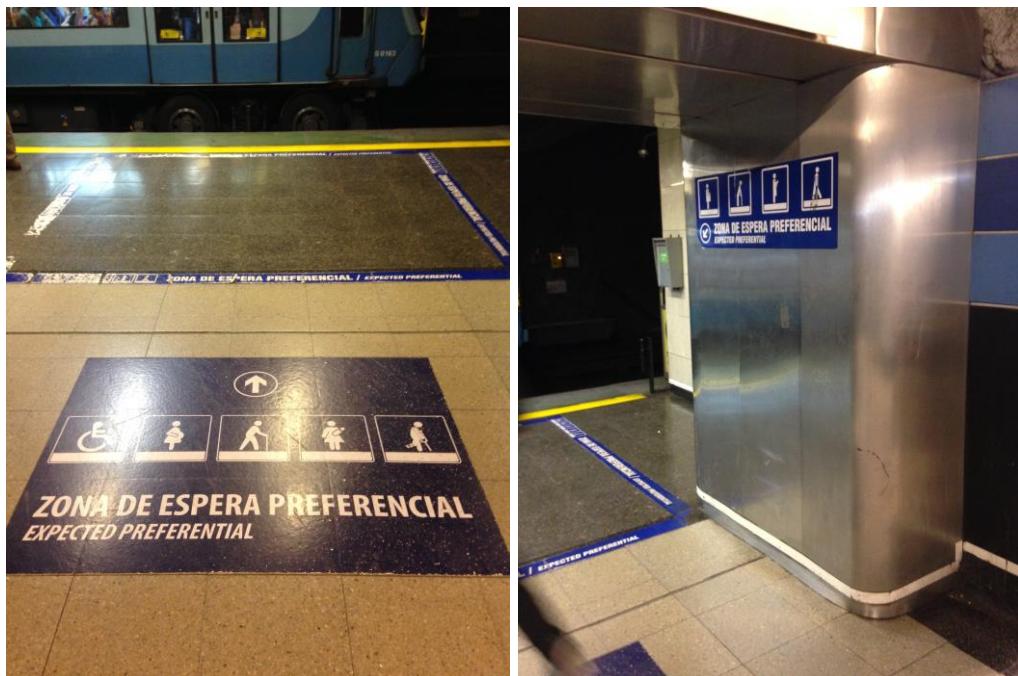


Ilustración 1 Zona de espera preferencial en estación Tobalaba, línea 1 del metro en Santiago.

A pesar de las medidas implementadas por Metro de Santiago (2019), la alta densidad de pasajeros en un día común laboral afecta la ocupación de dichas zonas en los andenes de estaciones, especialmente en hora punta (Herrera, 2018). Como consecuencia, hay un impacto en el espacio ocupado por PMR. Sin embargo, se desconoce con exactitud cuál sería dicho impacto. De esta manera, se propone de forma experimental, estudiar el espacio ocupado por PMR en zonas de espera preferencial en andenes de estaciones de metro. Para ello, los objetivos específicos son los siguientes: a) identificar las variables de estudio que interfieren en el espacio que ocupa PMR en zonas de espera preferencial de andenes de estaciones de metro; b) definir un método para obtener el espacio ocupado por PMR en la zona de espera definida; c) simular en el Laboratorio de Dinámica Humana de la Universidad de los Andes (LDH en adelante) usuarios que esperan en el andén la llegada de un vagón y hacen ingreso a este; d) analizar las simulaciones en LDH para obtener el espacio ocupado para diferentes configuraciones de densidad de pasajeros en la zona de espera preferencial.

## 2. ESTUDIOS EXISTENTES SOBRE EL ESPACIO OCUPADO

Para comprender el espacio que ocupa una persona en situaciones de interacción peatonal en estaciones de metro, primero se debe tener claridad del comportamiento que asume individualmente un peatón en dichas situaciones. En primer lugar se plantea un modelo que propone que el comportamiento que asume un peatón está sujeto bajo cuatro criterios: a) densidad de usuarios (por ejemplo, la cantidad de pasajeros que suben o bajan del tren, y cuantos están esperando en la zona de espera preferencial del andén); b) diseño físico del andén y vagón (por ejemplo, el ancho y largo de la zona de espera preferencial); c) entrega de información (por ejemplo, señalización adecuada de la zona de espera preferencial); y d) el clima (por ejemplo, protección de la lluvia o frío) (RSSB, 2008). Otra visión plantea que también hay que considerar factores como la edad de los peatones, su tamaño y la cultura a la cual pertenecen (Fruin, 1971;

Still, 2000). En el caso de PMR, el tamaño debiese aumentar debido a su discapacidad de movimiento y al uso de dispositivos de movilidad tales como una silla de ruedas (ver Ilustración ).

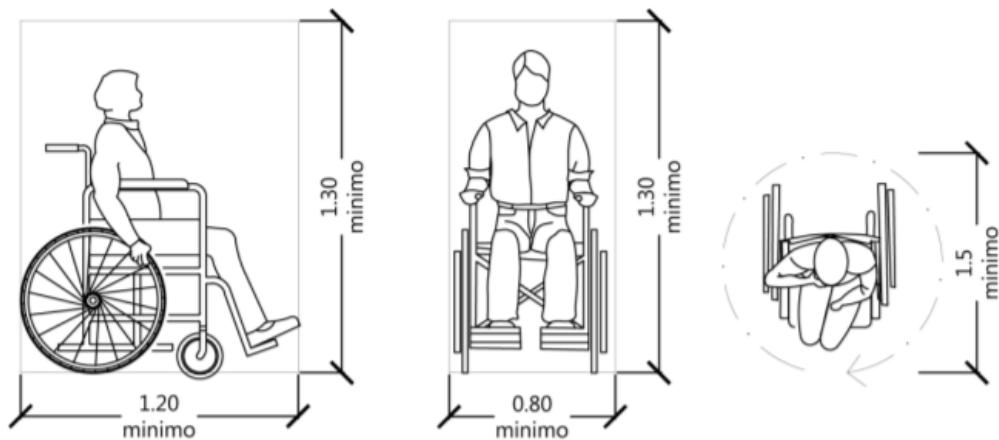


Ilustración 2 Dimensiones de una PMR en silla de rueda (Serviu, 2013).

Por otra parte, se ha mencionado que el comportamiento que asumen los peatones en situaciones de interacción peatonal, tales como estaciones de metro, también estaría determinado por las capacidades de ver, oír, moverse, la edad y género de las personas (Webb y Weber, 2003). A su vez otro autor propone que el comportamiento está determinado por otras características, propias también de cada usuario, como lo son el propósito de la caminata, la familiaridad de la ruta y el equipaje que llevan encima (Hoogendoorn y Daamen, 2005). Otra línea de pensamiento determinó que los factores que inciden en el comportamiento de un peatón y por ende en el espacio que éste ocupa son elementos psicológicos (Schmidt y Keating, 1979). También se han detallado otro tipo de modelos relacionados a la percepción del distanciamiento entre usuarios. De esta manera se ha descrito el espacio personal bajo dos categorías (Sakuma, et al., 2005). La primera categoría se basa en un círculo interno o anillo de un pequeño radio de influencia, en el cual el peatón percibe a una persona u objeto e inmediatamente lo trata de evitar. La segunda categoría, se define como un anillo externo de mayor radio de influencia, en donde el peatón percibe a una persona u objeto a cierta distancia y solo se dispone a estar en un nivel de precaución. Siguiendo este modelo de anillos, Hall (1966) planteó cuatro categorías de distanciamiento entre peatones estableciendo en cada una de ellas un tipo de relación personal. Asimismo, Sommer (1969) plantea que el comportamiento o respuesta de un usuario en situaciones de interacción peatonal está determinado por tres categorías de distanciamiento. Los modelos de Hall (1966) y Sommer (1969) si bien tienen diferencias al momento de segmentar cada categoría según la distancia, los dos modelos coinciden en que distancias menores a 0,5 m corresponde a la zona íntima.

En términos de representación peatonal, uno de los primeros modelos definidos por Fruin (1971) reportan que un peatón se puede representar espacialmente como una elipse de área  $0,3 \text{ m}^2$ , circunscrita por la profundidad del cuerpo del peatón de 0,5 m y el ancho de hombro a hombro de 0,6 m. Posteriormente se complementó dicho modelo al estudiar que al momento en que el peatón deja el estado de reposo y se dispone a caminar, este abarca una mayor área debido al movimiento de los pies y brazos, y se representa como una elipse de  $0,75 \text{ m}^2$  (Pushkarev y Zupan, 1975). A estos estudios se agregó el concepto de área sensorial, el cual se define como la capacidad de cada peatón en percibir, evaluar y reaccionar ante un estímulo. De esta manera, dicha área corresponde

a una elipse de 1,06 m de ancho y 1,52 m de largo (Templer, 1992). Análisis aún más detallados han especificado que las elipses que describen los peatones son asimétricas y varían en su tamaño cuando los peatones se encuentran con obstáculos o se producen aceleraciones en cuanto a la velocidad de caminata (Gérin-Lajoie, 2005). Estudios más recientes (Seriani y Fujiyama, 2018) reportaron el espacio ocupado por pasajeros que descienden del tren cuando se utilizan puertas de andén, identificando que estos ajustan dicho espacio para evitar la colisión con otros usuarios.

Por otro lado, el comportamiento de un peatón y la representación del espacio ocupado, también está afectado la comodidad o estrés en los usuarios, especialmente al estar sometidos a situaciones de interacciones peatonales en áreas reducidas tales como andenes de estaciones de metro. A su vez, esta percepción del estrés y comodidad en situaciones de interacción peatonal está relacionado con factores psicológicos como físicos (Still, 2013). De esta manera, una buena medición del nivel de servicio debe comprender estos factores (Still, 2013). La concepción de nivel de servicio (HCM, 2000) está basado principalmente factores físicos tanto para zonas de caminata, escaleras y zonas de espera (por ejemplo, andenes de estaciones) (ver Tabla 1). Si bien el nivel de servicio es un indicador importante para determinar el confort bajo aglomeraciones, este solo hace referencia o se obtiene bajo valores promedios de densidades en una área determinada, y por ende podría no ser representativo para situaciones de alta interacción peatonal tales como andenes de estaciones de metro, donde PMR esperan frente a las puertas de un tren (Evans y Wener, 2007).

Tabla 1 Valores de densidad y espacio disponible en zonas de espera (HCM, 2000).

Nivel de Servicio	Densidad de usuarios (pasajeros/m <sup>2</sup> )	Espacio disponible por usuario (m <sup>2</sup> /pasajero)
A	$\leq 0,83$	$\geq 1,21$
B	0,83 – 1,11	1,21 – 0,93
C	1,11 – 1,67	0,93 – 0,65
D	1,67 – 3,33	0,65 – 0,28
E (capacidad)	3,33 – 5,00	0,28 – 0,19
F	$\geq 5,00$	$\leq 0,19$

Como se puede notar, existen diversas variables y características tanto físicas, del entorno externo (densidad peatonal, objetos, clima, equipaje que portan, etc.), como propias de cada individuo (cultura, edad, género, tamaño, agudeza de sentidos perceptivos, textura física, propósito de caminata, capacidad de movilidad, grado de relación interpersonal entre usuarios, etc.), que determinan finalmente el comportamiento, y por ende la posición que va a adoptar un peatón en el espacio. Cabe destacar que la caracterización espacial que tiene un peatón al combinar gran parte de estas variables mencionadas ya se ha estudiado con anterioridad. Si bien se han realizado importantes avances en la investigación, aún falta estudiar dicho espacio con más precisión para PMR en diferentes condiciones de densidad de andenes de estaciones de metro. Así, para efectos de este estudio se busca determinar el espacio que ocupa una PMR en la zona de espera preferencial de andenes, siendo un espacio de alta interacción peatonal. Para ello se debe considerar un grupo de personas heterogéneas que rodean al PMR, de tal forma de que las variables externas sean similares a las que se encuentran en estaciones de metro en Santiago.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Observación en estación Tobalaba

Previamente a establecer un método por el cual se busca determinar el espacio que ocupa una PMR se obtuvo un catastro de las estaciones de metro que contaban en sus andenes con zonas de espera preferencial, siendo Tobalaba la única estación de la línea 1 del metro en Santiago que posee este tipo de zonas, la cual mide alrededor de 3,0 m de largo por 2,0 m de ancho. Además, en el andén se incluye una línea amarilla la cual se ubica a 60 cm desde el borde del andén para evitar que los pasajeros caigan a las líneas del tren.

Las variables que se observaron fueron dos. La primera variable fue la densidad de pasajeros que utilizaba las zonas de espera preferencial. La densidad se definió como la razón entre la cantidad de usuarios que hacían uso de ellas (personas en silla de ruedas, adultos mayores, embarazadas, personas con bebés, entre otros) y el área de dicha zona. Se contabilizó en cada ciclo de subida/bajada del vagón cuantos usuarios hacían uso de dicha zona. Por otra parte, la segunda variable determinaba fue la composición del flujo de pasajeros. Es decir, se identificó qué tipo de usuario era el que hacía uso de esta zona, lo cual se obtuvo contabilizando en cada ciclo cuantas personas correspondían a PMR.

Se observó que la densidad de estas zonas varía entre 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> y más de 4,0 pasajeros/m<sup>2</sup>, dependiendo de la hora de medición (ver Ilustración 3). La mayor densidad se obtiene para la hora punta mañana, donde los pasajeros esperan el tren en dirección al oriente de la capital (dirección Los Dominicos). Además, se reporta que no siempre las zonas de espera preferencial eran ocupadas por PMR, siendo ocupadas por pasajeros sin movilidad reducida (PSMR en adelante).



Ilustración 3 Densidades observadas en zonas de espera preferencial de la estación Tobalaba en el metro en Santiago

#### 3.2 Diseño experimental

Una vez obtenido las variables de densidad y composición del flujo en terreno, se definió la zona de espera preferencial en el Laboratorio de Dinámica Humana (LDH) de la Universidad de los Andes. De esta manera el escenario estudiado tenía una zona de espera preferencial similar a la

estación Tobalaba del metro en Santiago, con un largo de 3,0 m y un ancho de 2,0 m. El andén tiene el mismo largo que dicha zona, pero un ancho de 2,6 m ya que incluye una línea amarilla a 0,6 m desde el borde del andén. El vagón en el LDH tiene una dimensión similar a los vagones utilizados en el metro en Santiago, representando solo el hall de entrada (3,0 m de largo por 2,5 m de ancho).

La cantidad de personas que se estudiaron en el LDH fueron divididas en dos escenarios de diferentes densidades. En un primer escenario (Ilustración 4-izquierda) participaron 10 personas, logrando una densidad aproximada de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup>, mientras que un segundo escenario (Ilustración 4-derecha) incluyó 23 participantes, obteniendo una densidad cercana a 4,0 pasajeros/m<sup>2</sup>. En ambos escenarios se incluyó la misma PMR, quien utiliza una silla de ruedas desde hace 24 años debido a una diplegia espástica. La PMR es una persona joven (entre 18 – 24 años) cuyo peso es de 70 kg y el modelo de silla de ruedas es Activa Liviana. Por su parte en el primer escenario el 80% de los participantes eran jóvenes de entre 18 y 24 años, mientras que el 10% era adulto de 24 a 36 años. En el caso del segundo escenario también el 80% eran jóvenes entre 18 y 24 años, sin embargo se incluyó 3 adultos mayores con dificultad de movilidad y un pasajero que simulaba tener un coche de bebé.

Para cada una de estos escenarios se realizaron 11 repeticiones, en las cuales los usuarios ingresaban al vagón desde la zona de espera preferencial para posteriormente descender del vagón una vez abiertas las puertas. De esta manera cada una de estas repeticiones o ciclos de subida y bajada del vagón constaba de tres fases. La primera fase consistió en que los usuarios ingresaban de manera aleatoria desde el andén a la zona de espera preferencial, con lo cual se simulaba la espera de la llegada de un tren. Además, en esta etapa se les indicaba a tres usuarios al azar que ellos iban con prisa por subir al vagón representando de mejor manera una situación más similar a la observada en estaciones. A continuación, en la segunda fase se realizaba la apertura de puertas donde todos los usuarios ingresaban al vagón, culminando con el cierre de puertas. Por último, en la tercera fase se realizaba la apertura de puertas por lo que los usuarios descendían del vagón y con ello finalizaba el ciclo mediante el cierre de puertas.



Ilustración 4 Escenarios de zona de espera preferencial simulados en el LDH

### 3.3 Método de detección en el LDH

Para el procesamiento de los videos que se registraron al momento en que los usuarios realizaron la transición andén-vagón se utilizó el software Petrack (Boltes y Seyfried, 2013), el cual con la debida calibración era capaz de entregar la posición relativa de los usuarios en la zona de espera

preferencial para cada escenario definido en el LDH. Dicha calibración se realizó en dos fases. La primera fase, denominada calibración intrínseca, corrigió la curvatura del lente de la cámara eliminar todo tipo de distorsión. Por otra parte, la segunda fase, llamada calibración extrínseca, permitió asociar las coordenadas cartesianas reales del modelo físico con el sistema de referencia digital utilizado por el software (posiciones de pixeles en el video). Con estas dos calibraciones realizadas, el software era capaz de entregar archivos .txt con las posiciones o coordenadas cartesianas de los usuarios que se marcan en el programa.

Para comprender cuales eran los límites del espacio ocupado por la PMR en silla de ruedas se estableció un método de detección que indicó cuáles usuarios podían considerarse como extremos a la PMR para ser marcados en el software. El primer criterio usado fue que, para considerar a un usuario como un límite, este debía tener un campo visual directo a la PMR sin obstáculos o interferencia (por ejemplo, la persona 1 y 3 en Ilustración 5 es considerada como el límite, no así la persona 2 la cual no es observada por la PMR). Por otra parte, el segundo criterio utilizado establece que entre dos usuarios cercanos a la PMR debe existir un ángulo mayor a 5 grados para considerar a ambos como límite del espacio ocupado (por ejemplo, entre la persona 1 y 2 no hay más de 5 grados y por ende la persona 2 no es marcada). Ambos criterios fueron definidos con anterioridad por otros autores que realizaron una investigación similar (Seriani y Fujiyama, 2018).

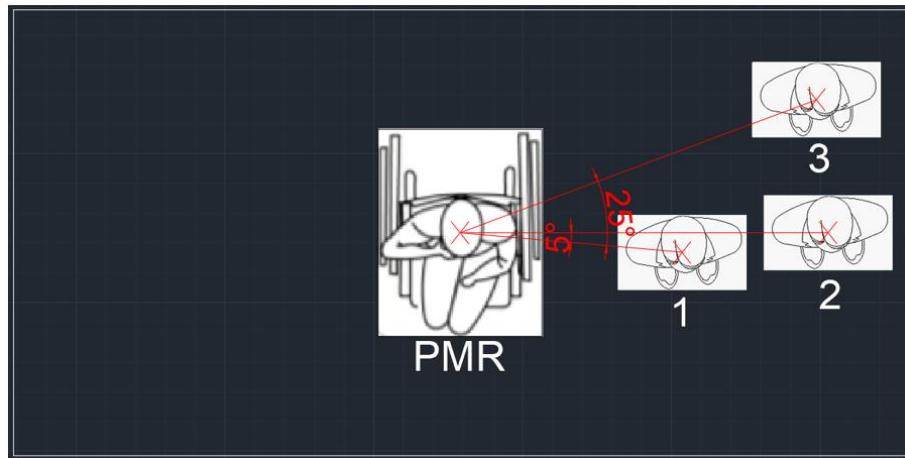


Ilustración 5 Marca de usuarios externos a la PMR en silla de ruedas

Por otra parte, el método de detección definido también consideró los bordes de la zona de espera preferencial como límites del espacio ocupado por la PMR en silla de ruedas. Para ello se debía cumplir tres condiciones de manera simultánea (ver Ilustración 6):

- La primera de ellas establecía que cuando la distancia entre dos usuarios cercanos a la PMR era superior a 75 cm, el espacio entre ellos se consideraría libre y por ende se podría tomar como límite del espacio ocupado un borde de la zona de espera. Esto se obtuvo a partir de Hall (1966) y Sommer (1969), los cuales dedujeron que a distancias iguales o menores a 50 cm se considera dicho espacio como la zona íntima del peatón. Si a dicha distancia se le agrega la profundidad de cuerpo promedio de una persona es de 25 cm (NASA, 1995), entonces el espacio libre se genera para distancias superiores a los 75 cm.
- Una vez que la condición anterior se cumplía, era necesaria una segunda condición la cual dependía del campo visual de la PMR. De esta forma lo primero era extender una línea desde el usuario que se situaba cercano a la PMR de forma perpendicular hacia el borde de

la zona de espera preferencial. Posteriormente si la intersección de dicha línea con el borde de la zona de espera preferencial estaba dentro del campo visual de la PMR, entonces se consideraba esa intersección como el límite del espacio libre percibido.

- Por otra parte, si es que un vértice de la zona de espera preferencial era directamente visible por la PMR este debía ser considerado como límite del espacio percibido (tercera condición). Además, en los casos en que no fuese visible la intersección de la línea proyectada desde el usuario hacia el borde de la zona de espera preferencial por la PMR, aquella intersección no se podía tomar como límite del espacio libre percibido.

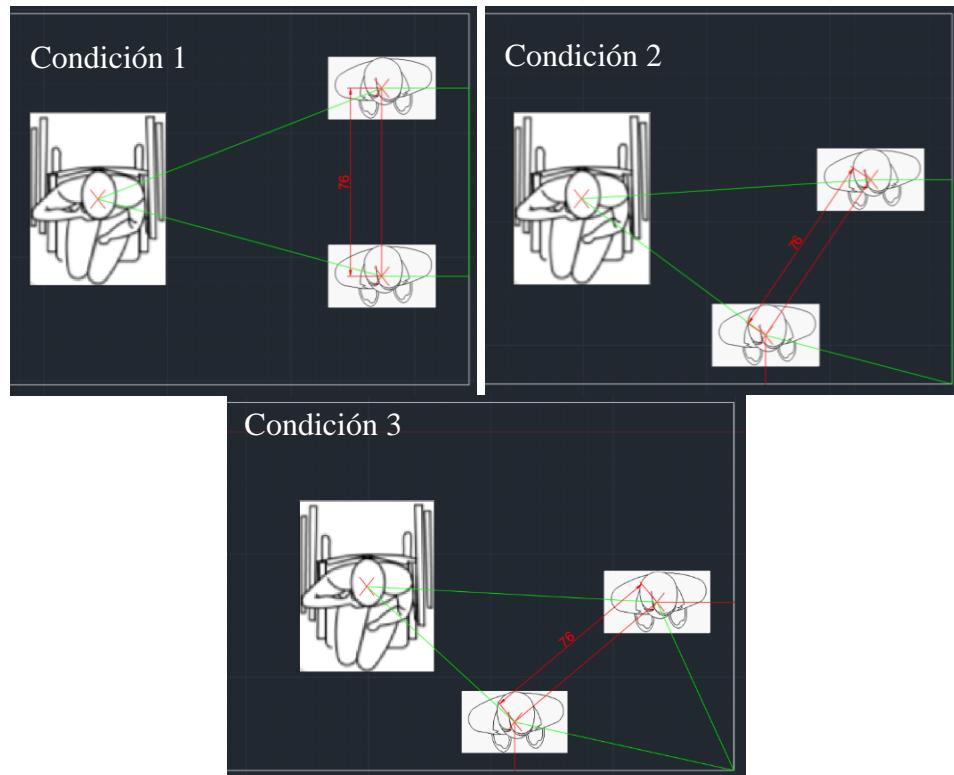


Ilustración 6 Zona de espera preferencial como límite del espacio ocupado por una PMR en silla de ruedas

Una vez parametrizado los límites en torno a una PMR se estudiaron cinco variables asociadas al polígono formado al delimitar el espacio ocupado por una PMR en cada repetición para cada escenario. Las primeras tres variables estudiadas fueron el espacio ocupado, la distancia hacia el sujeto de estudio y la distancia entre usuarios. Estas tres variables determinaron si la cantidad de metros cuadrados del espacio ocupado aumentaba o disminuía en cada escenario. Por otra parte, las otras dos variables restantes fueron la distancia promedio lateral y la distancias promedio frontal, las cuales determinaron si la distribución del espacio ocupado se podría parametrizar de forma de obtener un polígono regular común para todos los escenarios estudiados.

Para obtener cada variable primero se estableció que el primer par ordenado extraído como dato en coordenadas ( $x, y$ ) en cm fue la PMR en silla de ruedas (ver Ilustración 7). Posteriormente, los siguientes pares ordenados ( $x, y$ ) en cm fueron extraídos siguiendo el sentido horario de las

manecillas del reloj demarcando con números de color rojo a los usuarios y con una letra B de color verde a los bordes de la zona de espera preferencial.



Ilustración 7 Secuencia de detecciones usando el software Petrack

Con esta asignación de coordenadas cartesianas se pudo aplicar las siguientes formulaciones matemáticas y obtener los resultados buscados (Tabla 2).

Tabla 2 Variables del espacio ocupado en el LDH

Variables	Fórmula	Gráfica ilustrativa
Área del espacio que ocupa una PMR mediante cada uno de los triángulos.	$\left(\frac{1}{2}\right) - \text{Det} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \end{vmatrix}$	
Distancia promedio entre los usuarios.	$\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$	
Distancia promedio entre los usuarios y la PMR.	$\sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2}$	
Distancia lateral promedio derecha.	$\sum_{i=2}^n x_i \quad (\forall x_i > 0)$	
Distancia lateral promedio izquierda.	$\sum_{i=2}^n x_i \quad (\forall x_i < 0)$	
Distancia vertical promedio posterior.	$\sum_{i=2}^n y_i \quad (\forall y_i > 0)$	
Distancia vertical promedio frontal.	$\sum_{i=2}^n y_i \quad (\forall y_i < 0)$	

### 3.4 Análisis estadístico

Una vez que se obtuvieron todas las variables calculadas se realizó un análisis estadístico para verificar si estas cambiaban al modificar la densidad en la zona de espera preferencial. Todas estas variables mencionadas anteriormente se asumieron que se comportaban como variables no paramétricas, ya que se obtuvieron a través de la posición de los usuarios en el espacio frente a una PMR, lo cual no necesariamente sigue un comportamiento de distribución normal al realizar solo 11 repeticiones de estos experimentos, donde los usuarios se ordenaban de forma aleatoria en la zona de espera preferencial del andén analizado en el LDH. De esta forma para poder realizar un análisis estadístico que posea sensibilidad y carezca de error, se escogió la prueba de U de Mann-Whitney, ya que las variables eran ordinales o continuas las cuales se recabaron de experimentos independientes entre sí. La comparación de estas variables determinaba finalmente si se aceptaba la hipótesis nula ( $H_0$ ), en donde se establecía que las medias eran iguales. En este caso se utilizó un nivel de confianza del 95%.

## 4. RESULTADOS

A través de la metodología anterior se obtuvieron los resultados de las variables mencionadas para cada una de las repeticiones en que se estudió a una PMR tanto en el escenario de densidad 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> como para la densidad de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> (ver Tabla 3 y Tabla 4). Para poder determinar si los promedios de cada variable eran distintos para ambos escenarios contrastados, y así aseverar finalmente que el cambio en la densidad tuvo un efecto significativo en cada una de las variables, se realizó un análisis estadístico recogiendo todos los resultados de cada repetición, para cada escenario. De esta forma los resultados consolidados de U test de Mann-Whitney afirman que no existe la suficiente evidencia como para afirmar que las medias son iguales, lo que implicaría que un cambio en la densidad podría tener un impacto significativo en la variable analizada.

Analizando estos resultados se puede deducir que el escenario de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> tenía un espacio promedio ocupado de 0,5 m<sup>2</sup>/pasajero (utilizando el inverso de la densidad promedio de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> en toda la zona de espera preferencial). Mientras que utilizando el método definido en esta investigación se obtuvo que el espacio ocupado por una PMR fue de 2,12 m<sup>2</sup> (casi 4 veces el espacio promedio ocupado). En el escenario de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> se obtuvo el espacio promedio ocupado por usuarios de 0,25 m<sup>2</sup>/pasajero (utilizando el inverso de la densidad promedio de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> en toda la zona de espera preferencial). Mientras que el resultado del espacio ocupado por una PMR usando el método definido en este estudio fue de 1,42 m<sup>2</sup>/pasajero (casi 5 veces el espacio promedio ocupado).

Al contrastar los escenarios de densidad se puede verificar que al aumentar la densidad ocupacional (de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> a 4 pasajeros/m<sup>2</sup>) el espacio ocupado por una PMR disminuyó en un 33%. Esta variación porcentual fue estadísticamente significativa como para poder rechazar la hipótesis nula, en donde se aseveraba que las medias del espacio ocupado por una PMR para ambos escenarios no eran iguales. El motivo por el cual el espacio ocupado por una PMR disminuyó, se debe a que los usuarios que rodeaban a la PMR en el escenario de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> de densidad disminuyeron su distancia de proximidad entre sí (cambio de 66,72 cm en el escenario de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> a 58,7 cm en el escenario de 4 pasajeros/m<sup>2</sup>). Lo anterior implicó que el criterio

mínimo para incluir a los bordes del andén (distancia entre usuarios mayor a 75 cm) no se cumpliera en mayor proporción para el escenario de 4 pasajeros/m<sup>2</sup>, lo que generó una contracción del espacio ocupado. De esta forma se puede concluir que la densidad si tiene un impacto sobre el espacio ocupado por una PMR.

Tabla 3 Resultados de las variables para el escenario de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> de densidad en el LDH

Repetición	Área ocupada (m <sup>2</sup> /PMR)	Distancia entre usuarios (cm)	Distancia hacia PMR (cm)	Distancia posterior (cm)	Distancia lateral derecha (cm)	Distancia lateral izquierda (cm)	Distancia frontal (cm)
1	2,35	53,85	74,49	52,36	76,18	35,74	69,04
2	2,04	69,18	72,06	22,81	80,90	51,43	66,01
3	2,31	56,02	78,73	40,29	75,36	49,23	85,29
4	2,46	75,34	71,63	37,89	79,37	59,52	73,86
5	2,61	74,40	81,78	24,48	88,94	64,31	82,91
6	1,97	72,04	71,31	41,07	58,44	52,85	75,38
7	1,98	73,99	79,86	65,81	43,37	29,09	95,35
8	2,13	62,24	81,33	43,09	96,54	33,18	74,64
9	1,85	65,42	70,38	43,40	63,45	50,62	55,10
10	2,20	74,39	59,79	72,46	56,03	41,79	76,52
11	1,38	57,05	64,22	35,75	49,39	44,52	62,22
Promedio	2,12	66,72	73,23	43,58	69,82	46,57	74,21
Desv. Std.	0,33	8,21	7,02	15,21	16,86	10,95	11,20

Tabla 4 Resultados de las variables para el escenario de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> de densidad en el LDH

Repetición	Área ocupada (m <sup>2</sup> /PMR)	Distancia entre usuarios (cm)	Distancia hacia PMR (cm)	Distancia posterior (cm)	Distancia lateral derecha (cm)	Distancia lateral izquierda (cm)	Distancia frontal (cm)
1	1,65	49,58	78,94	59,52	43,69	34,31	57,68
2	1,65	56,08	66,97	78,02	48,82	19,01	55,29
3	1,67	66,95	64,61	89,81	45,94	24,16	48,92
4	1,47	56,69	75,77	62,70	53,61	15,73	53,33
5	1,03	60,87	67,17	42,02	46,39	27,96	52,52
6	1,55	66,97	67,59	68,14	37,86	45,18	43,79
7	1,50	57,07	75,81	53,30	46,56	46,69	45,55
8	1,70	65,21	77,65	84,68	31,89	23,46	60,54
9	1,27	56,88	73,19	53,26	36,37	36,18	52,19
10	1,08	57,92	73,24	57,26	61,66	14,32	41,52
11	1,09	51,48	68,56	57,16	29,87	23,60	56,32
Promedio	1,42	58,70	71,77	64,17	43,88	28,23	51,60
Desv. Std.	0,26	5,80	4,96	14,61	9,41	11,06	6,03

Además, bajo este mismo contraste, también se pudo observar que la distribución del espacio ocupado por una PMR sufrió un cambio estadísticamente significativo, ya que todas las medias de

las distancias (posterior, frontal, lateral derecha, lateral izquierda) fueron diferentes bajo el U test de Mann-Whitney. De esta manera al no existir una equivalencia total de estas medias, se puede estar de acuerdo con la idea propuesta por Gérin-Lajoie (2005), el cual mencionaba que el espacio ocupado no es del todo parametrizable como una elipse. De forma ilustrativa se pueden observar los polígonos que se formaron (medidos en cm) para el espacio ocupado por una PMR en cada escenario para cada repetición (ver Ilustración 8).

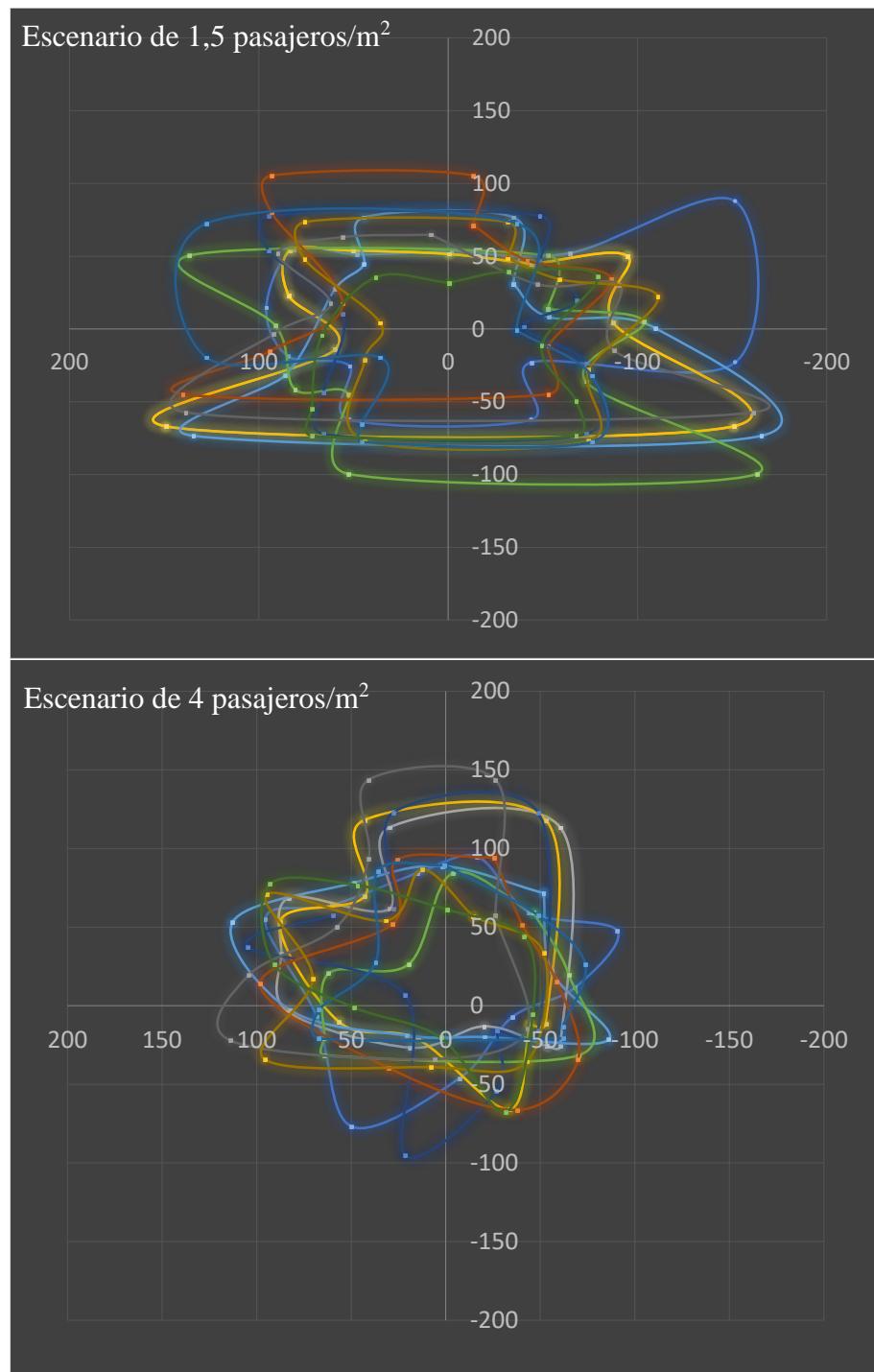


Ilustración 8 Representación gráfica del espacio ocupado por una PMR

De manera equivalente y como investigación adicional se hizo un contraste entre el espacio que ocupa una PMR respecto al espacio que ocupa una persona sin movilidad reducida (PSMR), ambos bajo un escenario de densidad de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> (ver Tabla 5). En el escenario de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> una PSMR obtuvo el espacio promedio ocupado utilizando el método definido en esta investigación fue de 0,86 m<sup>2</sup>/pasajero, lo cual representa casi la mitad de lo que utiliza una PMR (1,42 m<sup>2</sup>/pasajero). Lo anterior verifica nuevamente que una PMR requiere un mayor espacio ocupado que una PSMR, lo cual tiene diferencias significativas.

Tabla 5 Resultados de las variables para el escenario de 4 pasajeros/m<sup>2</sup> en PSMR

Repetición	Área ocupada (m <sup>2</sup> /PSMR)	Distancia entre usuarios (cm)	Distancia hacia PSMR (cm)	Distancia posterior (cm)	Distancia lateral derecha (cm)	Distancia lateral izquierda (cm)	Distancia frontal (cm)
1	0,98	58,89	68,98	62,46	42,08	18,73	47,48
2	0,73	51,72	58,78	39,90	48,24	31,84	19,34
3	0,49	53,58	57,09	41,29	39,48	0,00	43,15
4	1,19	56,19	64,23	51,28	43,36	31,39	58,11
5	1,20	46,76	68,12	57,30	53,02	29,21	36,49
6	0,97	46,82	55,88	47,31	26,66	31,36	56,36
7	0,84	53,38	61,83	39,39	48,32	36,72	31,64
8	0,77	53,55	66,65	44,14	69,32	4,25	37,51
9	0,80	56,35	55,40	42,43	40,21	21,80	42,29
10	0,77	63,82	60,15	42,27	38,37	12,73	60,75
11	0,68	57,79	61,17	46,26	43,87	12,46	39,78
Promedio	0,86	54,44	61,66	46,73	44,81	20,95	42,99
Desv. Std.	0,21	5,03	4,81	7,45	10,60	12,31	12,31

Respecto a la distribución del espacio ocupado, no es posible afirmar que ella es totalmente similar entre una PMR y una PSMR. En primer lugar, existe una variación significativa del área y además hay una variación en cuanto a la distancia posterior que mantienen los usuarios respecto al sujeto de estudio (PMR o PSMR). Finalmente es interesante destacar que en ambos casos la distancia de separación entre los usuarios y el sujeto de estudio alcanzo un máximo promedio de 72 cm.

## 5. CONCLUSIONES

Respecto a las variaciones de densidad de usuarios se pudo observar que el espacio ocupado por una PMR disminuyó en un 33% al aumentar la densidad de 1,5 pasajeros/m<sup>2</sup> a 4 pasajeros/m<sup>2</sup> como era de esperarse. Esta disminución del espacio se explica debido a que los usuarios ante una mayor densidad disminuyen su distancia de separación a rangos menores de 75 cm, por lo que los bordes de la zona de espera preferencial, ya no se contemplan como límites del espacio libre percibido. Por otra parte, cuando se analizó el escenario de 4 pasajero/m<sup>2</sup> para distintos sujetos de estudio se pudo constatar que el espacio ocupado por una PMR es un 61% mayor que el ocupado por una PSMR. Este aumento se dio principalmente debido a que los usuarios aumentaron su distancia respecto a la PMR lo que expandió su área de influencia.

Por otro lado, bajo distintos escenarios de densidad, los resultados muestran que el espacio ocupado usando el método definido en esta investigación fueron entre 4 y 5 veces mayores para una PMR que la densidad promedio en toda la zona de espera preferencial. Lo anterior implica que una PMR necesita y ocupa un mayor espacio que el promedio de todos los usuarios. Este resultado refuerza la crítica que realiza Evans y Wener (2007) a la densidad utilizada por Fruin (1971) y reportada en HCM (2000) a través del nivel de servicio, el cual está compuesto por un promedio en la zona de estudio, y por ende podría no ser representativo de una PMR.

Con la realización de este estudio, se puede notar que el espacio ocupado puede aumentar o disminuir por dos motivos. El primero motivo se debe a que los usuarios aumentan o disminuyen la distancia existente entre ellos, lo que genera como consecuencia, contabilizar o no contabilizar los bordes de la zona de espera preferencial como límites del área ocupada. Mientras que el segundo motivo por el cual el espacio ocupado pudiese variar, está relacionado a que los usuarios disminuyen o aumentan la distancia existente entre el sujeto de estudio y cada uno de ellos, generando así una contracción o expansión del área de influencia.

Finalmente, para cada uno de estos experimentos se realizó un análisis de la distribución del espacio ocupado por el sujeto de estudio, mediante las variables de distancia frontal, distancia posterior, distancia lateral derecha y distancia lateral izquierda (además de las mencionadas anteriormente, es decir, la distancia entre usuarios y distancia hacia el sujeto de estudio). Bajo este análisis se obtuvo que, al modificar variables externas como la densidad ( $1,5 \text{ pasajeros/m}^2$  y  $4 \text{ pasajeros/m}^2$ ) o bien el sujeto de estudio (PMR y PSMR), existía una diferencia estadísticamente significativa en cuanto a la distribución del espacio, lo cual afirmaría el argumento planteado en la literatura, el cual menciona que el espacio ocupado no es del todo parametrizable como una elipse y dependería de las condiciones externas (Gérin-Lajoie, 2005).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran agradecer a quienes participaron de los experimentos en el LDH. Además, se agradece en especial al Dr. Taku Fujiyama de University College London y Dr. Maik Boltes de Research Centre Julich por la colaboración que se ha generado a partir del proyecto REDES 190054, ANID, Chile. Este trabajo tuvo el apoyo del proyecto FONDECYT Iniciación 11200012, ANID, Chile.

## REFERENCIAS

- Boltes, M. y A. Seyfried (2013) Collecting pedestrian trajectories. **Neurocomputing**, 100, 127-133.
- Evans, G. y R. Wener (2007) Crowding and personal space invasion on the train: please don't make me sit in the middle. **Journal of Environmental Psychology**, 27(1), 90-94.
- Fruin, J. (1971) Designing for pedestrians: a level-of-service concept. **Highway Research Record**, 377, 1-15.

- Gérin-Lajoie, M. (2005) The negotiation of stationary and moving obstructions during walking: anticipatory locomotor adaptations and preservation of personal space. **Motor Control**, 9(3), 242-269.
- Hall, E. (1966) **The Hidden Dimension**. Doubleday, 14, 103-124.
- HCM (2000) **Highway Capacity Manual**. Washington, DC.
- Herrera, J. (2018) **Tobalaba, Manquehue y la Cisterna son las estaciones de Metro con mayor afluencia**. El Mercurio, 27 Junio 2018.
- Hoogendoorn, S. y W. Daamen (2005) Pedestrian Behavior at Bottlenecks. **Transportation Science**, 39(2), 147-159.
- Metro de Santiago (2019) **Memoria Anual**. Santiago de Chile.
- Ministerio de Desarrollo Social (2015) **Estadísticas de Discapacidad en Chile**. Corporación Ciudad Accesible.
- Ministerio de Planificación (2011) **Decreto Supremo 142**. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2016) **Decreto Supremo 50**. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.
- NASA (1995) **National Aeronautics and Space Administration Space Station Program Office**. International Space Station Flight Crew Integration Standard (NASA-STD-3000/T).
- Pushkarev, B. y J. Zupan (1975) **Urban space for pedestrians**. The MIT Press.
- RSSB (2008) **Management of on-train crowding**. Rail safety and standards board.
- Sakuma, T., T. Mukai y S. Kuriyama (2005) Psychological model for animating crowded pedestrians. **Journal of Visualization and Computer Animation**, 16(3-4), 343-351.
- Schmidt, D. y J. Keating (1979) Human crowding and personal control: An integration of the research. **Psychological Bulletin**, 86(4), 680-701.
- Seriani, S. y T. Fujiyama (2018) Experimental study for estimating the passenger space at metro stations with platform edge doors. **Transportation Research Record**, 2672(8), 307-315.
- Serviu (2013) **Diseño universal en el espacio público**. Servicios de Vivienda y Urbanización, Región Metropolitana, Chile.
- Sommer, R. (1969) **Personal Space: The Behavioral Bases of Design**. Prentice Hall.

Still, K. (2013) **Introduction to Crowd Science**. CRC Press Boca Raton (FL).

Subsecretaría de Transportes (2013) **Plan Maestro de Transporte de Santiago 2025**. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile.

Templer, J. A. (1992) **Human territoriality and space needs on stairs**. The Staircase: Studies of Hazards, Falls, and Safer Design, 61-70.

Webb, J. y M. Weber (2003) Influence of Sensory Abilities on the Interpersonal Distance of the Elderly. **Environment and Behavior (EAB)**, 35(5), 695-711.