

# Microsimulación Peatonal en Espacios de Intercambio Metro-Bus. Estación Los Domínicos

Rodrigo Fernández y Sebastián Seriani  
 Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas  
 Universidad de Los Andes, Santiago – Chile  
 Av. San Carlos de Apoquindo 2200, Las Condes, Santiago – Chile  
 Tel: +56-2-412 9321; Fax: +56-2-412 9642; e-mail: rfa@uandes.cl/sseriani@miuandes.cl

Pablo Allard  
 Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos  
 Universidad Católica de Chile  
 El Comendador 1966, Providencia, Santiago – Chile  
 Tel: +56-2-354 7743; email: pallard@uc.cl

## RESUMEN

En la actualidad una estación de metro ya no es sólo un simple nodo dentro de una red de transporte, sino también un lugar dentro de la ciudad. En este sentido, algunos autores (Busquets, 2006; López, 2008) definen una estación de metro como un “nodo lugar”, en donde existen al menos cinco espacios de circulación peatonal: tren-andén, andén-escaleras, mesanina, espacios complementarios (por ejemplo comercio) y ciudad.

A pesar de la complejidad de estos proyectos urbanos, se ha observado en los países en desarrollo la inexistencia de recomendaciones de diseño para estaciones de metro y sus alrededores, lo que ha llevado a ignorar los problemas producidos en espacios fuera del área de administración de metro tales como puntos de acceso, rutas peatonales, intercambiadores metro-bus, zonas comerciales, etc. Para resolver esta deficiencia se busca como objetivo general analizar a partir de modelos de microsimulación peatonal los espacios de intercambio metro-bus a fin de proponer recomendaciones de diseño, tomando como caso de estudio Santiago de Chile.

Los resultados del presente estudio están divididos en dos partes. La primera parte corresponde a la elaboración de recomendaciones de diseño según espacio de circulación peatonal. La segunda parte corresponde a la aplicación de estas recomendaciones de diseño al caso de estudio de Estación Los Domínicos en Santiago de Chile, considerando un escenario futuro de Tranvía.

En conclusión, este estudio permitirá a ingenieros y arquitectos poder identificar los conflictos, clasificarlos por espacio, analizarlos según variable de circulación peatonal y comprobar si los elementos de circulación satisfacen las demandas de pasajeros.

*Palabras clave:* Peatones, microsimulación, estaciones de metro, buses, transferencias

Número palabras: 6.442

## ABSTRACT

Currently a metro station is no longer just a single node in a transport network, but also a place within the city. In this sense, some authors (Busquets, 2006; Lopez, 2008) define a metro station as a “node location”, where there are at least five pedestrian circulation spaces: train-platform, platform-stairs, mezzanine, complementary spaces (eg shopping) and city.

Despite the complexity of urban projects, has been observed in developing countries the lack of design recommendations for metro and surrounding areas, which has led to ignore the

problems produced in areas outside the metro area management such as access points, pedestrian routes, metro-bus interchanges, shopping areas, etc.

To address this deficiency the objective of this paper is to analyze using pedestrian microsimulation models the metro-bus interchanges to propose design recommendations, taking as a case study Santiago de Chile.

The results of this study are divided into two parts. The first part is the development of design recommendations for each type of pedestrian circulation space. The second part is the implementation of these design recommendations to Los Domínicos station, considering as a future scenario a feeder tram system.

In conclusion, this study will allow engineers and architects to identify conflicts, sort them by space, analyze pedestrian circulation, and check if the circulation spaces meet the passenger demand.

*Keywords:* Pedestrians, microsimulation, metro stations, bus interchanges.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad una estación de metro ya no es sólo un simple nodo dentro de una red de transporte, sino también un lugar dentro de la ciudad. En este sentido, algunos autores tales como (Busquets, 2006; López, 2008) definen una estación de metro como un “nodo-lugar”, entendiendo “nodo” como un punto de acceso a trenes de metro y otras redes de transporte y “lugar” como una sección específica de la ciudad con una concentración de infraestructura, diversificación de edificios y espacios públicos. De esta manera una estación de metro es un proyecto urbano complejo que debe resolver tanto el problema genérico de la movilidad y la centralidad como también la conexión e integración entre el sitio y la zona donde se ubican. Como nodo-lugar hay por lo menos cinco espacios de circulación peatonal: el espacio tren-andén, el espacio andén-escaleras, la mesanina, los espacios complementarios (por ejemplo comercio) y la ciudad.

A pesar de la complejidad de estos proyectos urbanos se ha observado en los países en desarrollo la inexistencia de recomendaciones de diseño para estaciones de metro y sus alrededores. Por ejemplo, Metro de Santiago S.A. hace uso de modelos de microsimulación para estudiar los movimientos peatonales. Sin embargo, estos modelos sólo son utilizados para analizar la circulación en espacios dentro del área de administración de metro, es decir dentro de las estaciones. Este enfoque considera la estación como un proyecto aislado, por lo

que ignora los problemas producidos en espacios fuera del área de administración de metro tales como pasillos comerciales, puntos de acceso, rutas peatonales, intercambiadores metro-bus, etc.

Para resolver esta deficiencia el objetivo de esta investigación fue analizar a partir de modelos de microsimulación peatonal los espacios de intercambio metro-bus a fin de proponer recomendaciones de diseño, tomando como caso de estudio Santiago de Chile. Los objetivos específicos son: (a) identificar las variables que proporcionan una mayor eficiencia y seguridad en esos espacios; (b) simular diferentes escenarios utilizando el modelo de microsimulador peatonal LEGION; (c) proponer recomendaciones de diseño para los espacios peatonales en intercambiadores de metro-bus; (d) aplicar recomendaciones para la recientemente inaugurada estación Terminal de la Línea 1 de Santiago de Chile: Estación Los Dominicos.

## 2. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio de la presente investigación es la recientemente inaugurada estación Los Dominicos. En términos de nodo la estación Los Dominicos será la nueva estación terminal de la Línea 1 de metro y trasbordo con Transantiago, taxis y el futuro Tranvía Las Condes, para lo cual la estación dispondrá de 5.390 m<sup>2</sup> construidos y tendrá tres accesos desde el nivel calle que conectarán la Plaza Los Dominicos, la estación y alrededores sin perder continuidad peatonal (Figura 1).

En términos de lugar se contempla un proyecto que será complementario a la estación Los Dominicos y permitirá conectar, integrar y activar el ala sur de la nueva estación con la Plaza Los Dominicos, la cual es Zona Típica según el Decreto Supremo N° 1296 del 15 de noviembre de 1983 y actualmente es un lugar de esparcimiento, paseos, ferias, deporte, entretención y turismo (Pueblito Los Dominicos). El proyecto incluye 24.000m<sup>2</sup> de áreas verdes, juegos, ciclovías y senderos peatonales; 8.000m<sup>2</sup> de comercio y áreas de servicios; y 430 estacionamientos subterráneos (Metro de Santiago, 2008 y 2009; OCUC, 2009).

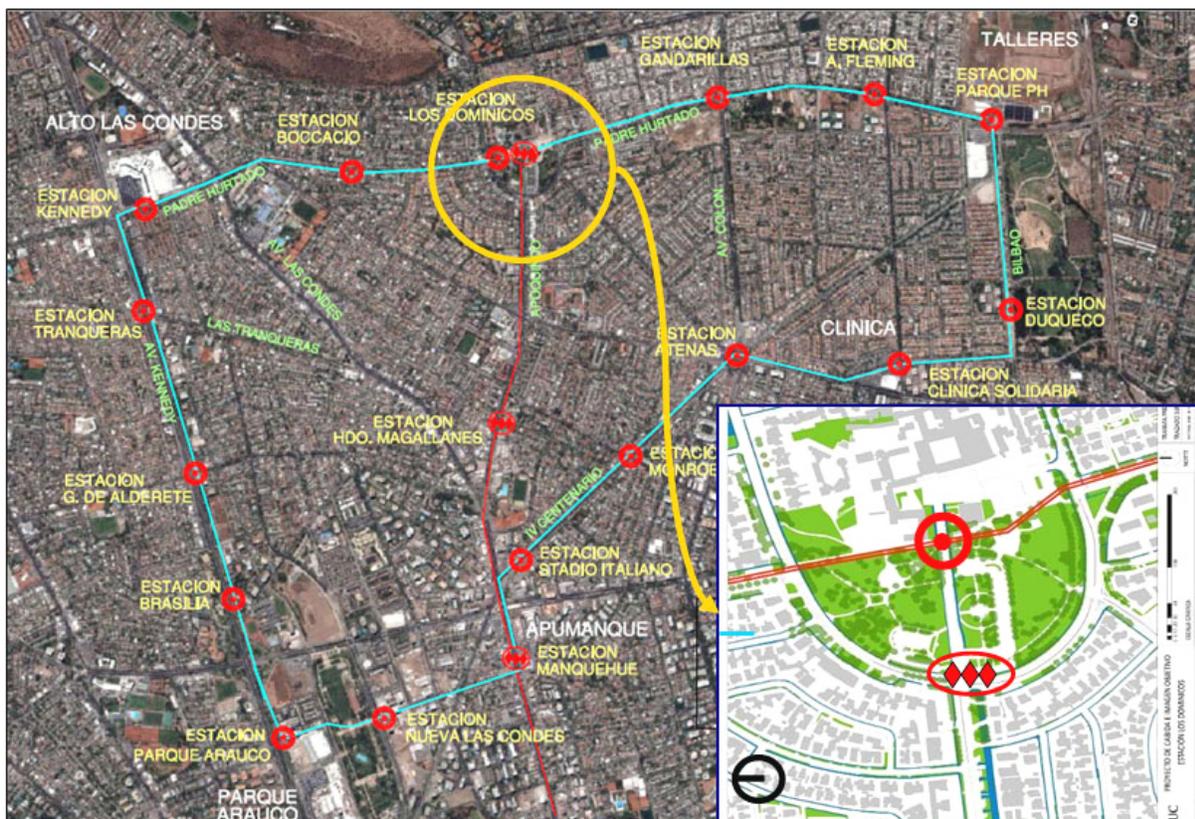


FIGURA 1: Ruta del Proyecto Tranvía Las Condes hacia la Estación Los Dominicos

La Figura 2 muestra los diferentes espacios de circulación definidos por Seriani (2010). Estos son:

### 2.1 Espacio Tren-Andén

En el nivel -5 se ubican los trenes modelo NS07 de 9 coches con capacidad de 1500 pasajeros totales. El andén es de ancho 4,15m y largo 135m. Durante la hora punta mañana, los flujos de trenes en dirección poniente-oriente tienen una demanda de 5.600 pasajeros por hora, mientras que en dirección oriente-poniente la demanda alcanza casi los 6.000 pax/h.

### 2.2 Espacio Andén-Escaleras

Entre el nivel -4 y -5 las escaleras conectan el andén con dos mesaninas (oriente y poniente). La mesanina oriente está conectada al andén por medio de tres escaleras de ancho 3 y 5m (dos de subida y una de bajada). La mesanina poniente está conectada al andén por medio de dos escaleras de ancho 3m (una de subida y otra de bajada).

**2.3 Espacio Mesanina**

En el nivel -4 se ubican dos mesaninas: oriente y poniente. En la mesanina oriente existen seis cajas en la boletería y 20 puertas de salida. En la mesanina poniente existen 3 cajas en la boletería y 4 puertas de salida. Existen ocho torniquetes en cada mesanina y dos escaleras mecánicas con escaleras alternativas que conectan los niveles superiores.

**2.4 Espacio Complementario**

En el nivel -1 y -2 se ubican locales comerciales, restaurantes, espacios públicos, el futuro Registro Civil de la Municipalidad de Las Condes, zona de servicios de metro, oficina de atención al cliente, sala de colación, sala de capacitación y reuniones, los baños y camarines de seguridad. Este nivel está conectado con el nivel calle (espacio urbano o ciudad) por medio de dos escaleras mecánicas con escaleras alternativas. Además, en el nivel -3 y -4 se ubicarán 433 estacionamientos subterráneos.

**2.5 Espacio Ciudad**

En el nivel 0 o nivel calle se ubica la Plaza Los Dominicos, lugar de ciclovías, paseos peatonales, áreas verdes, juegos de niños, feria y pista de patinaje. En este nivel la estación posee tres accesos (noroeste, suroriente y poniente) desde la Av. Apoquindo, en el sector oriente de la ciudad. Estos accesos están conectados a cuatro paraderos de buses, donde operan buses troncales y buses alimentadores.

Los buses troncales poseen una capacidad de 150 pasajeros cada uno y operan con una frecuencia de 5 minutos. Los buses alimentadores poseen una capacidad de 45 pax y la misma frecuencia. Además, la estación está conectada a una ruta del futuro Tranvía Las Condes. Se asume que la capacidad del tranvía será de 300 pax con una frecuencia de 5 min por sentido. Esto aumentará la demanda de pasajeros en la estación a 13.000 pasajeros por hora por sentido aproximadamente.



Ciudad (Plaza Los Dominicos)



Complementario (comercio)



Mesanina



Andén-escaleras



Tren-andén

**FIGURA 2: Espacios de Circulación Peatonal en la estación Los Dominicos**

**3. METODOLOGÍA**

**3.1 Consideraciones Generales**

La presente investigación tiene dos líneas complementarias. Una de recopilación e investigación y la otra de experimentación y proposición.

La primera parte consiste en estudiar la circulación peatonal en estaciones de metro nodo lugar. Para ello se obtuvo una muestra del 10% (nueve estaciones) de la Red de Metro de Santiago de Chile que presentan estas características. Esto para determinar las variables físicas, espaciales y operacionales que cambiaban el diseño de este tipo de estaciones. La Tabla 1 muestra las características de estas estaciones.

**TABLA 1: Estaciones Estudiadas del Metro de Santiago de Chile**

Estación	Los Dominicos	E. Militar	U. de Chile	P. de Valdivia	Los Leones	B. La Florida	La Moneda	Cal y Canto	Baquetano
Flujo [viajes/día]	14.500	95.700	92.000	53.200	49.500	32.100	49.300	60.800	31.800
Lugar dentro de estación [m <sup>2</sup> ]	32.000	27.000	12.139	5.228	20.803	8.189	5.798	3.267	6.041

Además, en la hora punta mañana se observaron algunas variables operacionales tales como la distribución de pasajeros en escalera mecánica (69%) y escalera alternativa (31%), la distribución de pasajeros con tarjeta BIP cargada (66%) y con recarga de tarjeta BIP o compra de boleto (34%), como también los tiempos de servicio en boleterías, torniquetes, puertas de salida y locales comerciales. En el Metro de Santiago la entrada al andén es vía torniquete operado con tarjetas electrónicas BIP y boletos. La salida del andén es vía puertas de salida unidireccionales donde no se requiere el uso de tarjetas electrónicas BIP o boletos. La Tabla 2 muestra los tiempos de servicio encontrados en estas estaciones del Metro de Santiago.

**TABLA 2: Tiempos de Servicio de Distintos Elementos de Circulación en el Metro de Santiago**

Valores [s/pax]	Caja de Boletería	Torniquete	Puertas de salida	Dentro de locales comerciales
Mínimo	9	1	0,1	20
Promedio	12	2	1	40
Máximo	18	3	1	60

La Tabla 3 muestra las variables físicas, espaciales y operacionales seleccionadas según cada espacio de circulación peatonal definido en una estación de metro nodo lugar (Seriani, 2010). El criterio de elección utilizado consistió en descartar la variable que no cambia de valor entre una estación y otra (por ejemplo el largo de andén no será variable relevante, ya que su valor de 135m es fijo entre una estación y otra, y está sujeto al largo del tren). Estas variables seleccionadas servirán de insumo para la segunda etapa de esta investigación.

**TABLA 3: Variables Estudiadas en Estaciones de Metro Nodo Lugar**

Espacios	Variable Física	Variable Espacial	Variable Operacional
Tren-andén	-Ancho de andén [m].	-Columnas entre puertas de tren y andén.	-Número pasajeros en andén y tren [pax]. -Frecuencia entre trenes [s]
Andén-escaleras	-Ancho de escalera [m]. -Cantidad de escaleras por andén. -Distancia con respecto al borde del andén [m].	-Pasamanos en escaleras. -Escaleras mecánicas.	-Número pasajeros andén [pax]. -Número pasajeros escalera [pax]. -Frecuencia entre trenes [s]
Mesanina	-Cantidad, distribución y ubicación de: torniquetes, puertas de salida y boleterías	-Barreras o pasillos de canalización.	-Número pasajeros desde y hacia andén y espacio complementario [pax]. -Frecuencia entre trenes [s]
Complementario	-Ancho de pasillo comercial [m]. -Profundidad descanso en escalera [m]. -Huella y contrahuella escalera [m].	-Mobiliario urbano. -Pasamanos en escalera. -Rampas y esquinas.	-Núm. pasajeros desde y hacia espacio complementario y ciudad [pax]. -Núm. de pasajeros turistas [pax]. -Frecuencia entre trenes [s]
Ciudad	-Ancho de vereda y edículo [m]. -Distancia desde edículo a cruce veh. [m]. -Distancia desde edículo a paradero bus [m].	-Pasamanos en escalera. -Mobiliario urbano.	-Tiempo ciclo semáforo en cruce veh. [s]. -Número de pasajeros en edículo [pax]. -Número de pasajeros en paradero [pax]. -Número de pasajeros en bus [pax]. -Frecuencia entre trenes [s] -Frecuencia de buses [s] -Frecuencia de tranvías [s]

Una vez identificadas las variables relevantes, se realizó la segunda etapa de esta investigación, la cual consistió en la simulación de estos espacios mediante un modelo de microsimulación peatonal, que permitió determinar soluciones de diseño en los distintos espacios de circulación.

El modelo de microsimulación peatonal utilizado fue LEGION Studio 2006. Según estudios de Ronald (2007) a diferencia de otros modelos, LEGION permite que cada peatón se represente como una entidad inteligente capaz de diferenciar su comportamiento, preferencias, características personales, e incluso factores físico-psicológicos tales como la insatisfacción (inconveniencia + incomodidad + frustración). Además, en el modelo LEGION no existen celdas, ni grillas y por tanto las entidades se desplazan vectorialmente (o de manera continua).

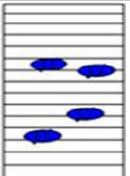
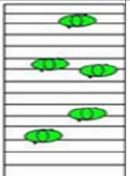
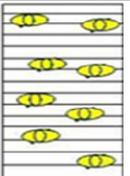
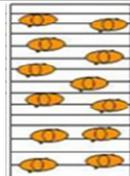
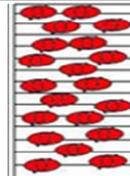
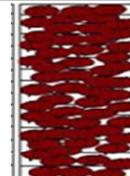
De esta manera, el entorno espacial es libre de restricciones artificiales (lo contrario a un tablero de ajedrez) y se asegura una simulación real de los movimientos peatonales. Por último, el modelo utiliza una representación gráfica del ambiente o espacio físico y también es posible una representación métrica, lo que permite utilizarlos en espacios abiertos, cerrados y semicerrados tales como estaciones de metro y sus alrededores. Para la presente investigación se consideró que la calibración y validación de LEGION Studio 2006 ya fue realizada por la empresa Metro de Santiago S.A.

Una vez obtenidos los resultados se compararon con estándares mínimos establecidos en manuales nacionales e internacionales (MINVU, 2009; NFPA130, 2007; Metro de Madrid, 2009) y se clasificaron según el Nivel de Servicio peatonal de Fruin (1971) en escaleras y zonas planas (ver Tabla 4 y 5).

TABLA 4: Estándares Mínimos para Estaciones de Metro Nudo Lugar

Elemento	Variable	Manual Metro de Madrid	Manual NFPA-130 (UK)	Manual REDEVU (Chile)
Andén	Ancho mínimo andén [m]	-	1,12	-
Andén	Tiempo evacuación [s]	-	≤ 240	-
Escaleras	Distribución escaleras [m]	-	≤ 100	-
Escaleras	Ancho mínimo escaleras [m]	1,6 recomendable: 1,8	1,10	1,0 (unidireccional) 2,0 (bidireccional)
Escaleras	Largo escaleras [peldaños]	$3 \leq L \leq 15$	-	$L \leq 15$
Escaleras	Largo huella(h) y contrahuella(c) [m]	$h \geq 0,28$ ; $0,13 \leq c \leq 0,185$ ; $0,6 \leq 2c + h$	-	$0,28 \leq h \leq 0,34$ ; $0,14 \leq c \leq 0,17$ ; $0,62 = 2c + h$
Escaleras	Descanso intermedio [m]	1,8 (más de 15 peldaños)	-	1,5 (más de 15 peldaños)
Esc. mec.	Ancho mínimo [m]	1,65	1,10	1,6 (debe existir esc. alternativa)
Rampas	Ancho mínimo [m]	1,6 recomendable: 1,8	1,12	2,0 (normal) 2,5 (minusválidos)
Rampas	Pendiente longitudinal [%]	≤ 8	-	$15 \leq \Delta \leq 40$ (rampa escalonada) $5 \leq \Delta \leq 15$ (normal y minusválidos)
Rampa Escalonada	Largo huella(h) y contrahuella(c) [m]	-	-	$2c + h = 0,90$ [m]; $h \geq 0,60$ [m]
Vereda calle	Ancho mínimo [m]	-	-	2,0

TABLA 5: Nivel de Servicio Peatonal (LOS) en Zonas Planas

Indicador	A	B	C	D	E	F
Densidad [pax/m <sup>2</sup> ]	≤0,31	0,43-0,31	0,72-0,43	1,08-0,72	2,17-1,08	≥2,17
Espacio [m <sup>2</sup> /pax]	≥3,24	2,32-3,24	1,39-2,32	0,93-1,39	0,46-0,93	≤0,46
Distancia entre personas [m]	≥1,80	1,52-1,80	1,18-1,52	0,96-1,18	0,68-0,96	≤0,68
Flujo [pax/m-min.]	≤23	23-33	33-49	49-66	66-82	variable
Velocidad prom. [m/s]	≥1,3	1,27-1,3	1,22-1,27	1,14-1,22	0,76-1,14	≤0,76
Ocupación [%]	0-30	30-40	40-60	60-80	80-100	Variable
Descripción del flujo y movimiento peatonal	- Veloc. Libre - Movimiento no restrictivo y sin cruces	- Veloc. normal - Interferencia ocasional, posibles cruces u otros.	- Veloc. parcialmente restringida. - Presencia pocos cruces u otros.	- Veloc. reducida. - Cruces limitados. - Flujo intermitente.	- Veloc. restringida. - Conflicto al pasar. - Flujo max. capacidad	- Mów. detenido. - Contacto físico. - Flujo esporádico. - Posible pánico.
Representación peatonal vista en planta						

### 3.2 Simulaciones para Recomendaciones de Diseño

A fin de obtener soluciones de diseño a través de la simulación, el valor de cada variable se ha elaborado en relación a algunos índices de desempeño. Una vez que un punto de inflexión fue encontrado, por la cual el valor de la variable no mejora significativamente el rendimiento, indica que se alcanzó una solución de diseño. La cual debe poseer un LOS E o menor. Por ejemplo, el ancho de andén fue probado en relación a la capacidad de los peatones (máximo flujo de peatones en el andén). Es evidente que a medida que aumenta el ancho de andén, el flujo de peatones puede aumentar. Sin embargo, para una demanda de pasajeros dado, hay un ancho de andén para la que no hay mucha

ganancia en la capacidad ni en el nivel de servicio (LOS). Esta anchura es la solución de diseño para las condiciones simuladas.

Dado que el caso de estudio (Los Dominicos) es una estación terminal se ha considerado que no existen pasajeros esperando en el andén para abordar el tren y este se descarga por completo. Para considerar diferentes niveles de demanda, se ha asumido diferentes descargas de pasajeros según distintos porcentaje de la capacidad de un tren (1504 pax); estos son 100, 75, 50 y 25 porcentaje de la capacidad.

A continuación se presentan las soluciones de diseño para estaciones terminales según cada espacio de circulación peatonal. Para ello, se simuló los datos obtenidos en terreno según las variables relevantes de las nueve estaciones de metro seleccionadas y los estándares de diseño utilizados en manuales.

### 3.2.1 Espacio Tren-Andén

En la figura 3 se puede observar que la capacidad del andén se puede aumentar hasta un ancho de 4,00 metros con un LOS E. Por encima de esa cifra, no se logra una ganancia importante al aumentar la anchura del andén, por ejemplo para 4,50 m. Esto ocurre para cualquier descarga de pasajeros expresada como porcentaje de la capacidad del tren. Por lo tanto, un andén de 4,00 m de ancho sería una solución de diseño para la estación Los Dominicos.

Respecto a los estándares mínimos (ver Tabla 4) se observa en la Figura 3 que un ancho de andén de 1,12 m presenta un LOS F (más allá de su capacidad máxima de 100 pax/min) incluso para la demanda más pequeña simulada. Esto es para un 25% de la capacidad de un tren. Por lo tanto, este ancho no debiera ser recomendable en ningún caso y menos aún para una estación terminal.

Un segundo análisis realizado en el espacio tren-andén fue la creación de relaciones flujo-velocidad de peatones en andenes. Esto se muestra en la Figura 4. Como se puede observar en la figura (línea punteada roja), para un ancho de andén de 3,50 m se logra una capacidad de 315 pasajeros por minuto para un 75% de la descarga de un tren. Para otros anchos, la capacidad no se logra obtener, pero las curvas tienen la forma característica de las relaciones flujo-velocidad.

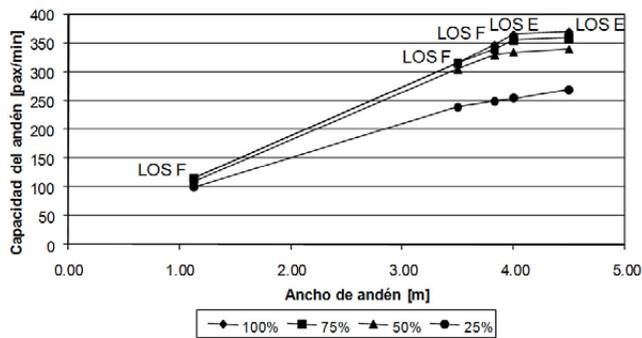


FIGURA 3: Capacidad de un Andén en Función del Ancho de Andén y la Descarga de Pasajeros de un Tren

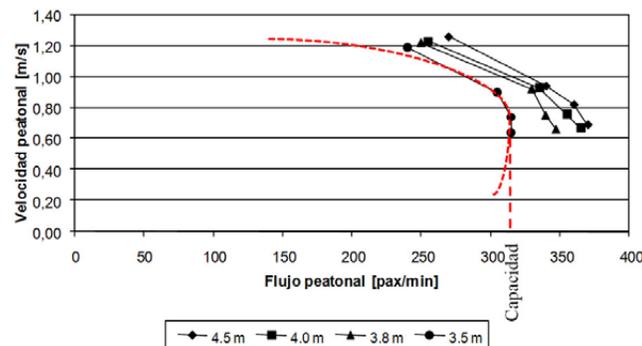


FIGURA 4: Relaciones Flujo-Velocidad Peatonal para Diferentes Anchos de Andén

Por último, Helbing et al (2000) afirman que una columna situada frente a una puerta de salida de un corredor o pasillo de transferencia puede aumentar el flujo de peatones, así como se puede reducir la densidad de peatones. Por lo tanto, al simular una columna de 0,40 m de diámetro a 0,60 m frente a la puerta de salida de un pasillo de transferencia (o trasbordo) el flujo de peatones se incrementó en 3 pax/min y la densidad se redujo en 11% en el pasillo.

A raíz de estos resultados, se simuló el uso de columnas de diámetro 0,40 m a 0,60 m frente a las puertas del tren, sin embargo los resultados no fueron concluyentes, por lo que esta medida no se recomienda en este último caso.

### 3.2.2 Espacio Andén-Escaleras

En este espacio se probaron cinco variables de diseño: cantidad de escaleras, ancho de escaleras, ancho de escaleras mecánicas, distancia a escaleras desde el borde del andén, y número de pasamanos en escaleras. Los resultados se muestran en las siguientes figuras.

Figura 5 muestra que la solución de diseño para el ancho de la escalera del andén es de 3,50 metros con LOS E. Este ancho permite un flujo de pasajeros unidireccional de 250 pax/min, lo que equivale al doble de flujo máximo respecto a un ancho de 1,6 m y un 64% menor al flujo de un ancho de 5,9 m (ver Tabla 6). Además, para ese ancho el tiempo máximo de evacuación del andén - 240 segundos, según NFPA130 (2007) - se logra para una descarga de tren menor al 50% de su capacidad. En el caso de una descarga del 100% de la capacidad del tren, las escaleras deben tener un ancho mayor a 10 m para lograr la citada norma.

En relación a los estándares mínimos (ver Tabla 4) se observa en la Figura 5 que los anchos de escalera de andén de 1,1 y 1,6 m no cumplen el tiempo máximo de evacuación de andén (240 s) incluso para la demanda más pequeña simulada. Esto es para un 25% de la capacidad de un tren. Por lo tanto, estos anchos no debieran ser recomendables en ningún caso y menos aún para una estación terminal.

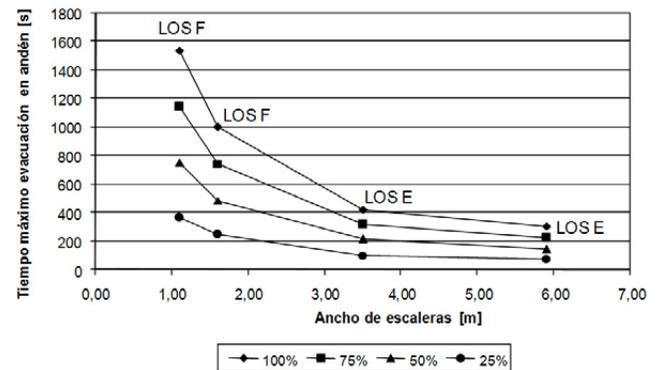


FIGURA 5: Tiempo Máximo de Evacuación en Andén versus Ancho de Escalera y Descarga de Pasajeros de un Tren

TABLA 6: Capacidad de Escaleras de Andén

Ancho de escalera [m]	1,10	1,60	3,50	5,90
Flujo máximo escalera de subida [pax/min]	85	125	250	385

Por otro lado, la Figura 6, muestra que al aumentar la cantidad de escaleras, disminuye el tiempo máximo de evacuación, de modo que si se proporcionan dos escaleras por andén, el tiempo máximo de evacuación se alcanza para cualquier descarga de pasajeros. Esto implica que si la descarga de un tren es mayor al 50% de su capacidad, debe proporcionarse al menos dos escaleras por andén de 3,5 m.

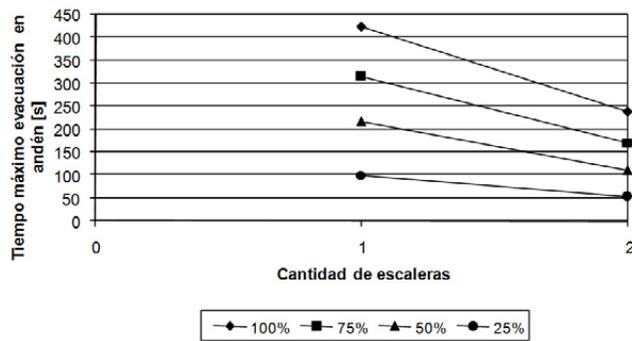


FIGURA 6: Tiempo Máximo de Evacuación en Andén versus Cantidad de Escaleras de Salida y Descarga de Pasajeros de un Tren

Con respecto a la distancia a escaleras desde el borde del andén, se encontró que esta variable no afecta el tiempo de evacuación del andén.

En relación con los pasamanos en escaleras de un andén, tres pasamanos en una escalera de salida (dos en los extremos y uno central) generan una densidad de pasajeros entre 1 a 4% menor que una escalera con sólo dos pasamanos en los extremos. Sin embargo, el pasamano central aumenta el tiempo de evacuación entre 2 y 8%, ya que funciona como un cuello de botella.

Por último, la Figura 7 muestra que la solución de diseño para el ancho de escalera mecánica es de 1,65 m con LOS E. Este ancho alcanza un máximo de flujo peatonal unidireccional de 115 pax/min, lo que equivale a un aumento de un 91% respecto a un ancho de 1,1 m y si se aumenta el ancho a 1,8 m se logra solo un aumento de 21% (ver Tabla 7).

En relación a los estándares mínimos (ver Tabla 4) se observa en la Figura 7 que el ancho de escalera mecánica de 1,1 no cumple el tiempo máximo de evacuación de andén (240 s) incluso para la demanda más pequeña simulada. Esto es para un 25% de la capacidad de un tren. Por lo tanto, este ancho no debiera ser recomendable en ningún caso y menos aún para una estación terminal. Mientras que un ancho de escalera mecánica de 1,65 y 1,8 m puede hacer frente al tiempo máximo de evacuación para una demanda de un 25% y 50%, respectivamente.

TABLA 7: Capacidad de Escaleras Mecánicas de Andén

Ancho de escalera mecánica [m]	1,10	1,65	1,80
Flujo máximo escalera mecánica de subida [pax/min]	60	115	140

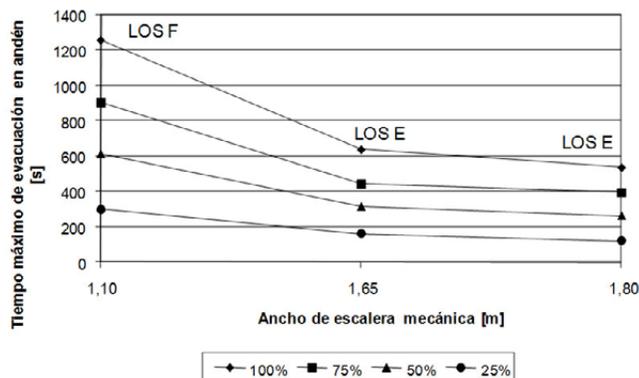


FIGURA 7: Tiempo Máximo de Evacuación versus Ancho de Escalera Mecánica y Descarga de Pasajeros de un Tren

### 3.2.3 Espacio Mesanina

Para la simulación de la mesanina se supuso una descarga y carga de 369 pasajeros (25% de la capacidad del tren) por acceso a la mesanina. Esto supone que la estación Los Domínicos funcionará como una estación normal intermedia en el futuro. Los cuatro accesos a la mesanina son: dos salidas desde cada andén y dos salidas/entradas a/desde el espacio complementario (véase Figura 14 al final del documento).

Se encontró que a medida que el número de torniquetes aumenta, el tiempo de despeje de la mesanina disminuye. Este tiempo alcanza un valor mínimo de 580 segundos ya sea para dos grupos de 4 torniquetes o para un grupo de 7 torniquetes. Además, cuando se tiene dos grupos de 4 torniquetes se alcanza una densidad mínima de 0,98 pasajeros por metro cuadrado. Por lo tanto, esta parece ser la configuración y solución de diseño de los torniquetes.

Con respecto a las puertas de salida del andén, se encontró que dos grupos de 6 puertas (6 puertas de salida por andén) es la solución de diseño recomendada con LOS E. Esta configuración es muy superior al estándar del tiempo máximo de evacuación del andén de 240 segundos. Esto se muestra en la Figura 8.

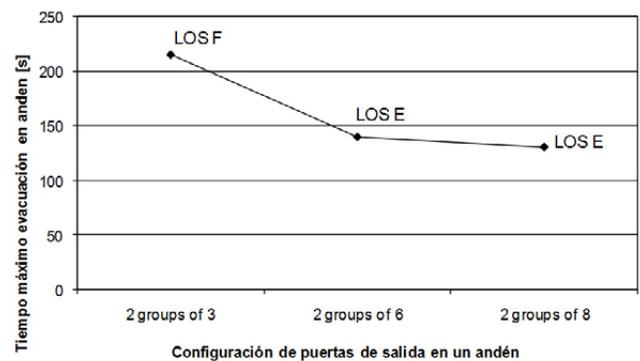


FIGURA 8: Tiempo Máximo de Evacuación y la Configuración de Puertas de Salida

En relación a la ubicación de boleterías, si estas se encuentran bien a la izquierda o a la derecha de la mesanina, en lugar del centro como se muestra en la Figura 14, se obtiene el mínimo tiempo de despeje de la mesanina (795 segundos). Sin embargo, si la boletería se ubica en el centro de la mesanina se logra la menor densidad de pasajeros en la mesanina: 1,07 pax/m<sup>2</sup>, ya que las colas de pasajeros se desarrollan hacia el acceso de la mesanina sin obstruir la circulación de pasajeros hacia los torniquetes de entrada a los andenes, como en el caso anterior.

Por último, se recomienda cualquier forma de canalización de pasajeros para evitar la circulación justo frente de la boletería. Por ejemplo, dejando un pasillo de 2 m de ancho entre las puertas de salida del andén y la boletería produce una densidad de mesanina 56% menor que sin canalización (0,82 pax/m<sup>2</sup>).

### 3.2.4 Espacio Complementario

Este espacio fue simulado con la misma demanda que circula en el espacio de mesanina. Como era de esperar, mientras mayor es el ancho del pasillo comercial, el flujo de pasajeros aumenta proporcionalmente. Esto se produce hasta un ancho de pasillo de 7,50 metros. Sobre ese ancho el flujo de pasajeros aumenta menos que proporcionalmente. Por lo tanto, 7,50 m parece ser la solución de diseño de un pasillo comercial en donde se alcanza la mínima densidad de 1,14 pax/m<sup>2</sup> y un flujo máximo bidireccional de 655 pasajeros por minuto.

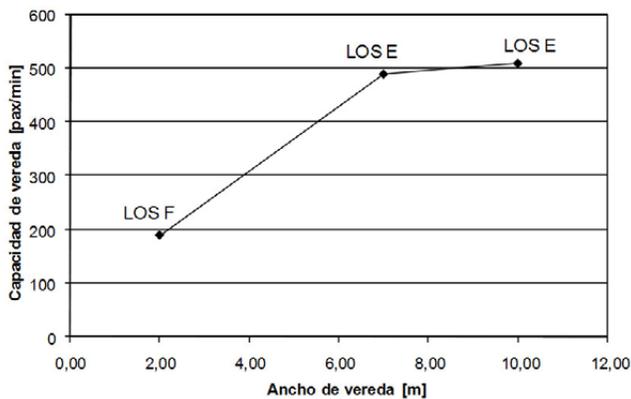
Si se coloca mobiliario urbano en los pasillos (por ejemplo, mesas de restaurantes) el flujo bidireccional de pasajeros se reduce casi un 30% (465 pax/min). Sin embargo, el mobiliario urbano se puede ubicar en las esquinas del pasillo, donde las trayectorias naturales de los pasajeros no se vean obstruidas.

En relación a la longitud del descanso en escaleras de un pasillo comercial, parece ser que una longitud de descanso de 1,50 m en una escalera de 4 escalones es mejor que una escalera de 4 pasos sin descanso. Ya que una escalera con descanso el flujo bidireccional aumenta en 31% (400 pax/min) y la densidad se reduce en 62% (0,99 pax/m<sup>2</sup>). Por lo tanto debiera ser siempre recomendable utilizar un descanso en escaleras, y no sólo cuando se tienen más de 15 escalones tal como se menciona en los estándares mínimos (ver Tabla 4). Además, si se sustituye una escalera con una rampa de 10% de pendiente longitudinal, el flujo bidireccional puede aumentar a 410 pax/min y la densidad se puede reducir a 0,65 pax/m<sup>2</sup>.

Por último, se recomienda un pasamano central en las escaleras de un pasillo comercial para organizar el flujo en cada sentido (sube por la izquierda y se baja por la derecha). Esto aumenta el flujo en un 20% (186 pax/min-dirección) y reduce la densidad en un 55% (1,17 pax/m<sup>2</sup>) en comparación con una escalera sin pasamanos central.

**3.2.5 Espacio Ciudad**

Tres análisis se realizaron en relación con el espacio urbano: La capacidad de una vereda con respecto a su ancho, la insatisfacción (inconveniencia, incomodidad y frustración) con respecto a la distancia desde la estación hasta el paso de peatones del cruce vehicular más cercano, y la insatisfacción con respecto a la distancia hasta la parada de bus más cercana. Para estos análisis se consideró las mismas demandas del espacio complementario.



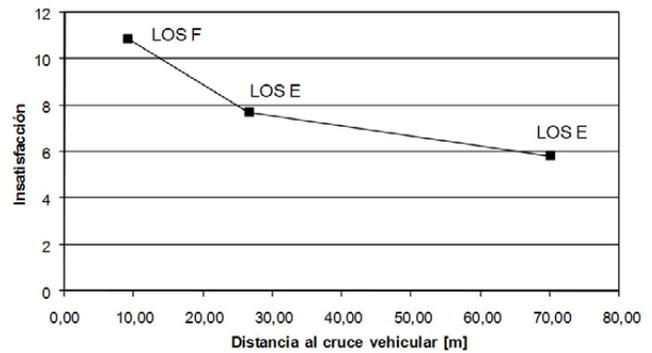
**FIGURA 9: Capacidad de la Vereda versus Ancho**

Como se puede observar en la Figura 9, pareciera ser que la solución de diseño para el ancho de vereda próxima a la estación es de 7,00 m con LOS E. Para ese ancho la capacidad de la vereda alcanza casi los 500 pax/min en ambas direcciones. Esta capacidad es casi la misma que la capacidad de una vereda de ancho 10 metros.

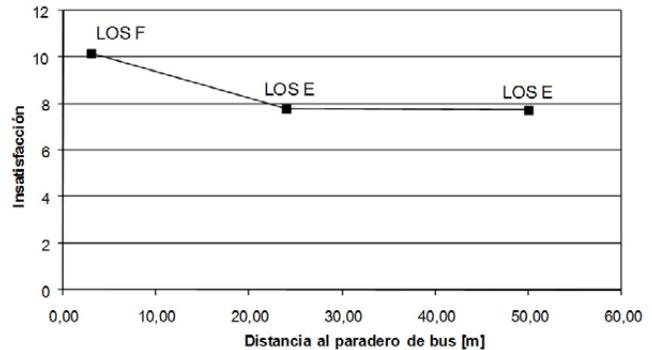
La figura 10 muestra la insatisfacción de los pasajeros con respecto a la distancia desde la estación hasta el paso de peatones del cruce vehicular más cercano. De acuerdo a la figura, el punto de cambio de pendiente en la curva es de 26 metros, lo que indica que esta podría ser la solución de diseño para la distancia entre la estación y el paso de paso de peatones. Del mismo modo, la figura 11 se muestra el punto de cambio de pendiente para la distancia entre la estación y la parada de bus más cercana: 24 m.

Por lo tanto, pareciera ser que la distancia más cercana entre la estación y otros modos de transporte público como el bus o caminar no debe ser mayor a 25 metros.

Cabe señalar que en LEGION, la insatisfacción es la suma de tres variables físicas y psicológicas: inconveniencia (I), que es el esfuerzo físico de caminar una cierta distancia, incomodidad (D), que es la falta de espacio personal, y la frustración (F), que es la necesidad de reducir la velocidad al caminar en espacios congestionados. Entonces, cuando la distancia a un origen (paso de peatones, parada de bus) aumenta, I aumenta, pero D y F disminuyen ya que hay más espacio para circular y por ende menor densidad. Esto, a su vez aumenta la velocidad peatonal. Esa es la razón por la cual, cuando la distancia al cruce y bus aumenta, la insatisfacción disminuye, es decir, la variable I pesa menos que las otras dos variables D y F en la insatisfacción de los pasajeros para las condiciones simuladas.



**FIGURA 10: Insatisfacción versus Distancia al Cruce Vehicular**



**FIGURA 11: Insatisfacción versus Distancia al Paradero de Bus**

Dos temas adicionales fueron probados por simulación. Una de ellas es la exigencia de que el mobiliario urbano no debe colocarse en la vereda, ya que reduce su capacidad en un 26%. Otro resultado es que los pasamanos centrales en las escaleras de acceso a la estación puede aumentar el flujo de pasajeros en 22% (hasta 150 pax/min-dirección) en comparación con una escalera sin pasamanos central. Ya que el flujo de peatones se divide por sentido de circulación (sube por la izquierda y se baja por la derecha) y la densidad en la escalera se reduce un 26% en comparación a una escalera sin pasamanos central, alcanzando una densidad máxima de 2,12 pax/m<sup>2</sup>.

#### 4. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS EN LA ESTACIÓN LOS DOMÍNICOS

En este capítulo se analizan dos escenarios en la estación Los Dominicos. Uno es la situación actual en la que la demanda de pasajeros es de unos 6.000 pasajeros por hora por dirección, lo que se denomina en adelante el “escenario base”. Otro es un “escenario futuro” al considerar un tranvía de alimentación en la estación Los Dominicos, lo cual aumenta la demanda de pasajeros a 13.000 pax/h-dirección.

En términos de diseño físico la estación Los Dominicos satisface casi todas las recomendaciones mencionadas del capítulo anterior. Los andenes poseen un ancho de 4,15 m (> 4 m). Existen tres escaleras por andén, al menos una de ancho 5 m (> 3,5 m) con pasamano central. Además, hay 8 torniquetes (> 7) en cada mesanina (oriente y poniente). Por último, las veredas alrededor de la estación son de ancho 10 m (> 7 m). Sin embargo, existen otros espacios de circulación que no cumplan las normas mínimas recomendadas.

El primer problema detectado es en el espacio de andén-escaleras. En este espacio las escaleras poniente y oriente, de cada andén, poseen un ancho de 3 m, sin pasamanos central. Esto hace que la densidad de pasajeros llega a un nivel de servicio LOS E en el escenario base, e incluso un LOS F en el escenario futuro (ver Figuras 12 y 13 al final del documento).

Otro problema se encuentra en el espacio de mesanina. Por ejemplo, en la mesanina poniente hay cuatro puertas de salida. Al estar ubicadas al lado de los torniquetes, la densidad de pasajeros aumenta a un LOS E y F en ambos escenarios (Figuras 14 y 15).

En el espacio complementario el ancho del pasillo comercial se reduce a 6 m en las proximidades de la mesanina, y hay mobiliario urbano cerca del acceso a esta. Lo cual producirá problemas como por ejemplo que la densidad de LOS será E y F en el futuro escenario (Figura 17). Sin embargo, para el escenario base de la simulación no se muestra ningún problema con LOS A y B en este espacio (Figura 16).

Por último, el espacio urbano, debido a la variedad de veredas, pasos de peatones, y senderos hacia/desde la estación, se muestra un LOS E o F en el escenario base y futuro, como se muestra en las Figuras 18 y 19.

#### 5. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio se dividen en cuatro partes. La primera parte corresponde al desarrollo de recomendaciones de diseño de acuerdo a cada espacio de circulación peatonal. Por ejemplo, para el espacio tren-andén, se recomienda una andén de 4 metros de ancho si el 100% de los pasajeros bajan del tren al mismo tiempo (alrededor de 1500 pasajeros); para el espacio andén-escaleras se sugiere proporcionar dos escaleras de salida si el número de pasajeros al bajar del tren alcanza el 50% de su capacidad; para el espacio de mesanina se debe establecer más de siete torniquetes o dos grupos de cuatro torniquetes para una descarga de 25% de la capacidad del tren; para el espacio complementario se recomienda un pasillo comercial de ancho 7,5 m para la misma demanda de pasajeros (flujo bidireccional); y finalmente para el espacio urbano (ciudad) se recomienda un ancho de vereda superior a 7,0 m, cerca de los accesos de la estación (flujo bidireccional).

La segunda parte, consiste en evaluar como elementos espaciales, tales como pasamanos en escaleras o columnas frente a las puertas de salida de un pasillo, pueden transformar las estaciones nodo lugar en espacios urbanos eficientes y seguros.

En el primer caso, se concluye que los pasamanos en escaleras son beneficiosos sólo cuando se tiene un flujo bidireccional, ya que el flujo de peatones se divide por sentido de circulación (sube por la izquierda y se baja por la derecha), pero no así para flujos unidireccionales, ya que se presentan como un obstáculo o cuello de botella. En el segundo caso, es relevante mencionar que elementos verticales que a priori se entenderían como un obstáculo al flujo peatonal, en definitiva se transforman en canalizadores de flujo, ya que se produce un vacío entre la puerta y la columna, reduciendo la densidad en 11%.

En relación a la experiencia práctica, los resultados consisten en la aplicación de estas recomendaciones a la estación Los Dominicos en Santiago de Chile. En consecuencia, se encontró que para el escenario base la demanda no es lo suficientemente grande como para causar conflictos entre peatones y su entorno, lo que en general presenta niveles de servicio peatonal entre A y C. Sin embargo, en un escenario que considera un proyecto de tranvía de alimentación, surgen conflictos en el espacio del andén-escaleras, espacio mesanina, espacio complementario, y los espacios de ciudad logrando una reducción del nivel de servicio peatonal a E e incluso F. En tal caso, la estación requiere del uso de las recomendaciones propuestas para que funcione correctamente.

Por último, como investigación futura se propone crear nuevos escenarios de simulación para establecer recomendaciones de diseño para todo tipo de estaciones; llevar las recomendaciones de diseño a un manual con ilustraciones gráficas; incorporar en las recomendaciones la variable costo-beneficio; y realizar un mayor número de simulaciones para identificar nuevas relaciones y lógicas entre la distancia recorrida e insatisfacción peatonal.

En conclusión, este estudio permitirá a ingenieros y arquitectos poder identificar los conflictos, clasificarlos por espacio, analizarlos según variable de circulación peatonal y comprobar si los elementos de circulación satisfacen las demandas de pasajeros.

#### AGRADECIMIENTOS

Los recursos para la presentación de este trabajo provinieron de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad de Los Andes (Chile) en conjunto con la Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Los autores desean agradecer a Metro de Santiago S.A. por el suministro de datos operacionales y por el acceso al modelo de microsimulación peatonal LEGION para este estudio. Los resultados y opiniones son de responsabilidad exclusiva de los autores de este artículo.

## REFERENCIAS

- Busquets, J. (2006). Defining the Urbanistic Project – Ten Contemporary Approachs. Harvard Design Magazine. Fall 2006/Winter 2007. 71-73
- Fruin, J.J. (1971). Designing for pedestrians: a level-of-service concept. Highway Research Record 377, 1-15.
- Helbing, D., Farkas, I. and Vicsek, T. (2000). Application of microscopic pedestrian simulation model. Nature 407, 208-409.
- Lopez, A. (2008). *El metro como infraestructura de proyecto urbano: tres escenarios de intervención para la estación de metro Plaza Maipú*. Tesis de Arquitectura y Magíster en Desarrollo Urbano. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Metro de Madrid S.A. (2009). *Infraestructuras Módulo 7: Diseño de Estaciones Accesibilidad*. Dirección de Arquitectura, Obra Civil y Patrimonio Unidad de Obra Civil, Madrid.
- Metro de Santiago (2009). *Memoria Anual (2008)*. Metro de Santiago S.A., Santiago.
- Metro de Santiago (2008). *Memoria Anual (2007)*. Metro de Santiago S.A., Santiago.
- MINVU (2009). *Recomendaciones para el Diseño de Elementos de Infraestructura Vial Urbana (REDEVU)*, Santiago.
- NFPA 130, (2007). *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems*. Chapter 5, Stations. National Fire Protection Association. An International Codes and Standards Organization, Massachusetts.
- OCUC (2009). *Anteproyecto de arquitectura entorno estación metro Los Dominicos*. Observatorio de Ciudades de la Universidad Católica de Chile, Santiago.
- Ronald, N. (2007). *Agent-based approaches to pedestrian modelling*. Master of Engineering Science Thesis. The University of Melbourne, Melbourne.
- Seriani, S. (2010). *Microsimulación Peatonal en Espacios de Intercambio Metro-Bus. Estación Los Dominicos*. Tesis de Ingeniería Civil y Magíster en Proyecto Urbano, Universidad de los Andes y Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

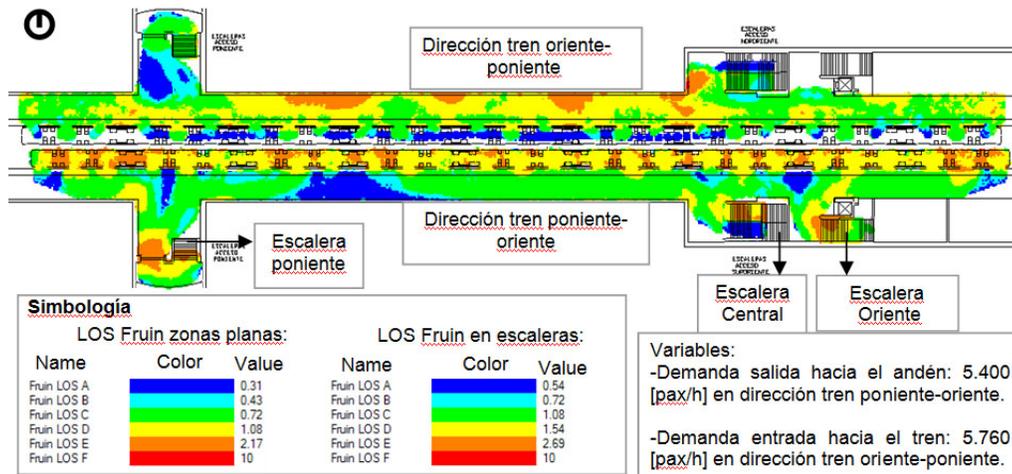


FIGURA 12: Densidad en el Espacio Tren-Andén-Escaleras, Escenario Base (pax/m<sup>2</sup>)

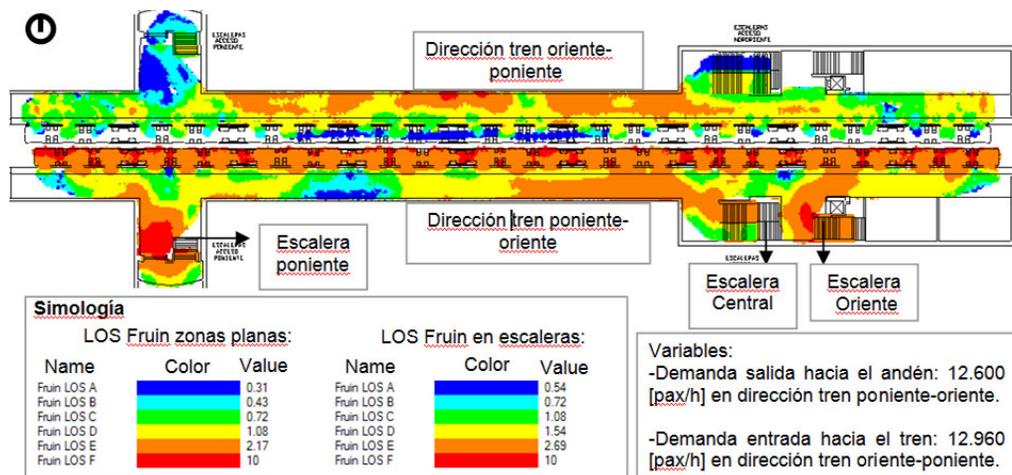


FIGURA 13: Densidad en el Espacio Tren-Andén-Escaleras, Escenario Futuro (pax/m<sup>2</sup>)

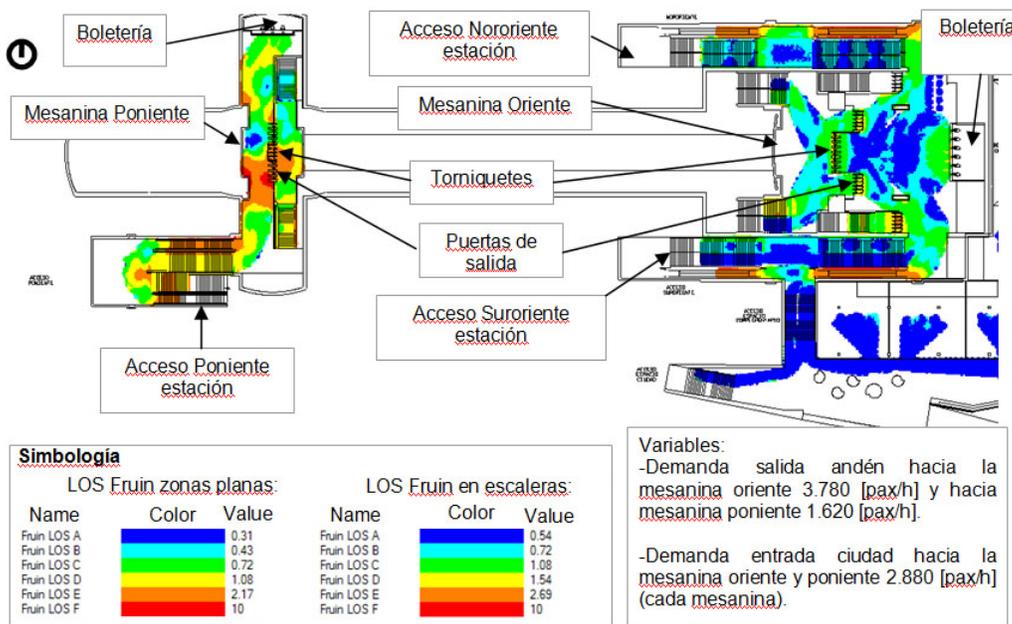


FIGURA 14: Densidad en el Espacio de Mesanina, Escenario Base (pax/m<sup>2</sup>)

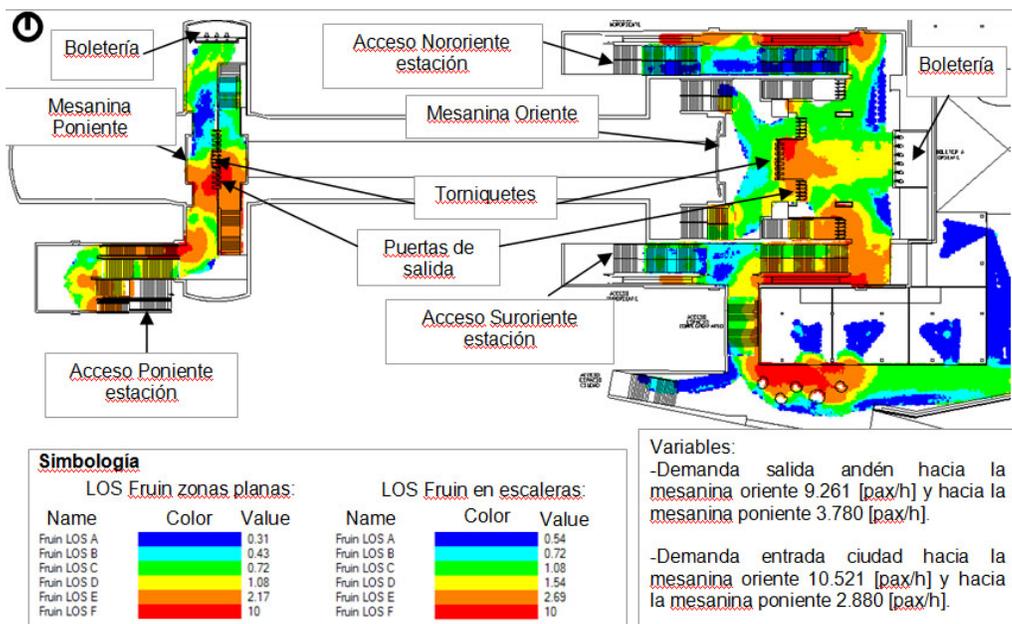


FIGURA 15: Densidad en el Espacio de Mesanina, Escenario Futuro (pax/m<sup>2</sup>)

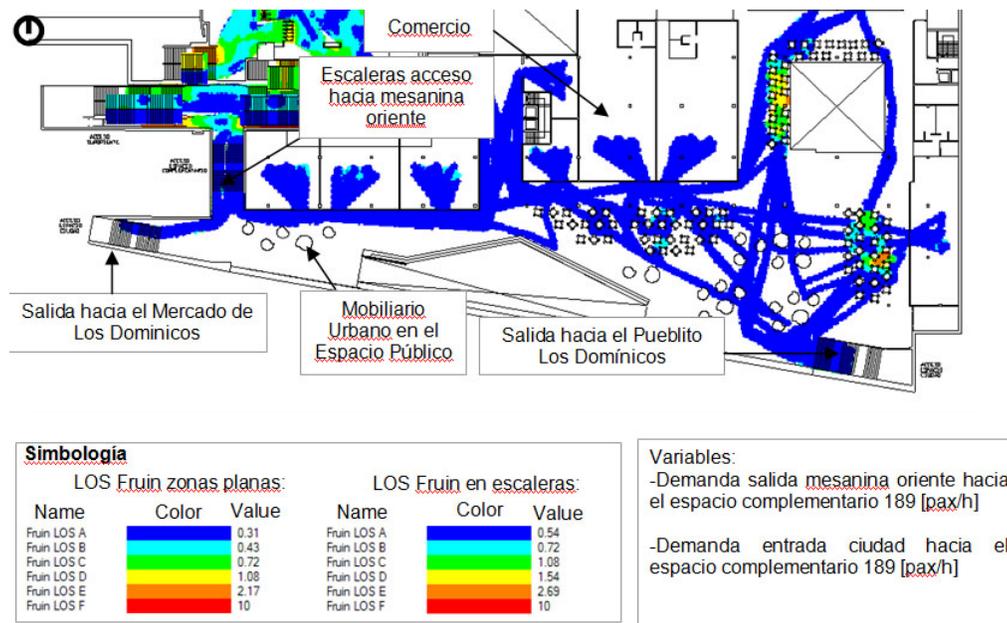


FIGURA 16: Densidad en el Espacio Complementario, Escenario Base (pax/m<sup>2</sup>)

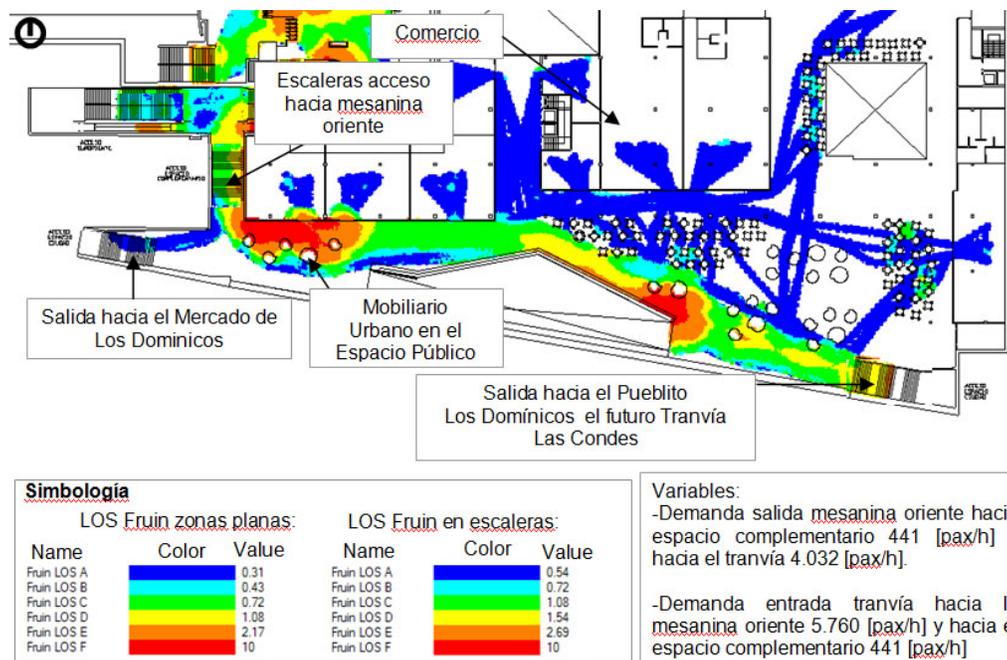


FIGURA 17: Densidad en el Espacio Complementario, Escenario Futuro (pax/m<sup>2</sup>)

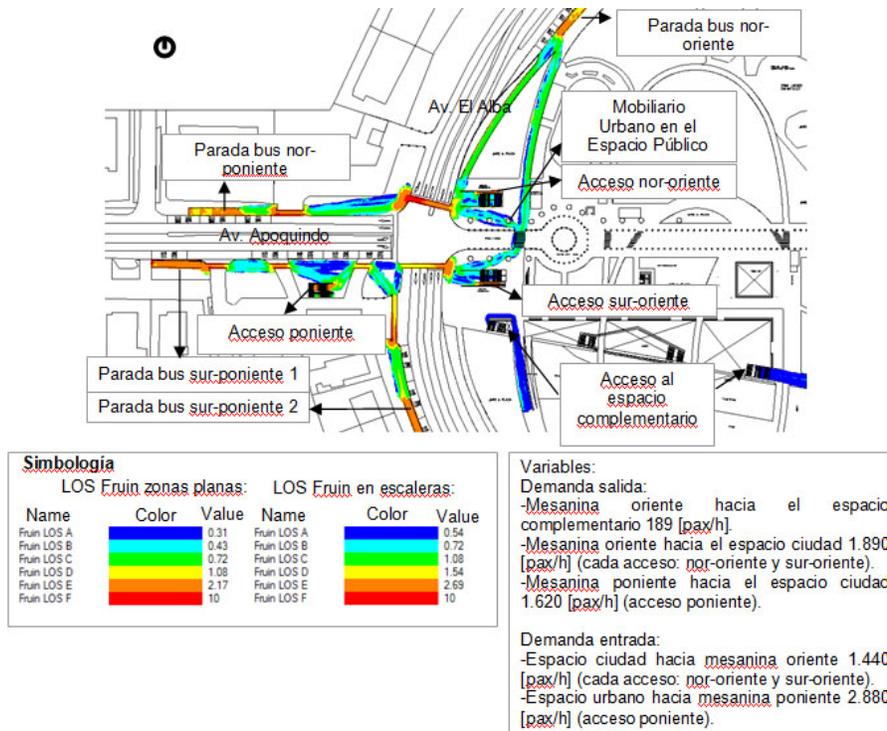


FIGURA 18: Densidad en el Espacio Urbano o Ciudad, Escenario Base (pax/m<sup>2</sup>)

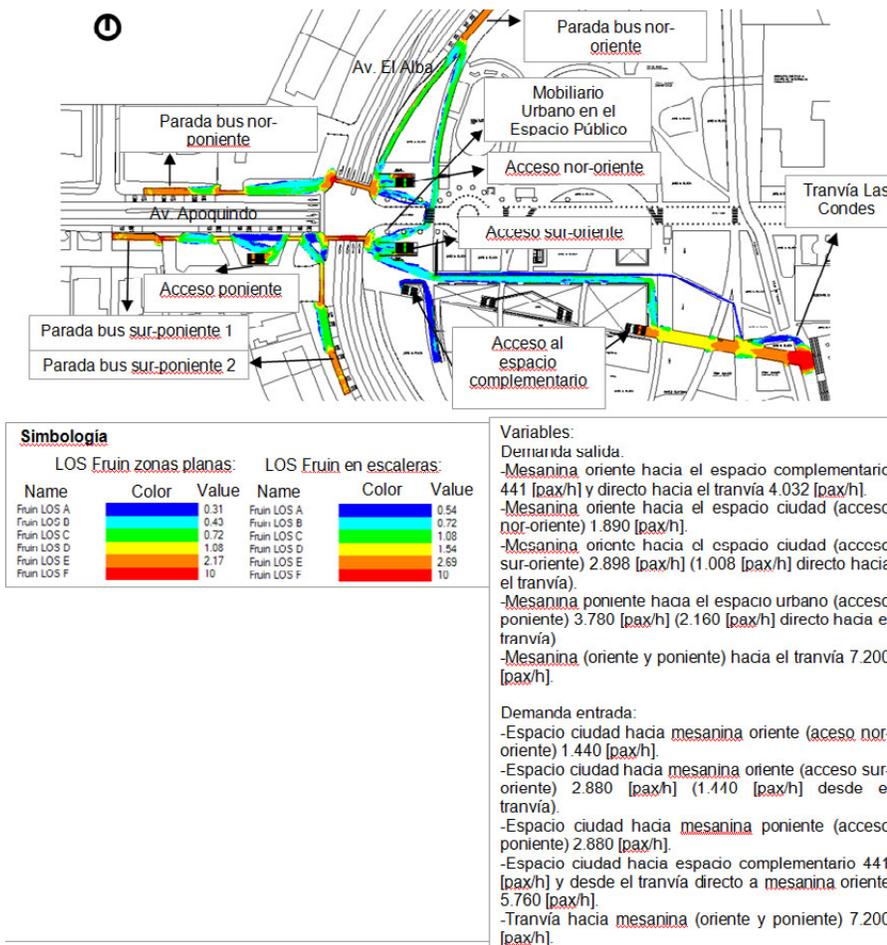


FIGURA 19: Densidad en el Espacio Urbano o Ciudad, Escenario Futuro (pax/m<sup>2</sup>)