

TOPOLOGÍAS DE ANDENES Y SU IMPACTO EN LA EFICIENCIA DE ESTACIONES DE METRO

Ariel López¹

¹ Universidad de Chile

*Autor para
correspondencia:
ariellopez@ug.uchile.cl

RESUMEN

La eficiencia y capacidad de los sistemas de transporte, en particular los ferrocarriles y metros, están intrínsecamente ligadas al diseño y operación de sus estaciones. Esta investigación se centra en cómo la topología de la plataforma de andenes influye en la eficiencia y capacidad de las estaciones de Metro. A través de simulaciones y la implementación del Índice de Eficiencia de Plataforma de Andenes \mathcal{AE} , se evaluaron y simularon tres configuraciones de andenes: central, lateral y mixto. Los resultados indican que el andén mixto es el más eficiente, seguido del central y, finalmente, el lateral. Se destaca la importancia de un diseño modular que permita adaptaciones futuras según la demanda, proponiendo un modelo de estación modular adaptable a largo plazo. Esta investigación proporciona herramientas y perspectivas valiosas para la planificación y diseño de estaciones de Metro, enfatizando la necesidad de considerar la eficiencia operativa y la adaptabilidad en el diseño.

Palabras clave Metro, estación, eficiencia en andenes

ABSTRACT

The efficiency and capacity of transportation systems, particularly railways and subways, are intrinsically linked to the design and operation of their stations. This research focuses on how platform topology influences the efficiency and capacity of subway stations. Through simulations and the implementation of the Platform Efficiency Index \mathcal{AE} , three platform configurations were evaluated and simulated: central, lateral, and mixed. The results indicate that the mixed platform is the most efficient, followed by the central and, finally, the lateral. The importance of a modular design that allows for future adaptations according to demand is highlighted, proposing a long-term adaptable modular station model. This research provides valuable tools and perspectives for the planning and design of subway stations, emphasizing the need to consider operational efficiency and adaptability in design.

Keywords Metro, station, platform efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

En sistemas de transporte, como buses, tranvías, teleféricos, ferrocarriles y metros, la eficiencia y capacidad del sistema están profundamente influenciadas por el diseño y operación de las estaciones (Sameni *et al.*, 2016). Específicamente, en un sistema ferroviario como el Metro, la detención en la estación representa la mayor restricción a la velocidad del circuito, impactando directamente en la capacidad de transporte del sistema.

El diseño y operación de estaciones de transporte, especialmente ferroviarias y de metro, han sido objeto de numerosos estudios y publicaciones a lo largo de los años. Estos estudios han abordado diversos aspectos, desde el diseño arquitectónico y estructural hasta la eficiencia operativa y la seguridad de los pasajeros.

En el ámbito del diseño arquitectónico y estructural, el BUEDRI (2003) proporcionó un código específico para el diseño de sistemas de metro en Beijing, estableciendo estándares y directrices para asegurar la eficiencia y seguridad de estos sistemas. De manera similar, Wang (2008) se centró específicamente en el diseño de plataformas de estaciones de metro, mientras que Shi (1997) y Xu (2009) analizaron y discutieron diferentes topologías y diseños de estaciones.

Desde una perspectiva de eficiencia operativa, López (2015) exploró la optimización del diseño de estaciones de metro mediante la modelación y simulación de diferentes topologías de plataformas de andenes. En un enfoque similar, Hui (2008) analizó la optimización del diseño de plataformas en sistemas de tránsito ferroviario urbano. Además, Wang *et al.* (2013), Zhang *et al.* (2008) y Seriani *et al.* (2019) utilizaron técnicas de modelación y simulación para analizar y optimizar el movimiento de pasajeros durante el abordaje y desembarque en estaciones de metro.

La seguridad de los pasajeros ha sido otro tema de interés. Cheng y Yang (2012) y Li *et al.* (2012) se centraron en la capacidad de evacuación de emergencia de las estaciones de metro, proporcionando criterios sobre cómo diseñar estaciones para una evacuación eficiente en caso de emergencias. La NFPA (2014) estableció estándares específicos para estaciones de metro, con un enfoque en la protección contra incendios, seguridad y evacuación de emergencia.

El comportamiento de los pasajeros y su interacción con las infraestructuras de las estaciones ha sido estudiado por varios autores. Fruin (1971) es referente en este campo aportando los criterios iniciales niveles de servicio peatonal, mientras que Li y Zhou (2013) se centraron en la organización óptima de los pasajeros en estaciones de transferencia. Nai *et al.* (2012) y Seriani y Fernandez (2015) exploraron la adaptabilidad y gestión del tráfico peatonal en estaciones de metro, respectivamente.

Las tecnologías emergentes y metodologías avanzadas también han sido incorporadas en la investigación sobre estaciones de transporte. Por ejemplo, Liu *et al.* (2010) discutieron el impacto de obras en cercanías de estaciones de metro, mientras que Alawad *et al.* (2020) y Ali *et al.* (2019) exploraron el uso de tecnologías como la inferencia neurodifusa y el Internet de las Cosas (IoT) para mejorar la gestión y operación de estaciones ferroviarias.

Para mantener una alta velocidad del circuito, es esencial minimizar los tiempos de permanencia del tren en la estación, maximizando la transferencia de pasajeros entre el andén y el tren en el

mínimo tiempo posible, manteniendo altos niveles de servicio (Sameni *et al.*, 2016). La eficiencia de una estación está determinada principalmente por la capacidad de transferencia que tiene la plataforma de andenes, que es el área crítica de la estación y motivo de la presente investigación.

En esta investigación se presentan los resultados de un análisis a las raíces de la lógica del diseño de la estación y se estudian cada uno de los componentes desde una perspectiva física de infraestructura y operativa. Se estudia el comportamiento de los pasajeros desde una perspectiva operativa en andenes y accesos de trenes, dejando abierta la posibilidad de calibraciones locales, ya que el comportamiento de los pasajeros al interior de la estación está fuertemente determinado por factores culturales.

Se modela el comportamiento de los pasajeros al interior de la estación, estableciendo un algoritmo que describe la interacción de pasajeros-agentes con diferentes infraestructuras y se simulan diferentes escenarios utilizando *Anylogic*.

Con lo anterior, se evalúa la eficiencia y capacidad de diferentes configuraciones de plataformas de andenes, analizando sus características y se concluye describiendo qué configuración de estación es la idónea para diferentes condiciones de entorno y operación.

Se propone un modelo de estación modular genérica, que es funcional para todas las futuras estaciones y es capaz de adaptarse a la demanda de pasajeros en el largo plazo, duplicando su capacidad de transferencia de forma planificada y eficiente.

2. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Hasta mediados del siglo XX, el diseño de estaciones de metro se inspiraba principalmente en las prácticas ferroviarias tradicionales. Sin embargo, con la creciente urbanización y la migración masiva de zonas rurales a urbanas, las ciudades experimentaron una densificación significativa, lo que ejerció presión sobre la capacidad de las estaciones de metro. Esta situación impulsó a los expertos a reevaluar y adaptar el diseño tradicional de estaciones ferroviarias hacia modelos que priorizan la eficiencia en el flujo y transferencia de pasajeros. Esta tendencia se observó especialmente en ciudades con sistemas de metro de alta demanda, como Beijing, Moscú y Tokio. Esta evolución ha sido ampliamente documentada por académicos asiáticos y de Europa oriental, incluyendo a Wang (2008), Yao *et al.* (2012), Cheng y Yang (2012), y Li *et al.* (2012), entre otros.

En el Figura 1 se ilustra este fenómeno, mostrando la afluencia diaria de pasajeros en sistemas de metro por ciudad y el promedio de pasajeros diarios por estación. Es notable cómo las estaciones del Metro de Santiago presentan una afluencia por estación muy superior a los metros de Europa occidental y comparable a la del Metro de Shanghái, mientras que las estaciones del Metro de Caracas superan en afluencia a los Metro de Moscú, Beijing o Tokio.

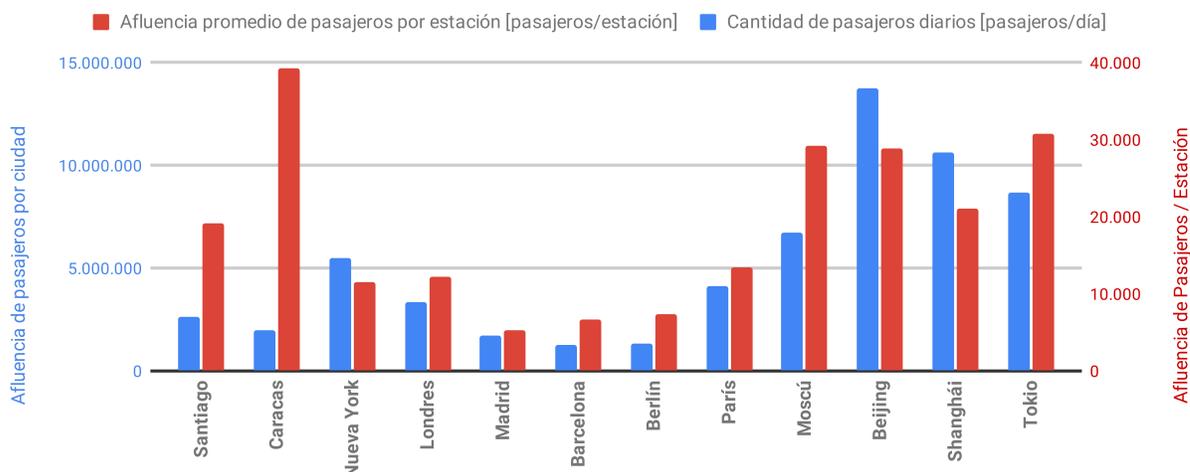


Figura 1 Afluencia de pasajeros y promedio por estación en Metros del Mundo

Fuente: Elaboración propia a partir de la memoria anual de cada sistema (2023)

Tabla 1 Afluencia de pasajeros y características de algunos sistemas de Metro en el mundo

Ciudad	Nº de estaciones	Longitud de vías [km]	Cantidad de pasajeros diarios [pas/día]	Nº de líneas	Tasa de crecimiento de km de línea por año [km/año]	Afluencia promedio de pasajeros por estación [pas/estación]	Afluencia promedio de pasajeros por línea [pas/línea]
Santiago	136	140	2.600.000	7	2,9	19.118	371.429
Caracas	51	106	2.000.000	5	2,7	39.216	400.000
Nueva York	472	394	5.465.034	24	3,3	11.578	227.710
Londres	274	408	3.370.000	11	2,6	12.299	306.364
Madrid	328	294	1.738.000	12	2,8	5.299	144.833
Barcelona	189	170	1.273.150	12	1,7	6.736	106.096
Berlín	175	149	1.300.000	9	1,2	7.429	144.444
París	308	228	4.130.000	16	1,9	13.409	258.125
Moscú	230	365	6.730.000	14	4,1	29.261	480.714
Beijing	475	807	13.750.000	24	14,9	28.947	572.917
Shanghái	506	802	10.630.000	18	26,7	21.008	590.556
Tokio	282	328	8.700.000	13	3,4	30.851	669.231
Mediana	278	311	3.750.000	12,5	2,9	16.263	338.896

Fuente: Elaboración propia a partir de la memoria anual de cada sistema (2023)

La principal restricción a la capacidad del sistema Metro se ocasiona en sus estaciones, donde la velocidad de transferencia de pasajeros andén-tren-andén impacta directamente en la capacidad de transporte del sistema.

A nivel mundial se pueden categorizar 15 topologías de estación (Shi, 1997), las que se pueden agrupar según configuración de andenes en cuatro tipos (Wang Z., 2006).

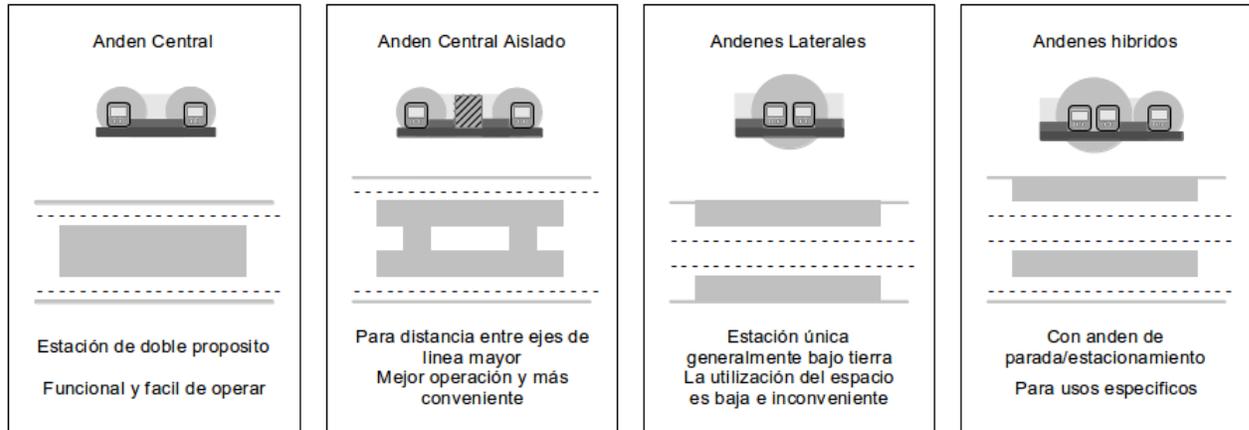


Figura 2 Configuración de plataformas de andenes
Fuente: Elaboración propia sobre estudios de Wang Z. (2006).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar y establecer cómo impacta la topología de la plataforma de andenes en la eficiencia y capacidad de la estación en función de diferentes niveles de demanda y uso.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar y definir las características de diferentes configuraciones de andenes.
- Analizar y modelar el comportamiento de los pasajeros en la plataforma de andenes y cómo estos interactúan con las diferentes áreas e infraestructuras presentes en la estación.
- Formular un modelo de cálculo que permita evaluar y comparar la eficiencia de diferentes configuraciones de plataforma.
- Determinar la relación entre la topología de la plataforma de andenes y el uso de la estación.
- Diseñar un modelo de estación eficiente y modular, capaz de adaptarse a incrementos de demanda de pasajeros en el mediano y largo plazo
- Identificar qué tipo de configuraciones reducen las fricciones y conflictos entre pasajeros

4. METODOLOGÍA

El método de ruta crítica (CPM) es una técnica tradicionalmente utilizada en la gestión de proyectos. En este estudio, adoptamos esta técnica para evaluar el flujo de pasajeros en estaciones de transporte. El algoritmo desarrollado describe el proceso que sigue un pasajero desde su entrada hasta su salida de la estación, considerando todas las decisiones y alternativas que podría enfrentar.

Cada decisión o "arco" que un pasajero puede enfrentar tiene asociada una "carga de restricción", que representa cualquier factor que pueda dificultar o ralentizar su movimiento. Estas restricciones se determinan mediante técnicas de modelación y simulación.

Utilizando el algoritmo de ruta crítica y una matriz de restricciones, hemos creado un índice que mide la eficiencia de diferentes configuraciones de plataformas de andenes, denominado Índice de Eficiencia de Andenes [Æ].

4.1 Simulación

La tarea de obtener soluciones numéricas que clarifiquen el comportamiento interno de la estación y, en consecuencia, determinar su eficiencia operativa y capacidad, nos motiva a aplicar las técnicas avanzadas en modelación de flujos peatonales que incorporan los niveles de servicio establecidos por Fruin (1971) en herramientas de simulación.

Se optó por el simulador *Anylogic* debido a su capacidad para consolidar los métodos actuales de modelación y simulación. Este simulador integra de manera simultánea: simulación basada en agentes, dinámica de sistemas y sistemas de eventos discretos, abarcando niveles macro, meso y microscópicos. Además, facilita la implementación de diagramas de estado, acciones y flujo de procesos.

La utilización de modelos de simulación en estaciones de metro ha sido ampliamente estudiada en la literatura como Wang *et al.* (2015), que se centró en el uso de un modelo de simulación peatonal basado en agentes llamado *CityFlow* para analizar comportamientos peatonales en estaciones de metro. Otro estudio de Wang *et al.* (2018) discute el análisis y optimización de flujo de pasajeros en una estación de tren de alta velocidad utilizando *Anylogic*. Y Li *et al.* (2014) llevaron a cabo un estudio sobre la simulación del flujo de pasajeros en estaciones de metro utilizando *Anylogic*.

En este estudio se llevaron a cabo evaluaciones y simulaciones de tres configuraciones de plataformas de andenes: andenes laterales, andén central y andenes mixtos, tal como se ilustra en la siguiente figura.

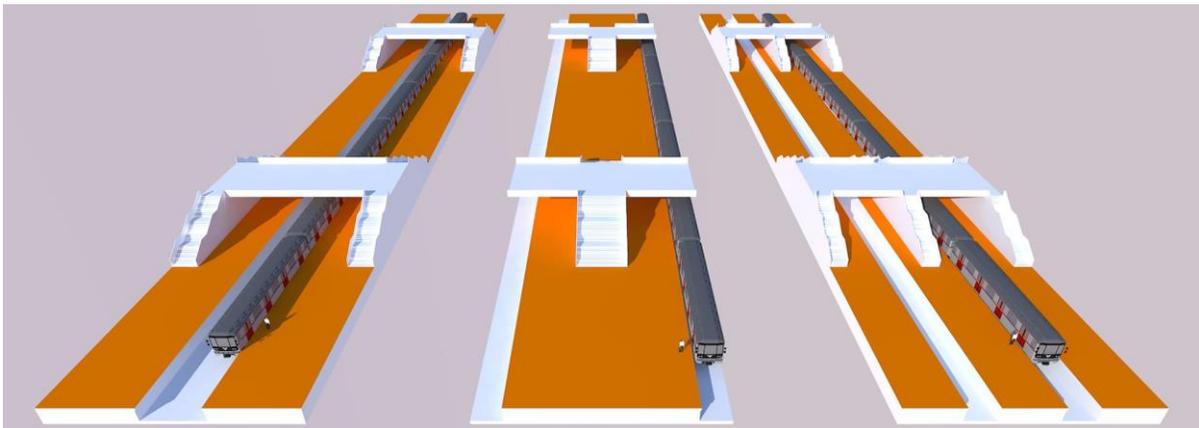


Figura 3 Topologías de plataformas: andenes laterales, andén central y andenes mixtos

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones de áreas utilizadas por andenes y escaleras son exactamente iguales en los 3 tipos de estación y sólo varía su configuración. De esta forma, se evalúa cómo influye la configuración del andén en la capacidad de transferencia de pasajeros en la estación cuando todas las estaciones tienen el mismo ancho de escaleras [e], y de plataformas de andenes [a].

Tabla 2 Características y dimensiones de los andenes a simular y evaluar

Andén	Ejes	Escaleras			Plataformas		
		Cantidad	Ancho	Ancho total	Cantidad	Ancho	Ancho total
	[unid]	[unid]	[m]	[m]	[unid]	[m]	[m]
Central	1	4	e	e	1	a	a
Lateral	2	8	e / 2	e	2	a / 2	a
Mixto	3	12	e / 3	e	3	a / 3	a

Fuente: Elaboración propia

En las siguientes 3 figuras se visualizan estados de simulación bajo un escenario de carga y descarga asimétrica con el andén bajo iguales condiciones de afluencia de pasajeros y operación de trenes.

El **andén central** presentado en la Figura 4 concentra todos los flujos en todos los sentidos en un andén central con contraflujo peatonal pero distribuye sus flujos en un andén de ancho [a], un área mayor permitiendo mejores niveles de servicio y una densidad baja. (Leyenda representa grados de densidad)

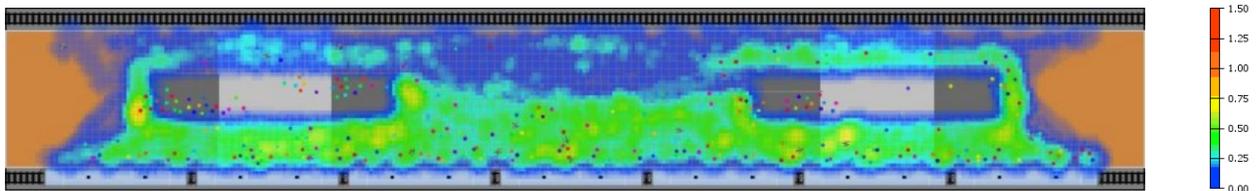


Figura 4 Simulación de Andén central con carga asimétrica | Anylogic

Fuente: Elaboración propia

Los **andenes laterales**, en la Figura 5 distribuyen sus flujos por sentido en 2 andenes de ancho [a/2], al operar en contraflujo peatonal en un área menor, los usuarios se ven entorpecidos en sus movimientos con nivel de densidad alto.

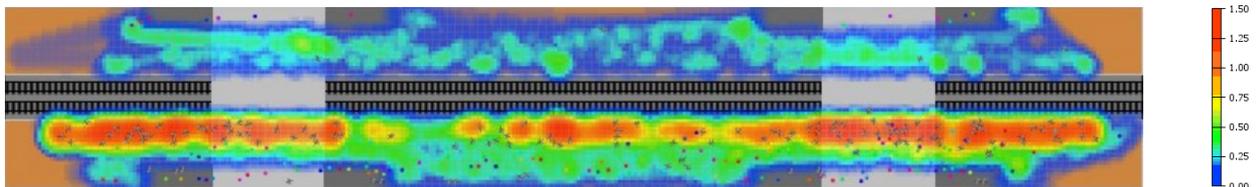


Figura 5 Simulación de Andenes laterales con carga asimétrica | Anylogic

Fuente: Elaboración propia

Los **andenes mixtos**, representados en la Figura 6, distribuyen sus flujos por sentidos en 3 andenes de ancho [a/3] sin contraflujo peatonal porque los usuarios suben por un andén al tren y descienden del tren por el otro andén, esto permite aumentar la velocidad de transferencia al operar con la totalidad de puertas por ambos lados del tren y sin contraflujo, bajando la densidad de usuarios en el andén y aumentando su capacidad.

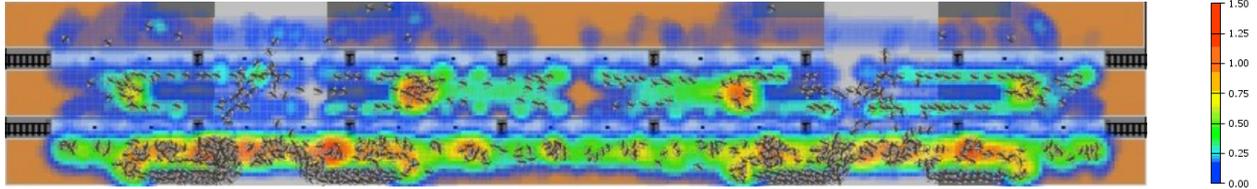


Figura 6 Simulación de Andén mixto con carga asimétrica | Anylogic

Fuente: Elaboración propia

4.2 Algoritmo de ruta crítica

Los resultados de las simulaciones se han incorporado a un algoritmo de ruta crítica que representa todas las acciones a las que se ve expuesto un pasajero/agente según las diferentes configuraciones de andenes y de acceso al tren en [S1] como también la operación inversa de salida de pasajeros en [S2].

4.3 Índice de eficiencia de andenes

El algoritmo de ruta crítica permite evaluar las restricciones secuenciales de una configuración de plataforma de andenes. Cuantificar las restricciones de la ruta crítica permite tener un indicador de restricciones el que se ha llamado *índice de eficiencia de área* [α], el cual corresponde a la sumatoria de todas las restricciones de estado por sus arcos de decisión.

$$\alpha_{(A)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=a}^b A_i(A_{ij}) \quad (1)$$

Donde:

- A_i : representa el ítem de estado i del área A
- A_{ij} : representa al arco de decisión j del estado i del área A
- i : representa al identificador de estado $[1, n]$
- j : representa al identificador de decisión $[a, b]$

Este índice permite cuantificar y evaluar comparativamente diferentes áreas de plataformas de andenes, y de esta forma disponer de una herramienta de evaluación y comparación de eficiencia de áreas de andenes.

El índice α cuantifica restricciones de cada área de la configuración de plataforma, por lo tanto, **mientras menor sea su valor, más eficiente será el área evaluada.**

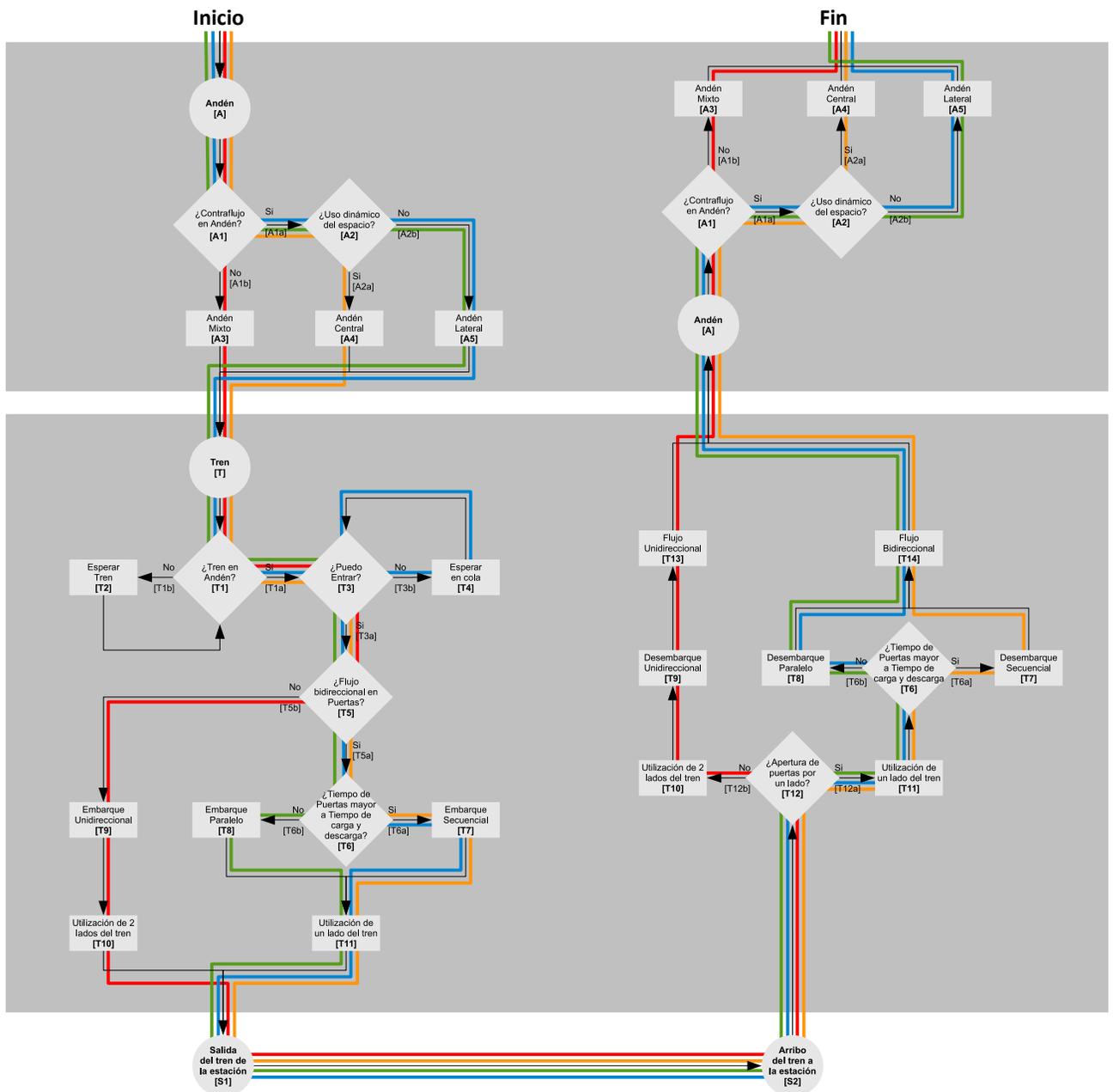


Figura 7 Algoritmo de ruta crítica para Andenes de Metro
Fuente: Elaboración propia

El índice se aplica por áreas de la estación como: corredores $\alpha_{(C)}$, escaleras $\alpha_{(E)}$, andenes $\alpha_{(A)}$ y accesos al tren $\alpha_{(T)}$. Para evaluar el conjunto de la estación, se utiliza el *índice de eficiencia de plataforma de andenes* \mathcal{A} , el cual corresponde a la sumatoria del *índice de eficiencia de área* (1), por un factor φ , que representa el factor de carga del área, sobre la totalidad del sistema. Y se denota de la siguiente forma:

$$\mathcal{A} = \sum_{i=c}^t \varphi_i(\alpha_i) \quad (2)$$

Donde:

- φ_i : representa el factor de carga φ del área i
- α_i : representa al índice de eficiencia α del área i
- i : representa al identificador de área [c, e, a, t]

5. RESULTADOS

A partir de los factores de carga proporcionados por el simulador, el algoritmo de ruta crítica destacó cuatro rutas distintas para cada área. Se determinó el índice de eficiencia de área (1) para cada una de estas rutas críticas, y se elaboraron todas las combinaciones posibles desde el ingreso hasta el abordaje del tren, resultando en un total de 80 combinaciones. Posteriormente, se estimó el índice de eficiencia de plataforma (2) para cada combinación.

Los datos revelan que las 16 combinaciones de plataforma más eficientes se logran con andenes mixtos. Las 32 combinaciones subsecuentes son más eficientes con el andén central, mientras que las 32 combinaciones finales, y menos eficientes, se obtienen con andenes laterales. Sorprendentemente, el andén mixto es casi dos veces más eficiente en todas sus combinaciones en comparación con las otras configuraciones. El andén central supera ligeramente en eficiencia al andén lateral, atribuible en gran medida a su capacidad para aprovechar dinámicamente el espacio. El diseño del andén central es óptimo para maximizar el uso del espacio, especialmente beneficioso en estaciones con flujos asimétricos durante su operación diaria. Esta asimetría se refiere a estaciones que, en ciertas horas del día, operan en una dirección y, en otros momentos, en la dirección opuesta. Esta es una característica común en estaciones situadas en áreas residenciales periféricas o estaciones radiales.

Por otro lado, el andén lateral, al contar con andenes separados físicamente, no permite un uso dinámico del espacio. Esta configuración resulta ineficaz en situaciones de flujo asimétrico, ya que un andén puede estar abarrotado mientras que el otro permanece desocupado. Sin embargo, es ideal para áreas con flujos constantes y simétricos durante el día.

Grados de restricción	Andén mixto	Andén central	Andenes laterales
Mínimo	9,01	22,58	25,03
Máximo	13,98	23,17	25,62
Promedio	12,02	22,88	25,33
Desviación	1,38	0,30	0,30

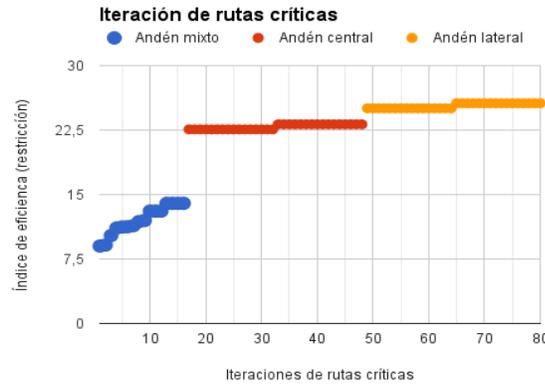


Figura 8 Resultados de la evaluación del índice de eficiencia de andenes

Fuente: Elaboración propia

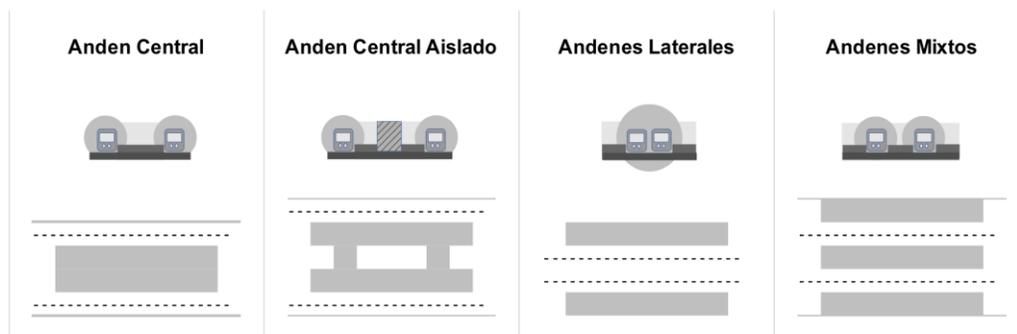
El andén mixto, con una capacidad que duplica a las otras configuraciones, es versátil para cualquier tipo de uso. Su diseño permite un uso dinámico del espacio, transferencias simultáneas en todas las puertas del tren y la adaptabilidad de sus tres andenes según la demanda de pasajeros. Esencialmente, el andén mixto combina las ventajas de un andén central y dos laterales, maximizando los beneficios operativos sin contraflujo. Además, el diseño del andén mixto reduce significativamente el conflicto entre pasajeros al permitir que ingresen por una puerta del tren y salgan por la opuesta. Esta disposición evita enfrentamientos directos entre los pasajeros, minimizando el riesgo de choques y, desde una perspectiva de salud, ayuda a reducir el contagio de gérmenes, como el COVID-19, al evitar el contacto frontal y directo entre las personas.

6. CONCLUSIONES

El núcleo de esta investigación radicó en analizar cómo la topología de la plataforma de andenes afecta directamente la eficiencia y capacidad de las estaciones de Metro. A través de un análisis de las interacciones y relaciones dentro de una plataforma de andenes, se modeló su comportamiento y se evaluó en distintos escenarios. Esta metodología no solo permitió comprender cómo las variables interactúan entre sí, sino también cómo estas interacciones repercuten en la eficiencia y capacidad.

Para cuantificar de manera objetiva la eficiencia y capacidad de una configuración específica, se diseñó una herramienta de evaluación innovadora, el *Índice de Eficiencia de Plataforma de Andenes Æ*. Esta herramienta se convirtió en un instrumento para medir las limitaciones inherentes al diseño de la plataforma y para proponer mejoras.

Este estudio abordó un desafío de la planificación urbana: la limitada capacidad de las herramientas de planificación actuales para anticipar, con precisión, la demanda de pasajeros a largo plazo. Las herramientas desarrolladas en esta investigación sugieren un enfoque alternativo basado en diseño modular de estaciones que se construya por etapas, permitiendo adaptaciones planificadas a las necesidades futuras de demanda garantizando así una respuesta ágil y eficiente a los cambios en la demanda.



Andén	Central en Isla	Central en Isla separada	Laterales	Central y Laterales
Espacio peatonal	Común ambas direcciones	Separado ambas direcciones	Separado ambas direcciones	Separado ambas direcciones
Uso dinámico del espacio	Si	No	No	Si, con alternancia de andenes
Contraflujo anden-tren	Contraflujo	Contraflujo	Contraflujo	Sin contraflujo en anden
Contraflujo andén-accesos	Contraflujo	Contraflujo	Contraflujo	Sin contraflujo en accesos
Escaleras				
Ejes	Uno 1	Uno 1	Dos 2	Tres 3
Contraflujo de sentido	Contraflujo	Contraflujo	Contraflujo	Sin contraflujo en escaleras
Con alto flujo peatonal	Ineficiente	ineficiente	Eficiente	Eficiente
Puertas de Tren				
Apertura de puertas	Un costado	Un costado	Un costado	Ambos costados
Contraflujo en puertas	Contraflujo	Contraflujo	Contraflujo	Sin contraflujo
Capacidad de puertas	50%	50%	50%	100%
Tiempo de apertura	Mayor	Mayor	Mayor	Menor
Ascensor				
Uso normal	Uso común ambos lados 1	Uso común ambos lados 1	Uso particular para cada lado 2	Uso particular para cada lado 3
Uso mínimo	Uso común ambos lados 1	Uso común ambos lados 1	Uso particular para cada lado 2	Uso común ambos lados 1
Contraflujo (op. normal)	Contraflujo en ascensor	Contraflujo en ascensor	Contraflujo en ascensor	Sin contraflujo en ascensor
Flujo Peatonal en andén				
Alto flujo unidireccional	Contraflujo	Contraflujo	Contraflujo	Sin contraflujo
Alto flujo bidireccional	Eficiente	Ineficiente	Ineficiente	Eficiente
Espacio / Densidad	Ineficiente	Eficiente	Eficiente	Eficiente
Escalamiento de capacidad				
Posibilidad de crecimiento	Si	Si	No	No
Upgrade posible a:	Andén Mixto	Andén Mixto	No	No
Downgrade posible a:	No	No	No	Andén central

Figura 9 Resumen de características de diferentes topologías de andenes

Fuente: Elaboración propia

6.1 Topología y Capacidad

La capacidad de la red de Metro está intrínsecamente ligada a la velocidad de operación. Las estaciones, siendo puntos neurálgicos, determinan en gran medida esta velocidad. Por lo tanto, la eficiencia con la que opera cada estación individual tiene un impacto directo en la capacidad global de la red. Las estaciones de transferencia, en particular, suelen ser puntos críticos que requieren especial atención. Una mejora en la eficiencia de una estación no solo optimiza su operación, sino que también reduce los tiempos de detención del tren, incrementa la velocidad promedio y, en consecuencia, potencia la capacidad de transporte de la red.

Un error común es asociar eficiencia con tamaño. Sin embargo, estaciones excesivamente amplias pueden ser contraproducentes, ya que obligan a los pasajeros a recorrer distancias más largas, aumentando su tiempo en la estación y reduciendo la eficiencia operativa.

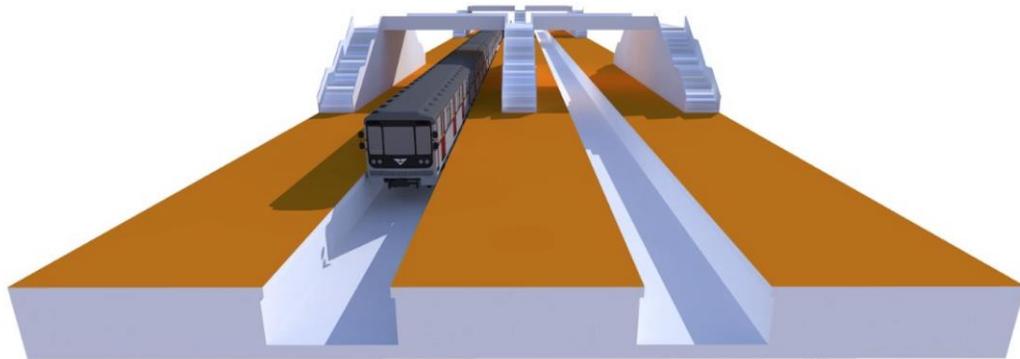


Figura 10 Andenes mixtos

Fuente: Elaboración propia

6.2 Topología y Uso

El entorno y posición de una estación en la red de Metro son factores determinantes en su comportamiento interno. Las estaciones en líneas radiales, asociadas a zonas residenciales, laborales o educativas, suelen tener flujos asimétricos. En contextos de flujo asimétrico, la estación de andén central es más eficiente. Por otro lado, en flujos simétricos, la estación de andenes laterales prevalece. Las estaciones con flujos simétricos suelen estar en zonas céntricas, mientras que las asimétricas en líneas radiales.

6.3 Topología y Diseño Constructivo

Modificar una estación de Metro en funcionamiento es complejo, ya que las construcciones pueden afectar la operación y la integridad estructural (Liu *et al*, 2010). Se sugiere un diseño modular de estaciones que permita expansiones conforme crece la demanda. Una estación genérica modular puede evolucionar a una de alta capacidad o transferencia cuando sea necesario.

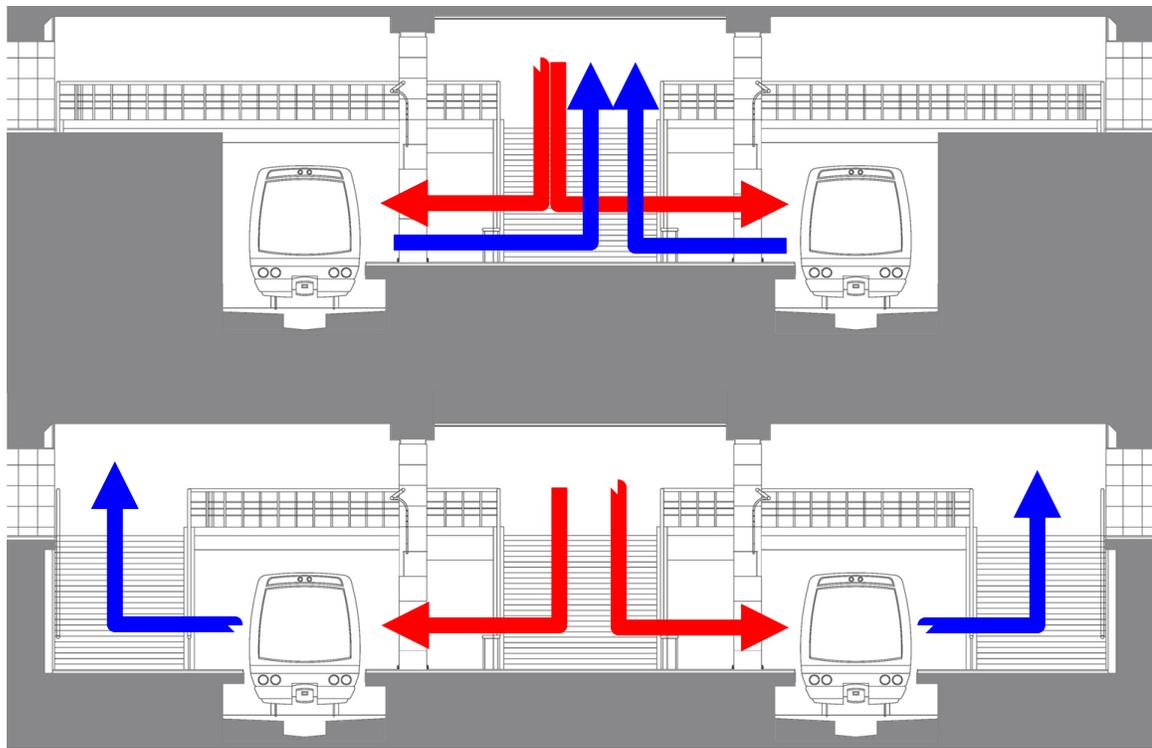


Figura 11 Estación modular de construcción en dos fases con rutas de circulación peatonal
Fase 1: andén central (superior), Fase 2: andén mixto (inferior).

Fuente: Elaboración propia

La investigación pone énfasis en la importancia de la topología de las estaciones de Metro en su eficiencia y capacidad. Un diseño modular y adaptable es una alternativa para responder a las cambiantes demandas de pasajeros. Las estaciones de andén mixto, en particular, ofrecen una solución versátil y eficiente, capaz de adaptarse a flujos tanto simétricos como asimétricos especialmente en estaciones de combinación.

Es imperativo que las autoridades y planificadores urbanos consideren estos hallazgos al diseñar o modificar estaciones de Metro. Adoptar un enfoque modular y centrarse en la eficiencia operativa puede garantizar que las redes de Metro estén preparadas para enfrentar los desafíos del futuro, garantizando un transporte público eficiente y confiable para todos.

REFERENCIAS

Adam, D. y Markiewicz, R. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique* **59**, 229-236.

Alawad, H. y Kaewunruen, S. (2018). Wireless sensor networks: toward smarter railway stations. *Infrastructures* **3**, 24.

Alawad, H., An, M. y Kaewunruen, S. (2020). Utilizing an adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) for overcrowding level risk assessment in railway stations. *Applied Sciences* **10**, 5156.

BUEDRI - Beijing Urban Engineering Design Research Institute (2003). Code for Design of Metro (GB50157-2003). China planning press.

Cheng, H. y Yang, X. (2012). Emergency Evacuation Capacity of Subway Stations. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* **43**, 339-348.

Fruin, J. (1971). Pedestrian Planning and Design. Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York.

Hui, L. (2008). Case Analysis on Platform Design of Urban Rail Transit System. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* **8**, 167-173.

Li, W. y Zhou, J. (2013). The Optimize Management of Passenger Organization in Transfer Station Based on Dynamic Passenger Flow Analysis. *Procedia Social and Behavioral Sciences* **96**, 1322-1328.

Li, Y., Sun, X., Feng, X., Wang, C. y Li, J. (2012). Study on Evacuation in Subway Transfer Station Fire by STEPS. *Procedia Engineering* **45**, 735-740.

Liu, H., Li, L., Wang, C. y Wei, H. (2010). Design and deformation control of excavation support project close to a subway station. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* **34**, 654-658.

López, A. (2015). Optimización del diseño de estaciones de Metro mediante el estudio, modelación y simulación de diferentes topologías de plataformas de andenes. Tesis de pregrado Universidad Tecnológica Metropolitana.

Nai, W., Dong, D., Chen, S., Zheng, W. y Yang, W. (2012). Optimizing the Usage of walking Facilities between Platform and Concourse Layer in L-Shaped Interchange Metro Station. *Procedia-Social and Behavioral Sciences* **43**, 748-757.

NFPA (2014). NFPA 130 Standard for Fixed Guideway Transit Systems. National Fire Protection Association.

Seriani, S. y Fernandez, R. (2015). Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations. *Transportation research part C: emerging technologies* **53**, 76-92.

Seriani, S., Fernandez, R., Luangboriboon, N. y Fujiyama, T. (2019). Exploring the effect of boarding and alighting ratio on passengers' behaviour at metro stations by laboratory experiments. *Journal of Advanced Transportation* **2019**, 1-12.

Shi, Z.H. (1997). 地下铁道设计与施工 [Diseño y Construcción de Ferrocarriles Subterráneos]. Shaanxi Science and Technology Press. ISBN 978-7-5369-2584-7.

TRB (2013). Station Capacity Transit Capacity and Quality of Service Manual. Third Edition Transportation Research Board. National Research Council, Washington D.C.

-
- Wang, L.H. (2008). Subway station platform design. *Northern Jiaotong* **4**, 220-222.
- Wang, S.W., Sun, L.S., Rong, J. y Yang, Z.F. (2013). Transit Station Congestion Index Research Based on Pedestrian Simulation and Gray Clustering Evaluation. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, **2013**, 1-9.
- Wang, Z. (2006). Selection of Architectural and Structural Types of Hujialou Station on N° 10 Line of Beijing Metro. *Tunnel Construction* **26**, 22-26.
- Wang, Z., Chen, F. y Li, X. (2012a). Comparative analysis and pedestrian simulation evaluation on emergency evacuation test methods for urban rail transit stations. *PROMET Traffic y Transportation* **24**, 535-542.
- Wang, Z., Chen, F. y Li, X. (2012b). Modification and Pedestrian Simulation or Platform width Calculation method of urban rail transit. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* **12**, 168-173.
- Xu, J. (2009). Architectural design Analysis of Separated Island-type Metro Station. *Tunnel Construction* **29**, 290-294.
- Xu, X.Y., Liu, J., Li, H.Y. y Zhou, Y.F. (2013). Probabilistic model for remain passenger queues at subway station platform. *Journal of Central South University* **20**, 837-844.
- Yao, L., Sun, L., Wang, W. y Xiong, H. (2012). Adaptability Analysis of Service Facilities in Transfer Subway Stations. *Mathematical Problems in Engineering*, **2012**, 1-13.
- Zhang, Q., Han, B. y Li, D. (2008). Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* **16**, 635-649.