



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA REDUCIR LA CONGESTIÓN EN EL STC: EL CASO  
DE LA ESTACIÓN GUERRERO.

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
L.A.I. LAURA PATRICIA AVILA CALLEJAS

TUTORA PRINCIPAL  
DRA. AIDA HUERTA BARRIENTOS, FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, JUNIO 2019.

Presidente: Dr. Eugenio Mario López Ortega

Secretario: Mtra. Francisca Irene Soler Anguiano

Vocal: Dra. Aida Huerta Barrientos

1 er. Suplente: Dr. Wulfrano Gómez Gallardo

2 d o. Suplente: Dr. Manuel Del Moral Dávila

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, UNAM.

TUTORA DE TESIS:

Dra. Aida Huerta Barrientos

-----  
FIRMA

## **Agradecimientos**

*Agradezco profundamente a la Doctora Aída Huerta, por su paciencia, apoyo y profesionalismo con el que me ha guiado durante mi estancia en la Maestría.*

*A mis sinodales, Dr. Eugenio Mario López Ortega, Mtra. Francisca Irene Soler Anguiano, Dra. Aida Huerta Barrientos, Dr. Wulfrano Gómez Gallardo y al Dr. Manuel Del Moral Dávila, por otorgarme sus comentarios objetivos para la mejora de esta tesis.*

*A mi madre y familia que me cuidaron, me inculcaron valores y brindaron consejos para formarme y guiarme hasta el día de hoy.*

*A mis amigos y amigas que me acompañaron, me motivaron y estuvieron a pendiente durante esta etapa.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Posgrado de Ingeniería, por la oportunidad que me permitió continuar con mi estudios de posgrado.*

*A COMECyT, por brindarme el apoyo económico que me permitió permanecer y concluir en el programa de maestría.*

*Al Sistema de Transporte Colectivo (STC), al Comité Organizador del Quinto Premio a la Innovación “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza”, y en especial al Ing. Agustín G. Patiño Acencio, Mtro. Héctor Pérez González y al Ing. José Antonio Barajas, por alentar con su aprobación y apoyo para dar inicio al proyecto así como su acompañamiento para la validación del modelo de Simulación.*

## **Resumen**

A nivel internacional el sistema ferroviario ha sido un transporte con múltiples ventajas, ya que propicia el desarrollo económico-social por sus distinguidas características de capacidad, velocidad y vías exclusivas para su operación. Tiene como propósito desarrollar un modelo de simulación que contribuya al entendimiento de la dinámica del flujo de pasajeros teniendo en cuenta su seguridad para reducir la congestión en zonas. A través de la Modelación y Simulación Basada en Agentes, se ha caracterizado la estación Guerrero y configurando su lógica con base a datos reales que fueron recopilados durante una serie de vistas técnicas a la estación en hora pico (de 08:00 a 09:00 horas) de lunes a viernes (días laborables). Fueron diseñados tres escenarios alternativos, con el propósito de disminuir los puntos de congestión para mejorar la afluencia de los usuarios durante la transferencia de la Línea B hacia la Línea 3 con dirección Universidad. Se realizan algunas sugerencias que buscan promover la seguridad e integridad de los usuarios incluso los más vulnerables.

Palabras clave: transporte, estación Guerrero, transferencia de pasajeros, Simulación.

## **Abstract**

At the international level, the railway system has been a transport with multiple advantages, since it encourages economic and social development due to its distinguished characteristics of capacity, speed and exclusive routes for its operation. Its purpose is to develop a simulation model that contributes to the understanding of the dynamics of passenger flow taking into account its safety to reduce congestion in areas. Through Modeling and Agent-based Simulation, the Guerrero station has been characterized and its logic configured based on real data that were collected during a series of technical visits to the station during peak hours (08:00 to 09:00 hours) from Monday to Friday (working days). Three alternative scenarios were designed, with the purpose of reducing congestion points to improve the flow of users during the transfer of Line B to Line 3 with University address. Some suggestions are made that seek to promote the safety and integrity of users, even the most vulnerable.

Key words: transport, Guerrero station, transfer passenger, simulation.

# Tabla de Contenido

Lista de Tablas .....	7
Lista de Gráficas .....	8
Lista de Ilustraciones.....	8
Introducción.....	12
Capítulo 1. El Transporte Ferroviario: antecedentes y marco teórico.....	14
1.1 Sistema de transporte ferroviario.....	14
1.2 La movilidad en la Zona Metropolitana y Valle de México (ZMVM).....	15
1.3 El Sistema de Transporte Colectivo (STC). .....	18
1.3.1. Tipo de estaciones en el STC. ....	21
1.3.2. Visita técnica al STC. ....	22
1.4. El problema por resolver.....	79
1.5. El objetivo general .....	80
1.6. Los objetivos específicos.....	80
Capítulo 2. La Revisión de la Literatura y Marco Teórico .....	81
2.1. Sistema de transporte.....	81
2.1.1. Elementos principales de un sistema de transporte. ....	84
2.1.2. Componentes de la red de transporte.....	85
2.1.4 La transferencia de pasajeros en el sistema ferroviario.....	88
2.2. Concepto de sistema y tipos de sistema. ....	91
2.2.1 El estudio del sistema y los tipos de modelos.....	92
2.3 Simulación .....	93
2.3.1. Simulación de Eventos Discretos.....	94
2.3.2. Modelación y Simulación Basada en Agentes.....	95

2.3.3. Modelación Híbrida .....	96
2.4 La revisión de la literatura.....	97
Capítulo 3. Un Modelo de Simulación de la Estación Guerrero .....	104
3.1. Construcción del modelo de simulación de la estación Guerrero.....	105
3.1.1. Etapa 1. Pregunta base .....	105
3.1.2. Etapa 2. Desarrollo del Modelo Conceptual (DEMO) .....	106
3.1.3. Etapa 3. Simulación del Modelo (SIMO).....	119
3.1.4. Etapa 4. Análisis del Modelo de Simulación (AMSI).....	129
3.1.4.1. La verificación del modelo de simulación.....	129
3.1.4.2. La validación del modelo de simulación.....	129
3.1.4.3. Construcción de escenarios alternos. ....	131
Capítulo 4 La Propuesta de Solución.....	140
Conclusiones.....	143
Referencias .....	144

## Lista de Tablas

Tabla 1 Tipos de Transporte en la ZMVM y su demanda diaria. ....	15
Tabla 2 Modo de transporte público de la ZMVM y su demanda diaria .....	16
Tabla 3 Revisión de la Literatura.....	99
Tabla 4 Entradas y salidas de la estación Guerrero_Línea B_Torniquetes .....	112
Tabla 5 Entradas y salidas en la estación Guerrero_Línea 3_Torniquetes_Dir. Indios Verdes .....	112
Tabla 6 Entradas y salidas en la estación Guerrero_Línea 3_Torniquetes_Dir. Universidad .....	113
Tabla 7 Distribución del flujo de pasajeros_Línea B .....	113

Tabla 8 Distribución del flujo de pasajeros_Línea 3_Dir. Indios Verdes .....	114
Tabla 9 Distribución del flujo de pasajeros en Línea 3_Dir. Universidad .....	114

## **Lista de Gráficas**

Gráfica 1 Uso de los tipos de transporte en la ZMVM.....	16
Gráfica 2 Uso de los modos de transporte público en la ZMVM (2017).....	17
Gráfica 3 Distribución ajustada de los datos_Línea B.....	116
Gráfica 4 Distribución ajustada de los datos_Línea 3_Dir. Indios Verdes. ....	117
Gráfica 5 Distribución ajustada de los datos_Línea 3_Dir. Universidad. ....	119
Gráfica 6 Histograma: Tiempo en sistema_Escenario 1 .....	132
Gráfica 7 Tiempo en Sistema_Escenario 1 .....	133
Gráfica 8 Histograma_Tiempo en Sistema_Escenario 2 .....	135
Gráfica 9 Tiempo en Sistema_Escenario 2.....	135
Gráfica 10 Histograma_Tiempo en Sistema_Escenario 3. ....	138
Gráfica 11Tiempo en Sistema_Escenario 3.....	138

## **Lista de Ilustraciones**

Ilustración 1 Red del Sistema de Transporte Colectivo .....	18
Ilustración 2 Misión del STC.....	19
Ilustración 3 Visión del STC .....	19
Ilustración 4 Comparativo de la demanda del STC.....	21
Ilustración 5 Tipo de estaciones en el STC.....	22
Ilustración 6 Estación Pantitlán_Señalización en pared.....	23
Ilustración 7 Estación Pantitlán_Señalización en piso. ....	24
Ilustración 8 Estación Pantitlán_Mecanismo para la dosificación de flujo .....	25
Ilustración 9 Estación Pantitlán_División de carriles. ....	26
Ilustración 10 Estación Pantitlán_División de carriles en escaleras.....	27

Ilustración 11 Estación Pantitlán_Objetos en el pasillo de transferencia. ....	28
Ilustración 12 Estación Pantitlán_Objetos en escaleras. ....	29
Ilustración 13 Estación Pantitlán_Usuario con equipaje. ....	30
Ilustración 14 Estación Pantitlán_Usuario transportado objeto voluminoso.....	31
Ilustración 15 Estación Pantitlán_Comercio en pasillo de transferencia.....	32
Ilustración 16 Estación Pantitlán_Establecimientos comerciales.....	33
Ilustración 17 Estación Pantitlán_Comerciantes a pie de escaleras.....	34
Ilustración 18 Estación Chabacano_Andén de descenso y escaleras de salida. ...	35
Ilustración 19 Estación Chabacano_Torniquetes en las escaleras de salida. ....	36
Ilustración 20 Estación Chabacano_Señalización en techo.....	37
Ilustración 21 Estación Chabacano_Señalización de dirección. ....	38
Ilustración 22 Estación Chabacano_Señalización en pared. ....	39
Ilustración 23 Estación Chabacano_Señalización en el contrapaso.....	40
Ilustración 24 Estación Chabacano_ “Circule por la derecha”. ....	41
Ilustración 25 Estación Chabacano_Usuario transportando objeto voluminoso. ...	42
Ilustración 26 Estación Chabacano_Distracción en zona de comercios.....	43
Ilustración 27 Estación Chabacano_Señalización y pasillo usuario detenido.....	44
Ilustración 28 Estación Chabacano_Comercio informal en escaleras. ....	45
Ilustración 29 Estación Chabacano_Comercio informal en pasillo. ....	46
Ilustración 30 Estación Zapata_Pasillo de Línea 12 a Línea 3. ....	47
Ilustración 31 Estación Zapata_Escaleras de Línea 12 a Línea 3. ....	48
Ilustración 32 Estación Zapata_Escaleras de Línea 3 a Línea 12. ....	49
Ilustración 33 Estación Zapata_Pasillo de Transferencia. ....	50
Ilustración 34 Estación Zapata_Acceso estrecho a escaleras. ....	51
Ilustración 35 Estación Zapata_Escaleras línea 3 .....	52
Ilustración 36 Estación Zapata_Escaleras línea 3. ....	53
Ilustración 37 Estación Zapata_Usuarios detenidos en escaleras.....	54
Ilustración 38 Estación Zapata_Congestión de usuarios en las escaleras .....	55
Ilustración 39 Estación Zapata_Usuarios distraídos por las caricaturas.....	56
Ilustración 40 Estación Guerrero_Flujo definido para la hora pico.....	57
Ilustración 41 Estación Guerrero_Pasillo de conexión entre línea 3 y línea B.....	58

Ilustración 42 Estación Guerrero_Carriles delimitados. ....	59
Ilustración 43 Estación Guerrero_Carriles delimitados temporalmente. ....	60
Ilustración 44 Estación Guerrero_Rampa en la sección de transferencia. ....	61
Ilustración 45 Estación Guerrero_Señalización en piso.....	62
Ilustración 46 Estación Guerrero_Escaleras Eléctricas. ....	63
Ilustración 47 Estación Guerrero_Personal de apoyo en andén.....	64
Ilustración 48 Estación Guerrero_Congestión de usuarios en el andén. ....	65
Ilustración 49 Estación Guerrero_Usuarios transportando mochilas y bolsos. ....	66
Ilustración 50 Estación Guerrero_Usuario con objeto voluminoso.....	67
Ilustración 51 Estación Guerrero_Usuario con cubeta.....	68
Ilustración 52 Estación Guerrero_Usuario leyendo señalizaciones. ....	69
Ilustración 53 Estación Guerrero_Usuario con muletas. ....	70
Ilustración 54 Estación Guerrero_Usuario con muletas. ....	71
Ilustración 55 Estación Guerrero_Usuario con silla de ruedas. ....	72
Ilustración 56 Estación Guerrero_Usuarios con discapacidad visual.....	73
Ilustración 57 Estación Guerrero_Módulos comerciales. ....	74
Ilustración 58 Estación Guerrero_Comercio a pie de escaleras. ....	75
Ilustración 59 Estación Guerrero_Usuaría detenida en comercio. ....	76
Ilustración 60 Estación Guerrero_Personas sentadas en escaleras.....	77
Ilustración 61 Estación Guerrero_Comerciantes en pasillo de transferencia.....	78
Ilustración 62 Matriz FODA_Estación Guerrero .....	79
Ilustración 63. La Geografía del Transporte.....	82
Ilustración 64 Sistema de transporte.....	83
Ilustración 65 Componentes básicos de un sistema de transporte.....	85
Ilustración 66 Componente en la estructura de una red de transporte. ....	86
Ilustración 67 Separación física entre las terminales de transporte.....	87
Ilustración 68 Los retos más comunes de los sistemas de transporte.....	89
Ilustración 69 La revisión de la literatura.....	97
Ilustración 70 Material recuperado .....	98
Ilustración 71 Selección del Material recuperado.....	98
Ilustración 72 Estaciones y terminales de la red del STC. ....	106

Ilustración 73 Abstracción del sistema (Estación Guerrero) .....	107
Ilustración 74 Flujograma de una estación con correspondencia. ....	108
Ilustración 75 Dirección de flujo y puntos de congestión .....	109
Ilustración 76 Puntos de recolección de datos.....	111
Ilustración 77 Velocidad de desplazamiento de los usuarios.....	115
Ilustración 78 Prueba de bondad de ajuste_Línea B_Torniquetes. ....	116
Ilustración 79 Prueba de bondad de ajuste_Línea 3_Dir. Indios Verdes. ....	117
Ilustración 80 Prueba de bondad de ajuste_Línea 3_Dir. Universidad. ....	118
Ilustración 81 Librería “Predestrian” de Anylogic™. a) SpaceMarkup, b) Blocks. ....	120
Ilustración 82 Librerías “Rail” y “Process”. ....	122
Ilustración 83 Plano de la estación Guerrero .....	124
Ilustración 84 Lógica de la estación Guerrero.....	125
Ilustración 85 Lógica de trenes. ....	126
Ilustración 86 Estación Guerrero, entrada por torniquetes. Vista 3D.....	127
Ilustración 87 Zono de transferencia de Línea B a Línea 3. Vista 3D.....	128
Ilustración 88 Estación Guerrero, Línea 3. Vista 3D .....	128
Ilustración 89 Verificación del modelo de simulación.....	129
Ilustración 90 Evidencia de validación del modelo de simulación.....	130
Ilustración 91 Mapa de Calor y Vista 2 D_Escenario 1.....	133
Ilustración 92 Mapa de calor y Vista 2D_Escenario 2.....	136
Ilustración 93 Mapa de Calor y Vista 2 D_Escenario 3.....	139
Ilustración 94 Estación Guerrero_Escenario 1. Vista 3D.....	141

## Introducción

El sistema ferroviario desde su inicio se ha constituido como un sistema de transporte eficiente, por la capacidad y velocidad. Ha sido un factor elemental para coadyuvar al desarrollo urbano ofreciendo un servicio de transporte de personas y/o mercancías. A nivel internacional el sistema ferroviario ha sido un transporte con múltiples ventajas, ya que además de ayudar al desarrollo se ha posicionado como uno de los principales modos de transporte para a nivel local o como medio para conectar más de dos ciudades.

Algunos expertos lo han considerado como un sistema parcialmente cerrado, debido a que las vías que utiliza para el desplazamiento son exclusivas del tren, esta característica se ha considerado como una ventaja, sin embargo, algunos autores también han reconocido que puede ser una desventaja ante algún percance que obstruya las vías ya que no tiene vías alternas para evitar que su operación se detenga. Este tipo de transporte también se caracteriza por tener estaciones fijas, donde puede realizar el ascenso y descenso de pasajeros y/o mercancías por lo que podría representar una ventaja ya que son conocidas las ubicaciones. La demanda superior a la esperada puede ocasionar estragos porque resulta un reto adaptar los recursos del sistema para un exceso de demanda.

Para los sistemas ferroviarios, es un gran reto mantener una operación en un nivel estándar (de acuerdo con la demanda esperada) cuando la demanda se incrementa debido a sus limitaciones físicas que lo caracterizan. Es por ello que los investigadores se han ocupado de estudiar este tipo de transporte, con la premisa de optimizar la operación del transporte. Aunque existen diversos estudios de talla internacional, es más común encontrar estudios publicados de investigadores del medio oriente que tratan desde la programación de trenes hasta el estudio de la demanda de usuarios y los viajes que realizan los usuarios considerando la transferencia.

En la Ciudad de México dentro de los principales transportes se encuentra el Sistema de Transporte Colectivo (STC) también conocido como “metro” por su

apócope de “Transporte Ferroviario Metropolitano”, cuenta con 12 líneas y un total de 195 estaciones, de las cuales 60 se caracterizan por tener correspondencia con otras líneas. Las estaciones de transferencia son puntos de la red donde convergen dos, tres y hasta cuatro líneas. Se realizaron visitas técnicas a las estaciones Patitlán, Chabacano, Zapata y Guerrero, para conocer las características y elementos importantes dentro de las estaciones de transferencia en el STC.

Derivado de las visitas técnicas, se observaron deficiencias que impiden un adecuado flujo de los usuarios dentro de las estaciones de transferencia, ya sea por falta de señalización, infraestructura limitada, la alta demanda, comercios que invaden el espacio para transitar en los pasillos o usuarios distraídos se ve afectado el flujo dentro de las instalaciones del STC, y en ocasiones poniendo en riesgo la integridad de los usuarios ya que se ocasionan colisiones constantes (por la congestión de pasajeros) en algunos puntos críticos (cuellos de botella).

Por lo anterior, el objetivo de esta tesis es desarrollar un modelo de simulación que contribuya al entendimiento de la dinámica del flujo de pasajeros teniendo en cuenta su seguridad para reducir la congestión en zonas críticas de la estación Guerrero del STC.

Se ha elaborado la construcción de un Modelo de simulación que apoye la toma de decisión del equipo de operación de la estación Guerrero, en el que se pueda apreciar el efecto que puede causar un cambio en alguna zona o pasillo de la estación, antes de realizar una intervención en el sistema real para la organización y distribución de flujos dentro de la estación de transferencia (estación Guerrero).

Esta tesis comprende cuatro capítulos, en el capítulo uno se retoman algunas características e importancia de sistema de transporte ferroviario, el capítulo dos comprende algunos conceptos básico del transporte y del sistema de transporte ferroviario, así como, las bases teóricas de la simulación. El capítulo dos contiene un marco teórico del sistema de transporte ferroviario, la revisión de la literatura efectuada del 2018 al 2019, y la metodología de MoSASCoM. El capítulo tres contiene el desarrollo del modelo de simulación. En el capítulo cuatro se listan una serie de propuestas a tomar en cuenta durante la implementación de la propuesta de mejora.

# **Capítulo 1. El Transporte Ferroviario: antecedentes y marco teórico.**

## **1.1 Sistema de transporte ferroviario.**

El transporte ferroviario se refiere al movimiento de vehículos en las guías (rieles, monorraíles y trenes de levitación magnética), (Rodrigue, 2017). Este medio de transporte fue desarrollado para mejorar la eficiencia en el traslado de materiales/mercancías, sin embargo, fue en Inglaterra en el año 1825, cuando por primera vez se apertura para el traslado de pasajeros.

Por un lado, este tipo de transporte favorece el movimiento de mercancías acercándolas hacia la demanda, por otro lado, facilita el traslado de las personas. Gracias a sus ventajas y evolución desde hace más de dos siglos, el transporte ferroviario ha logrado mejorar la capacidad y la velocidad, lo que a su vez se refleja en una diferencia en el servicio que ofrecen, convirtiéndolo en un sistema de transporte atractivo y competitivo.

La importancia del transporte ferroviario recae en el desarrollo económico-social, a lo largo de su historia ha sido un factor importante para promover el desarrollo económico. La mayor parte de los cambios tecnológicos del transporte terrestre se han logrado cambios significativos en el movimiento de pasajeros y de mercancías. Dentro de los cambios más relevantes se puede mencionar el tiempo de viaje, así como la posibilidad de ofrecer horarios confiables y consistentes que podrían incluirse en la planificación de actividades económicas como la producción y distribución (Rodrigue, 2017).

Con el propósito de conocer las cifras de los viajes, es necesario recurrir al recurso especializado que nos ofrece el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) organismo público responsable del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, y de los Censos que se realizan a Nivel Nacional.

## 1.2 La movilidad en la Zona Metropolitana y Valle de México (ZMVM).

Con el propósito de obtener información actualizada de la movilidad en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), se recurrió a la “Encuesta de Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017”, realizado por el INEGI en conjunto con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se llevó a cabo con el propósito conocer la movilidad y las características de los viajes de los residentes de la ZMVM mayores a 6 años. Dentro de las características se consideró, la cantidad de viajes en un día entre semana, la población, los modos de transporte, horas de mayor afluencia, motivo de viaje, modo de transporte empleado, tiempo y costo de transportación. Tuvo una cobertura de 194 distritos, 86 de la CDMX, 108 del Estado de México y uno de Hidalgo.

Con base en la información obtenida de la encuesta del 2017, considerando un día laborable entre semana (martes, miércoles o jueves), en la Ciudad de México y en los Municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca 11.44 millones de personas realizan viajes (ver Tabla 1).

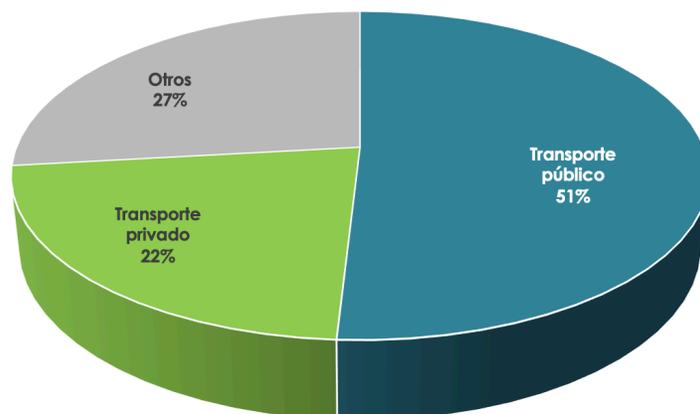
Tabla 1 Tipos de Transporte en la ZMVM y su demanda diaria.  
Fuente: Elaboración Propia con información del INEGI, (2018).

Tipo de transporte	Ciudad de México	Municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca	ZMVM
	Millones de personas		
Transporte público	3.71	4.25	7.96
Transporte privado	1.75	1.73	3.48

Considerando el total de la muestra, más de 50% de los residentes de la ZMVM hacen uso del transporte público para trasladarse y llevar a cabo sus actividades, como por ejemplo estudiar, trabajar, ocio o simplemente llegar al hogar; mientras

que el transporte privado solo es utilizado por el 22% y el 27 % indicaron Otros tipos de transporte en los que se incluye caminar en la calle, bicicleta y otros no especificados (ver Gráfica 1).

**USO DE LOS TIPOS DE TRANSPORTE EN LA ZMVM (2017)**



Gráfica 1 Uso de los tipos de transporte en la ZMVM  
Fuente: Elaboración propia con información del INEGI, (2018)

Dentro del tipo de transporte público, en la encuesta se recolectaron datos de los modos de transporte empleados, entre estos se listan el transporte colectivo, el metro, taxi, otro transporte público y Metrobús o Mexibús; en la Tabla 2, se muestra las cifras en Millones de personas para la Ciudad de México y los Municipios conurbados del Estado de México y Tizayuca.

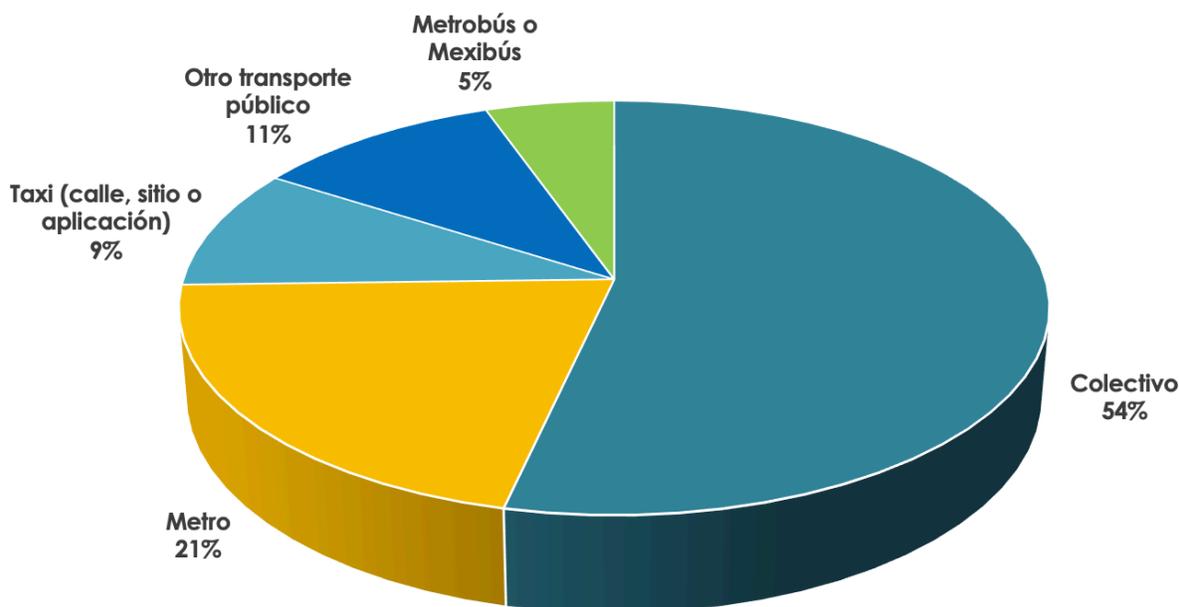
Tabla 2 Modo de transporte público de la ZMVM y su demanda diaria  
Fuente: Elaboración propia con información del INEGI, (2018).

Modo de transporte público	Municipios	
	Ciudad de México	conurbados del Estado de México y Tizayuca
	Millones de personas	
Colectivo	2.55	3.55
Metro	1.33	1.05

Taxi (calle, sitio o aplicación)	0.59	0.48
Otro transporte público	0.58	0.62
Metrobús o Mexibús	0.35	0.27

De acuerdo con la cifras que se obtuvieron, del 100% de los viajes que realizan en la ZMVM, el transporte colectivo es el más concurrido con un 54%, mientras que el metro queda en segundo lugar con un 21% de los viajes que se realizan en la ZMVM con 2.38 millones de personas, sin embargo en este punto vale la pena retomar algunos puntos importantes que se mencionan en la encuestas como, que los usuarios pueden utilizar más de un modo de transporte, también es importante recordar que la cifras solo representan solo una muestra de la población de los usuarios que utilizan el STC (ver Gráfica2).

### USO DE LOS MODOS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN LA ZMVM (2017)



Gráfica 2 Uso de los modos de transporte público en la ZMVM (2017).  
Fuente: Elaboración propia con información del INEGI, (2018).

### 1.3 El Sistema de Transporte Colectivo (STC).

Sistema de Transporte Colectivo (STC), mejor conocido como “Metro” por su abreviación de “Metropolitano” que se le dio al Transporte Ferroviario Metropolitano. La primera estación del STC se inició en 1969 y se continuó con dos estaciones más en la década de los 70's y se fue ampliando, logrando un total de 12 líneas (Ilustración 1), dos de ellas (línea A y línea B) conectan con algunas zonas del Estado de México. La red se ha construido en 32 segmentos a lo largo de 43 años.

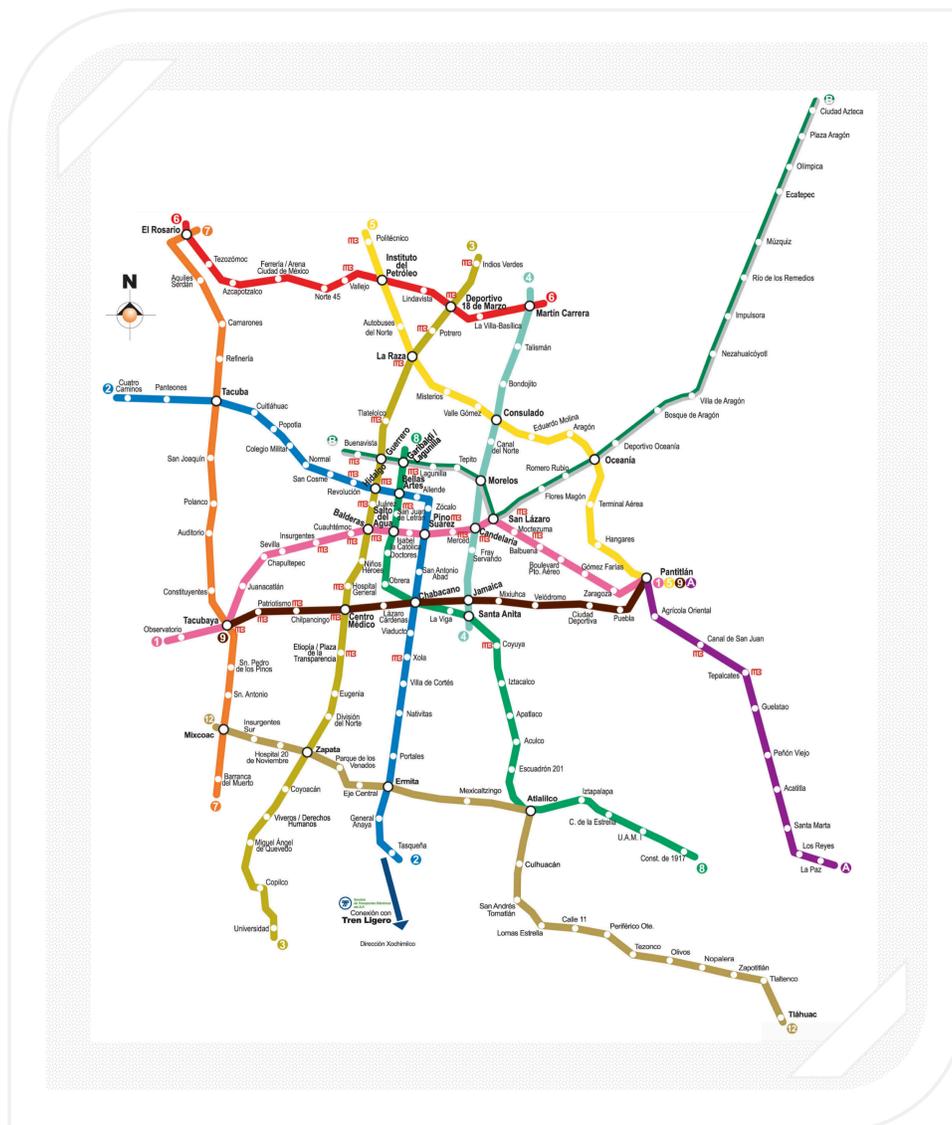


Ilustración 1 Red del Sistema de Transporte Colectivo  
Fuente: STC (2018).

Con una Misión (Ilustración 2) y Visión (Ilustración 3) que demuestra que el STC tiene la firme intención de ofrecer un servicio de transporte que agrade al usuario, considerando que debe ser un servicio público masivo.

## MISIÓN

*“Proveer un servicio de transporte público masivo, seguro, confiable y tecnológicamente limpio. Con una tarifa accesible, que satisfaga las expectativas de calidad, accesibilidad, frecuencia y cobertura de los usuarios y se desempeñe con transparencia, equidad y eficiencia logrando niveles competitivos a nivel mundial.”*



Ilustración 2 Misión del STC.  
Fuente: STC, (2018).

## VISIÓN

*“Lograr un servicio de transporte de excelencia, que coadyuve al logro de los objetivos de transporte sustentable en la Zona Metropolitana del Valle de México, con un alto grado de avance tecnológico nacional, con cultura, vocación industrial y de servicio a favor del interés general y el mejoramiento de la calidad de vida de los ciudadanos ”*



Ilustración 3 Visión del STC  
Fuente: SCT, (2018).

A diferencia de otros medios de transporte en la ZMVM, el STC se caracteriza por tener el beneficio de recorrer largas distancias y hacer uso de toda la extensión de la red por una única entrada con un costo de \$5.00 MXN. y con excepción de los adultos mayores, personas con discapacidad, niños menores de 5 años, jóvenes afiliados al INJUVE e incluso a policías uniformados, ya cuentan con acceso gratuito al servicio. Otra característica y que es parte de un factor de confiabilidad es el horario de servicio ya que además de su amplio horario (los días laborales de 5:00 a 00:00 horas, sábados de 6:00 a 00:00 horas, domingos y días festivos de 7:00 a 00:00 horas) es constante y está definido para cada una de sus estaciones.

El STC a través de un comunicado de prensa a principios del año 2018, ha expresado que la demanda esperada es de 4.5 millones de usuarios al día y su demanda real se ha visto excedida aproximadamente con más de 1 millón de usuarios (cifra por día) respecto a la demanda esperada, por tratarse de cifras duras es necesario dimensionar esta cantidad, haciendo un comparativo con algo que pueda hacer más sentido, de la cantidad de usuarios que transporta el STC. Por ejemplo el STC transporta anualmente a 1,662,562,714 usuarios lo que significa que con esa capacidad podría transportar 13.5 veces a toda la población de la República Mexicana, considerando esta cifra de usuarios anualmente se puede hacer una comparación de los usuarios que ingresan por hora (241,000 usuarios) lo que equivale a llenar 2.8 veces el Estadio Azteca y por vehículo (2000 usuarios) que equivale a llenar 12.5 Metrobús estándar, que tiene una capacidad para 160 personas. Teniendo la cifra de usuarios diariamente se hizo la comparación con la población de la delegación Iztapalapa, con base en la información del INEGI del año 2015 (ver Ilustración 4).



Ilustración 4 Comparativo de la demanda del STC.  
Fuente: Elaboración propia con información del STC, (2018).

### 1.3.1. Tipo de estaciones en el STC.

Los puntos llamados “estaciones” dentro de la red del STC pueden clasificarse por su infraestructura (subterráneas, elevadas y de superficie), dentro de la red se pueden identificar dos macro categorías que son las terminales y estaciones, según el tipo estaciones a su vez se subdivide por su uso en *estaciones de paso* y *estaciones de correspondencia*. Las “*terminales*” que también tienen subcategoría para distinguir a las estaciones terminales *sin correspondencia* y *con correspondencia*.

Para efectos de este trabajo, se considera las estaciones de correspondencia. Dentro de la red, se tienen 24 estaciones terminales de las cuales 12 son con correspondencia, y 12 sin correspondencia (ver Ilustración 5).

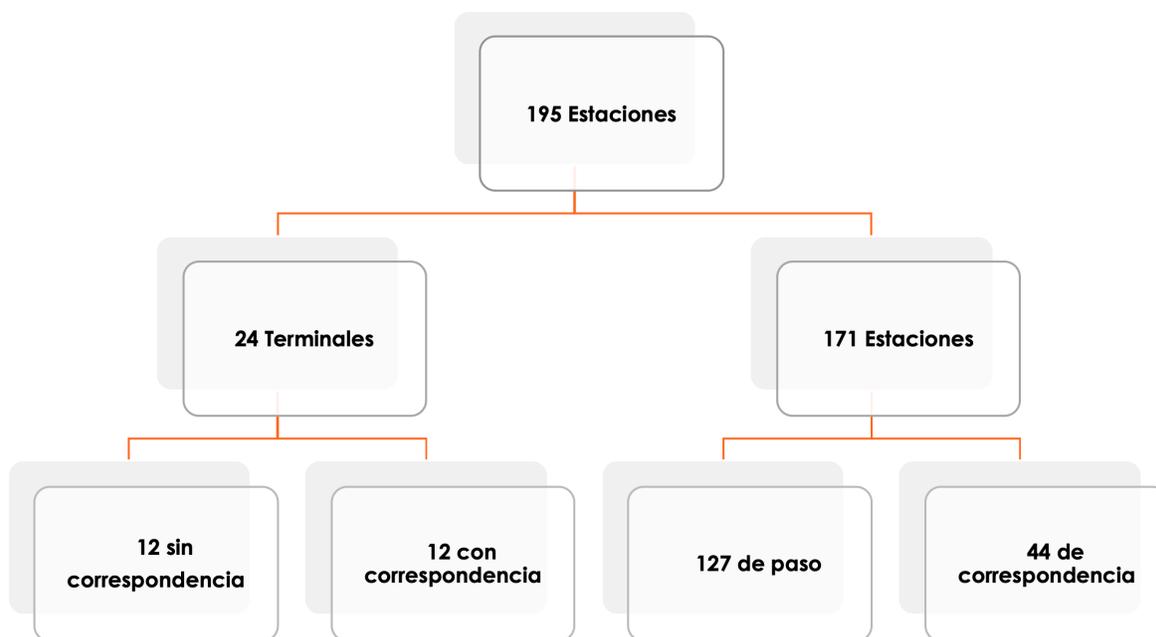


Ilustración 5 Tipo de estaciones en el STC

Fuente: Elaboración propia con información del STC, (2018).

### 1.3.2. Visita técnica al STC.

Se realizaron algunas visitas técnicas para observar las condiciones de las estaciones/terminales con correspondencia, las Pantitlán, Chabacano, Zapata y Guerrero. A continuación, se presentan y describen las evidencias más representativas que se obtuvieron durante la visita técnica a cada estación.

#### 1.3.2.1. Estación Pantitlán.

La estación Pantitlán es la única estación-terminal que conecta 4 líneas de la red del STC en un mismo punto, en esta estación convergen las líneas 1, 5, 9 y A, aunado a lo anterior a las afueras de la estación se encuentra un paradero del transporte colectivo y Mexibús; lo que aumenta la demanda de la estación provocando un sobre cupo entre semana y en horas pico. En la estación Pantitlán se ha observado que se ha implementado una serie de mecanismos para guiar y

dosificar el tránsito a lo largo de la estación, considerando los pasillos y escaleras que conectan con otra línea.

Como parte de las guías se han empleado señalizaciones en parte superior (techo) y en paredes. La señalización visible y constante, ayuda a tener un tránsito fluido, y guía a los usuarios para su transferencia hacia otro punto, ya sea una línea del mismo transporte o hacia otros modos transportes como son el mexibús o autobuses suburbanos (Ilustración 6).

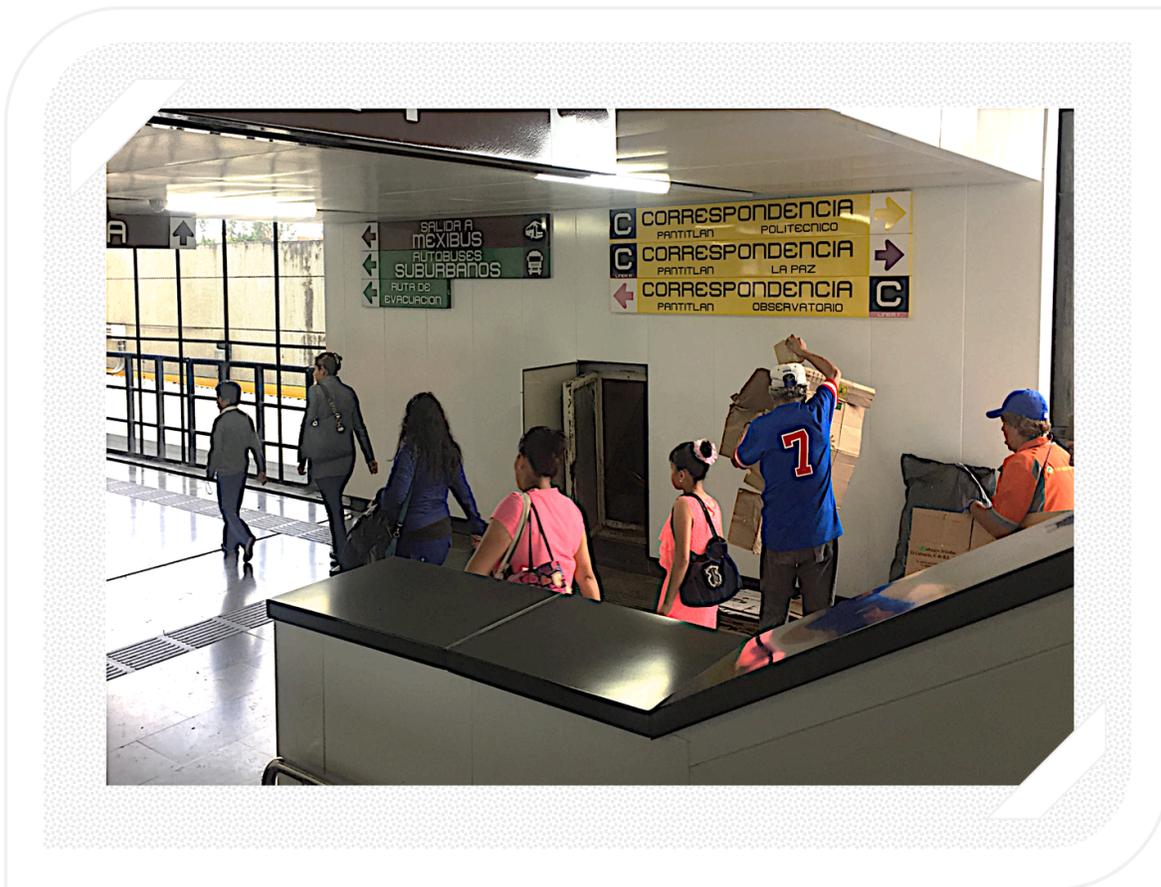


Ilustración 6 Estación Pantitlán\_ Señalización en pared  
Fuente: Visita técnica (2018).

También se encontró señalización en el piso, se trata de una serie de calcomanías en forma de flecha indicando la dirección para llegar a otra línea u otro medio de transporte (mexibús), aunque es muy visible y favorecedor para que los usuarios sigan una ruta, este tipo de señalamientos suele desgastarse fácilmente y pierden visibilidad y poder como guía (Ilustración 7).

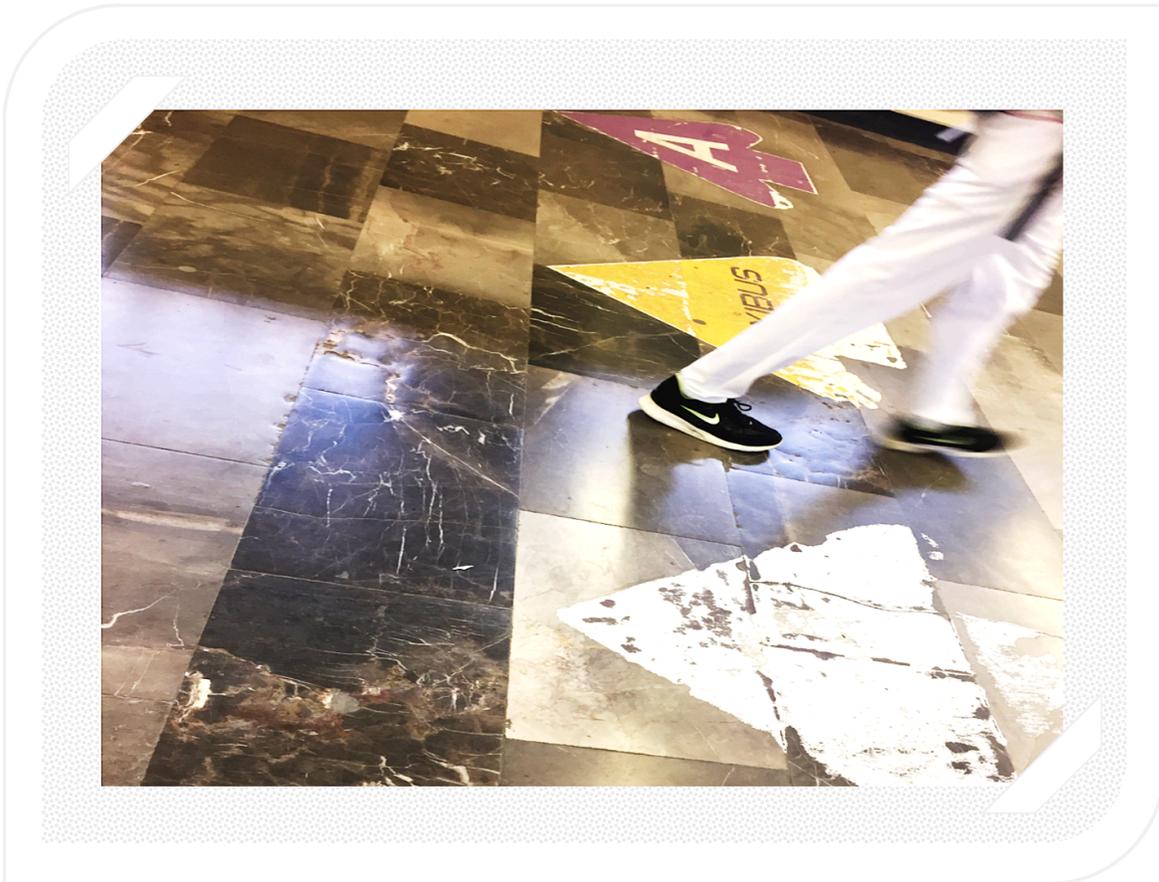


Ilustración 7 Estación Pantitlán\_Señalización en piso.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Para limitar y dosificar tránsito de los usuarios dentro de la estación Pantitlán, se emplean rejas o vallas de piso a techo formando una fila continua y con una solo dirección, lo que obliga a una reducción del flujo para disminuir la tasa de llegada a algún punto por ejemplo a la zona de andén, ver Ilustración 8.

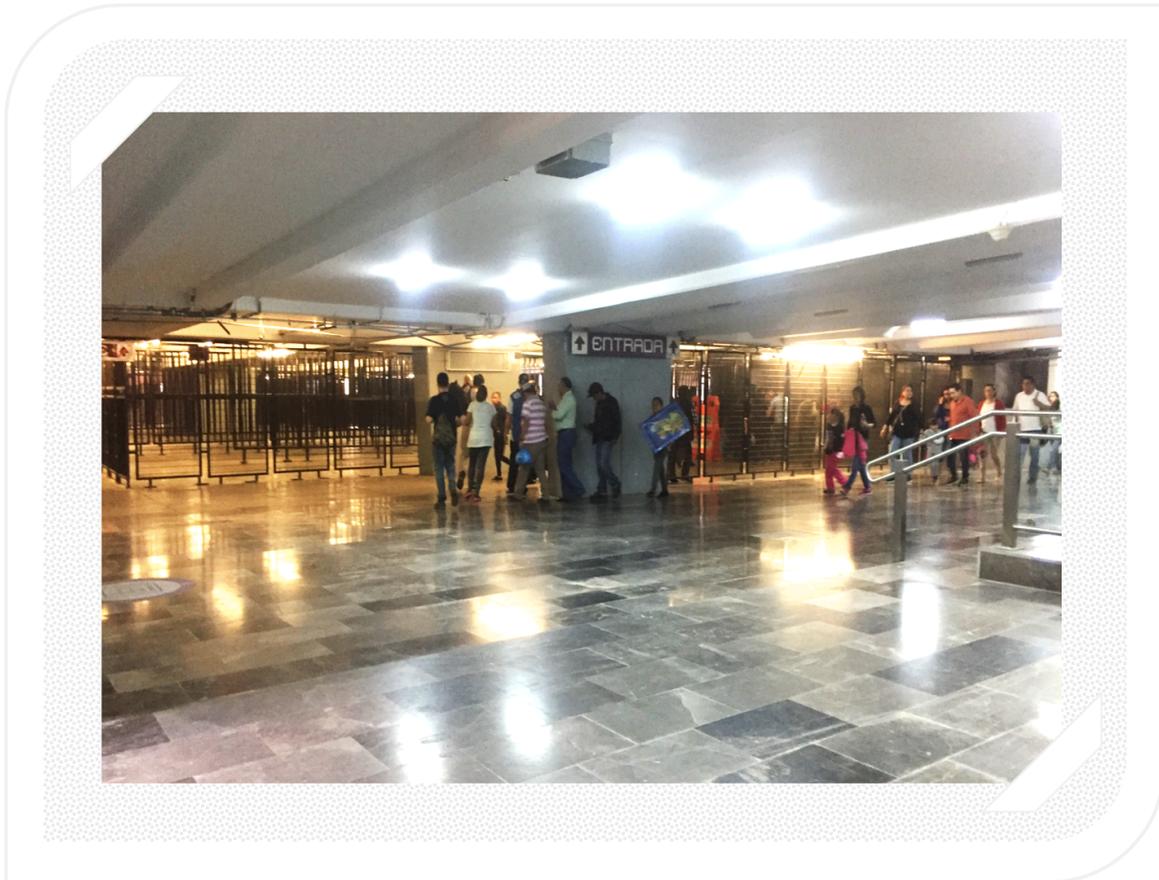


Ilustración 8 Estación Pantitlán\_Mecanismo para la dosificación de flujo  
Fuente: Visita técnica (2018).

En otra de la sección de la estación Pantitlán se encontraron barandales para separar los carriles evitando cruces a lo largo del pasillo que se utilizan para transferencia de una línea a otra (ver Ilustración 9).



Ilustración 9 Estación Pantitlán\_División de carriles.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Los barandales también han sido colocados en la zona de escaleras, que además de ser un apoyo para algunas personas también tiene la función de delimitar los carriles de los usuarios que suben y bajan las escaleras. Al tratarse de carriles con un espacio reducido donde difícilmente puede mantenerse dos personas en el mismo escalón, cuando alguna persona disminuye la velocidad o se detiene se ve afectado el flujo (ver Ilustración 10).

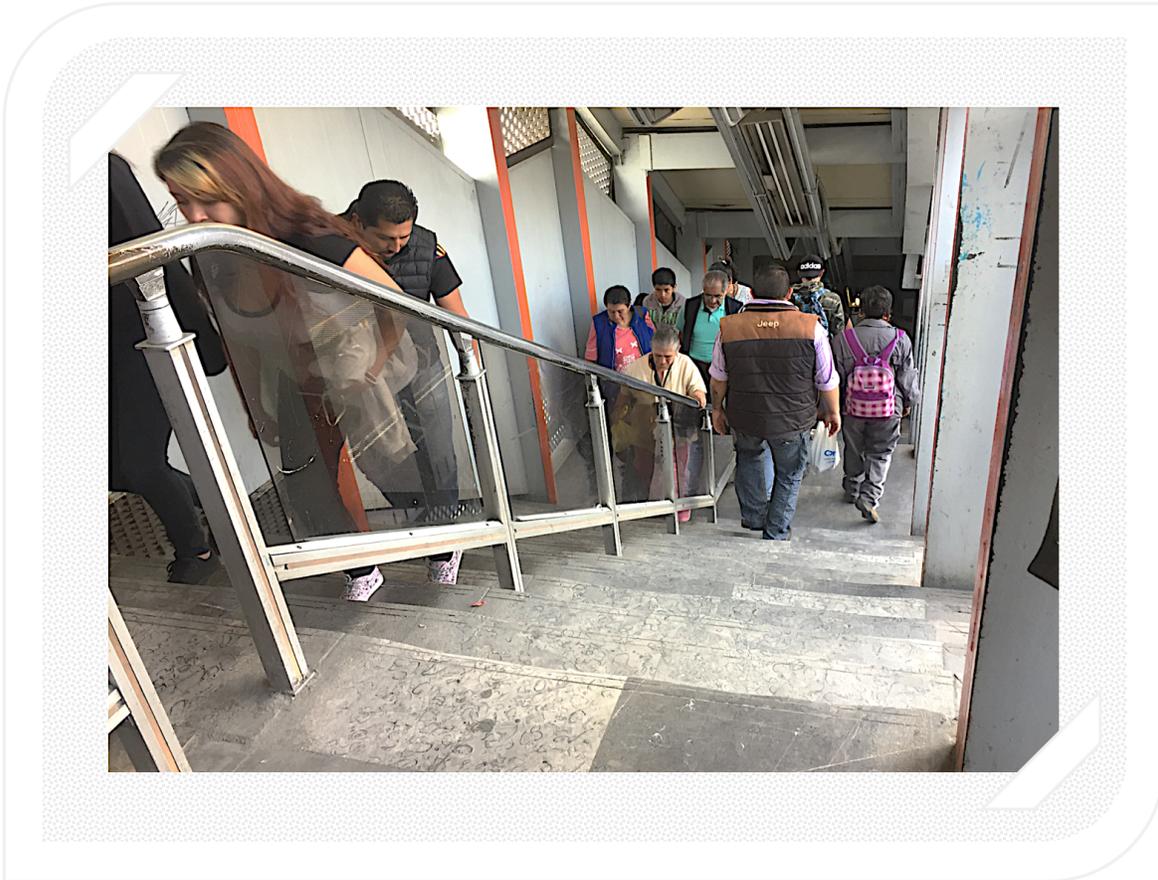


Ilustración 10 Estación Pantitlán\_División de carriles en escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Como parte de un mantenimiento y mejora a la estación, fueron utilizados algunos objetos para ayudar para la señalización temporal, sin embargo, aún se pueden observar algunos que limitan el tránsito de los usuarios e incluso se identificó un hueco en el piso y por encima de este un cilindro aparentemente caído (ver Ilustración 11).

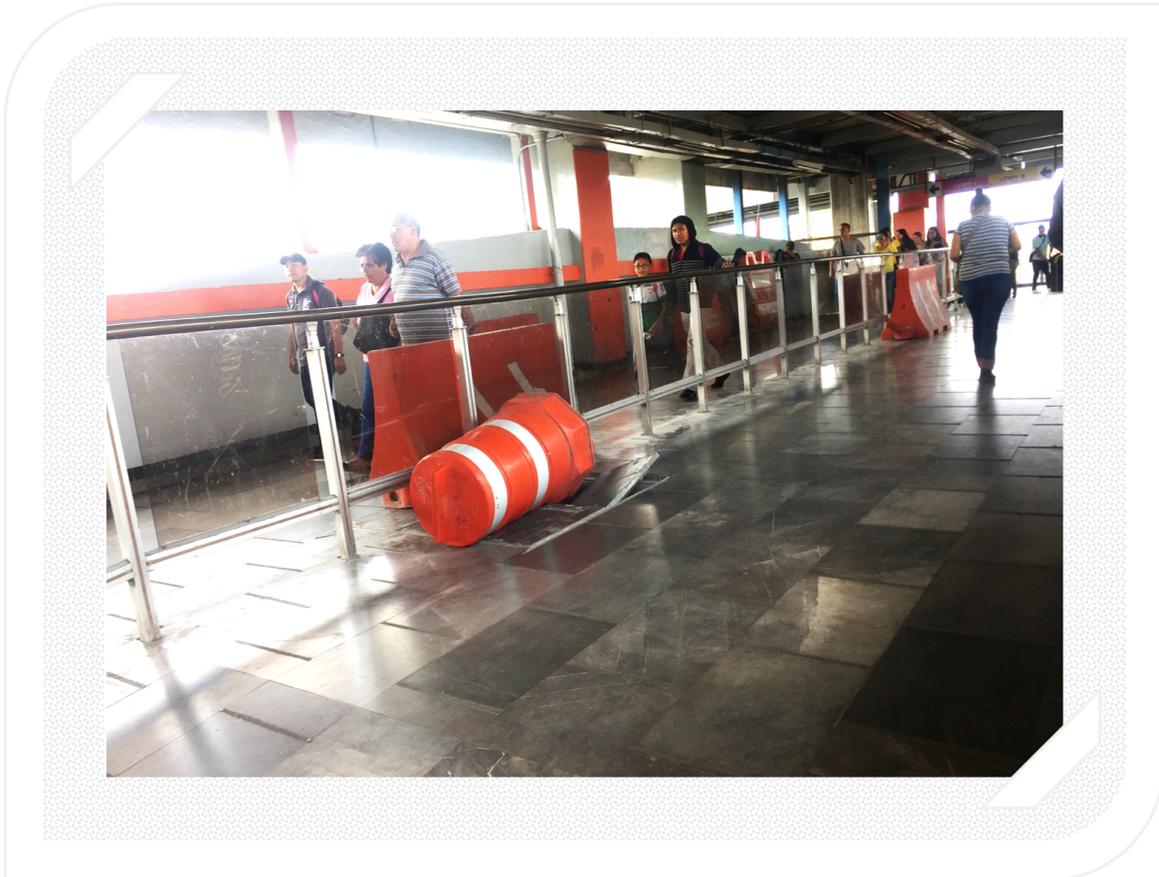


Ilustración 11 Estación Pantitlán\_Objetos en el pasillo de transferencia.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Los objetos que se utilizaron para la señalización temporal, también se encontraron en la zona de escaleras lo cual reduce mucho más el flujo de los usuarios y también se convierte en un factor de riesgo (ver Ilustración 12).

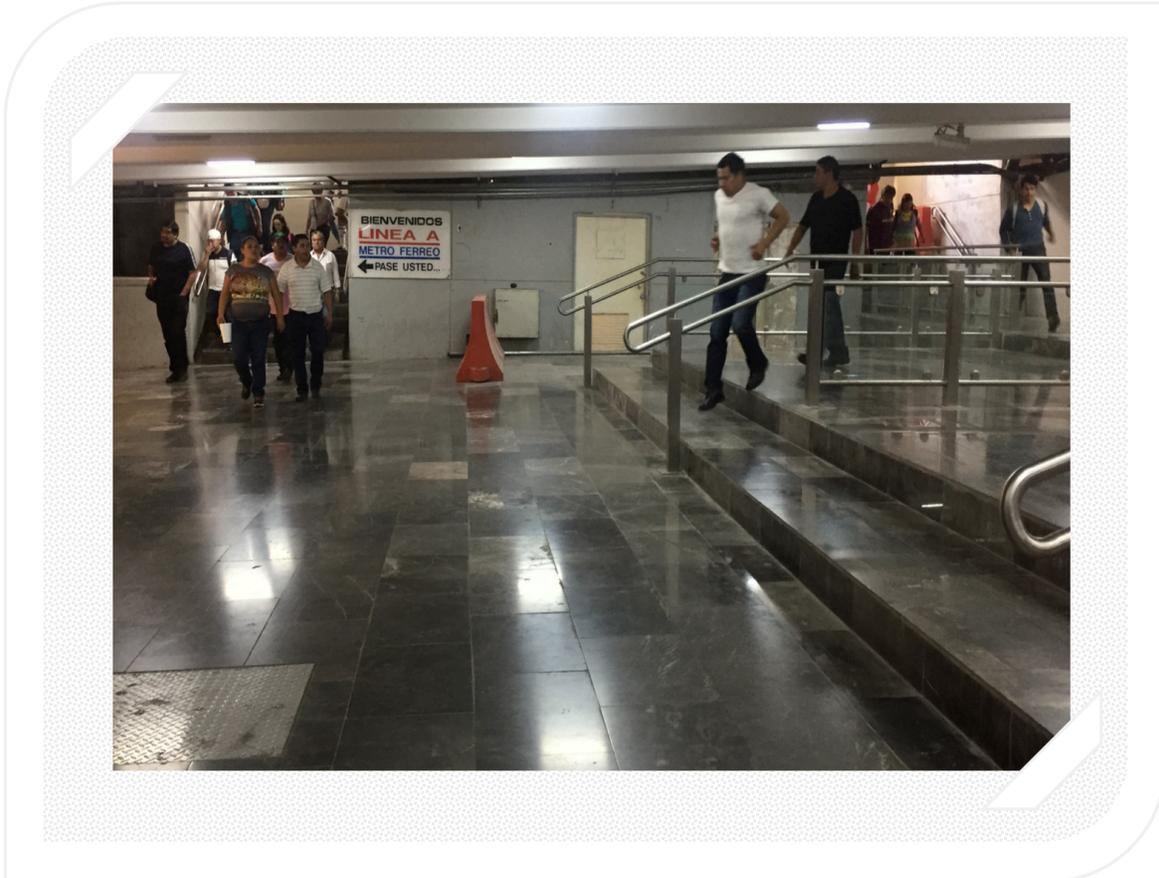


Ilustración 12 Estación Pantitlán\_Objetos en escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Como se puede observar en la Ilustración 13, los usuarios hacen uso del servicio de transportación que ofrece el STC y tienen la oportunidad de llevar consigo bolsas, mochilas y hasta maletas.

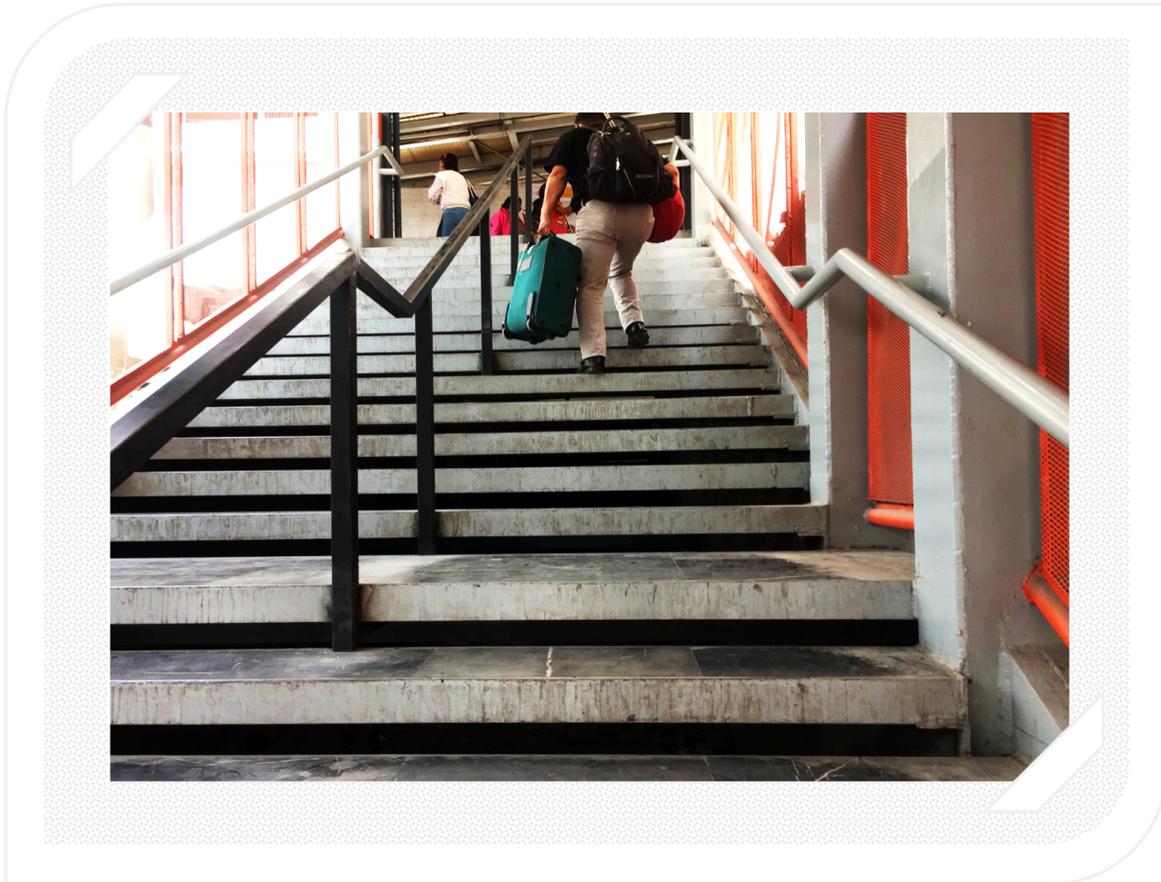


Ilustración 13 Estación Pantitlán\_Usuario con equipaje.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En ocasiones los usuarios transportan objetos voluminosos o frágiles, como placas, tabloneros o vidrios, además del reto que puede representar al transportar el o los objetos durante el recorrido por los pasillos y escaleras, se puede convertir en un riesgo para el usuario que los transporta y de quienes se encuentra cerca (ver Ilustración 14).



Ilustración 14 Estación Pantitlán\_Usuario transportado objeto voluminoso.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Uno de los comportamientos comunes de los usuarios, es detenerse en la zona de comercios ya sea para consumir, observar e incluso esperar, sin embargo este tipo de acciones afectan el flujo con el que transitan otros usuarios por la disminución de la velocidad o la obstrucción (ver Ilustración 15)

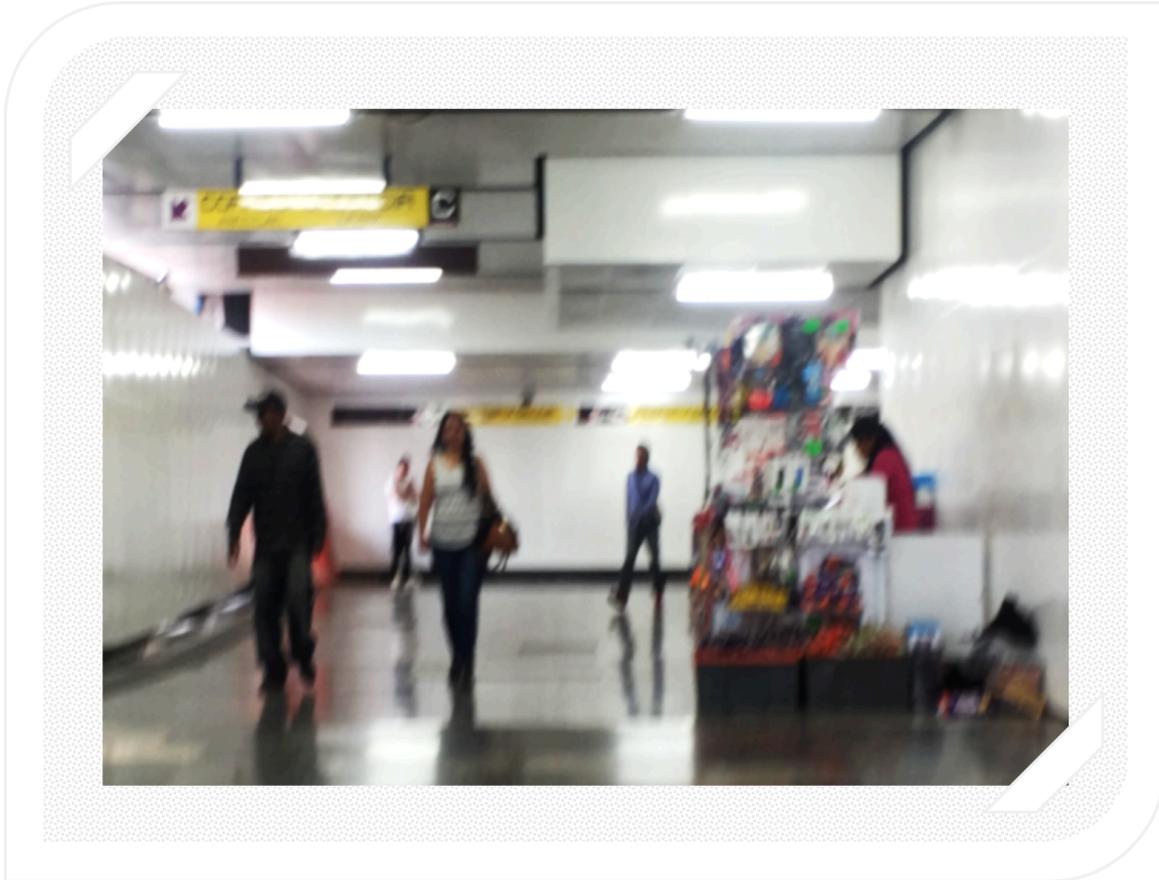


Ilustración 15 Estación Pantitlán\_ Comercio en pasillo de transferencia.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Dentro de los pasillos de transferencia, también se observó que aunque los pasillos sean lo suficientemente amplios para el tránsito de usuarios, se instalan comercio que con solo la mercancía pueden abarcar casi un tercio del ancho del pasillo (ver Ilustración 16)

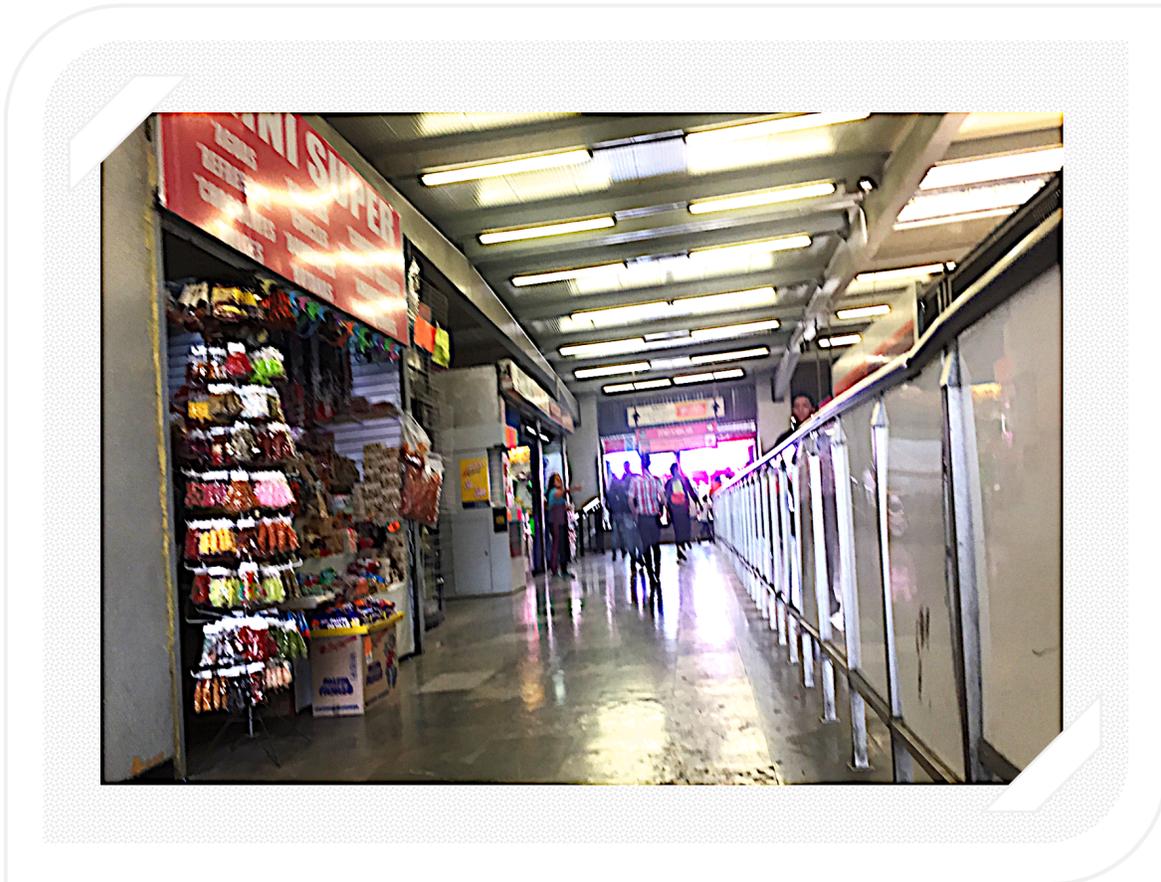


Ilustración 16 Estación Pantitlán\_ Establecimientos comerciales.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Algunos comerciantes toman la parte alta de las escaleras, que ya por su naturaleza es un área donde se disminuye la velocidad, se puede congestionar más aún por el efecto de la compraventa de mercancías o simplemente detenerse a observar (ver Ilustración 17).

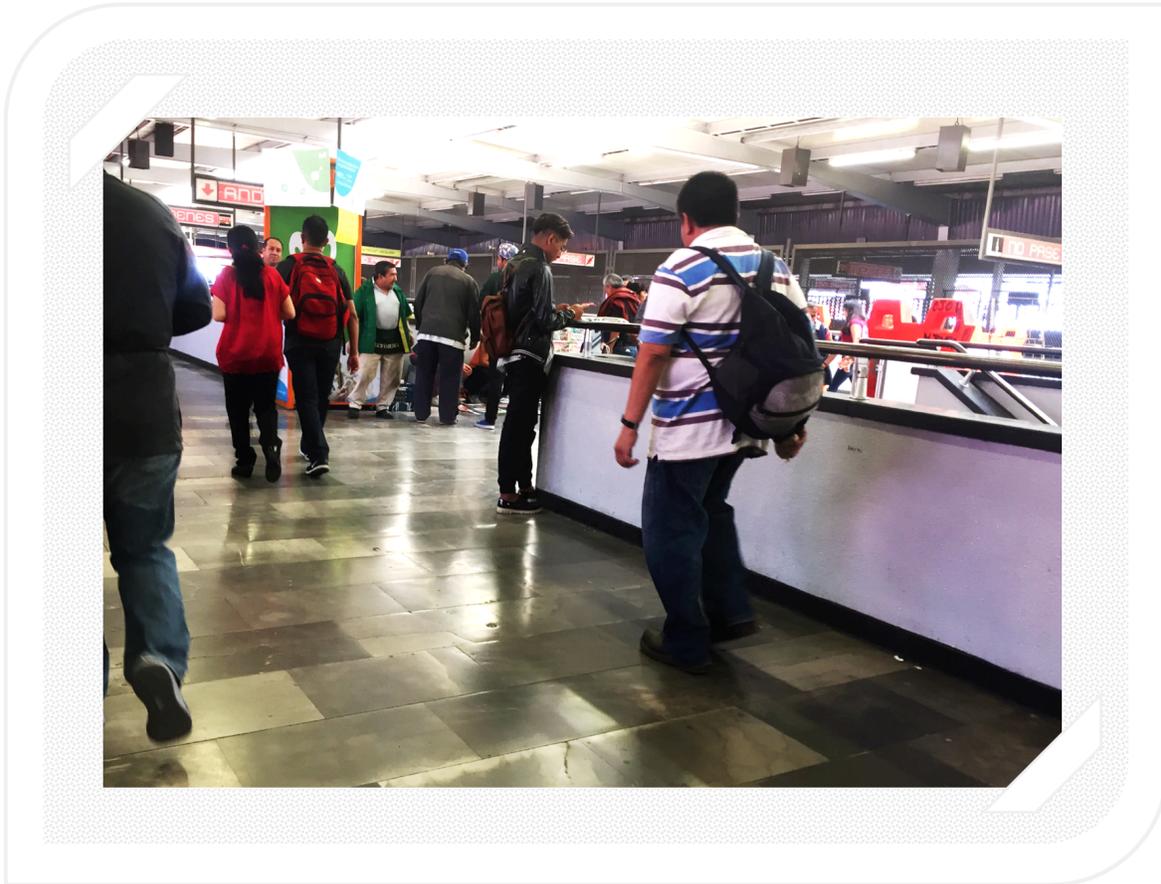


Ilustración 17 Estación Pantitlán\_Comerciantes a pie de escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

### 1.3.2.2. Estación Chabacano.

La Estación Chabacano y Tacubaya, son los únicos dos puntos en la red del STC en el que convergen tres líneas. En la estación Chabacano coinciden las líneas 2,8 y 9; esta estación es una de las más. La estación Chabacano de la línea 2 se encuentra en la superficie y en medio de las otras dos líneas, sin embargo, las líneas 8 y 9 se encuentran subterráneas, lo que hace que la conexión entre estas sea a través de puentes.

En la Estación Chabacano de la línea dos, tiene 3 andenes, el andén del en medio está dedicado para el descenso de ambos trenes (cada tren deberá abrir las puertas que dan hacia este andén antes de abrir las puertas que dan hacia el andén de ascenso que le corresponde (ver Ilustración 18).

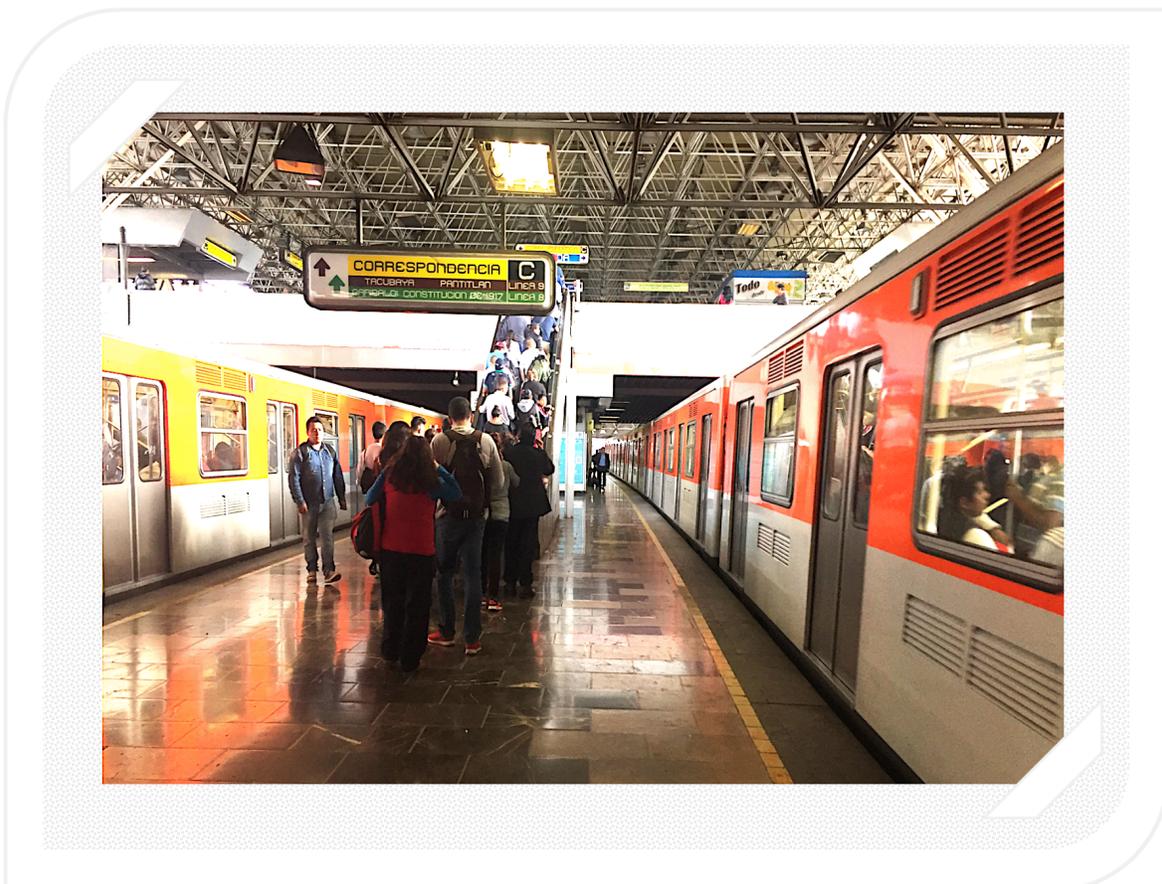


Ilustración 18 Estación Chabacano\_Andén de descenso y escaleras de salida.

Fuente: Visita técnica (2018).

Para salir del andén los usuarios deben subir las escaleras y una vez arriba se encontrarán tres torniquetes que impide que otros usuarios puedan ingresar al andén de descenso (ver Ilustración 19).

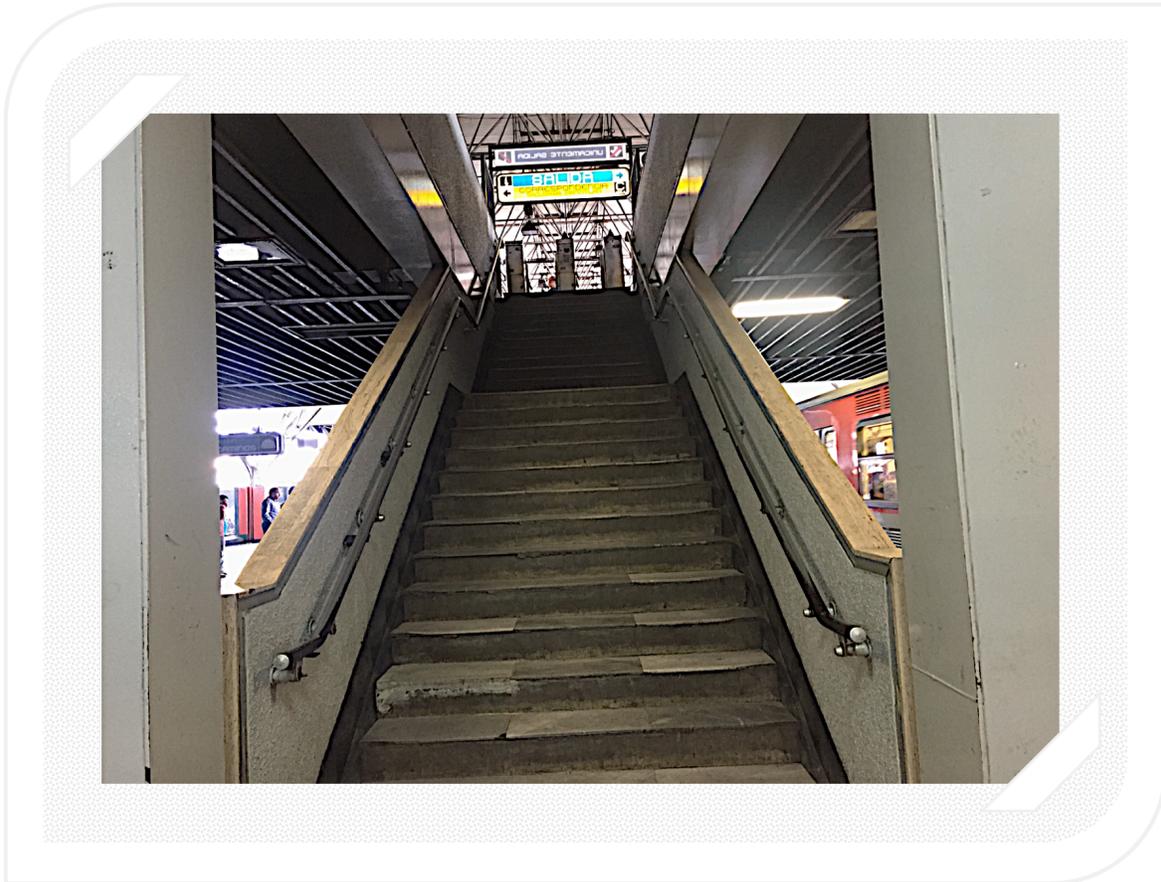


Ilustración 19 Estación Chabacano\_Torniquetes en las escaleras de salida.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Como parte de la señalización que implemento el STC, algunos son ubicados en la parte superior, ya sea en el techo o muros. En la Ilustración 20 se puede observar una de las guías principales que indica correspondencia con línea 8, se encuentra en buen estado e iluminada (ver ilustración 20).

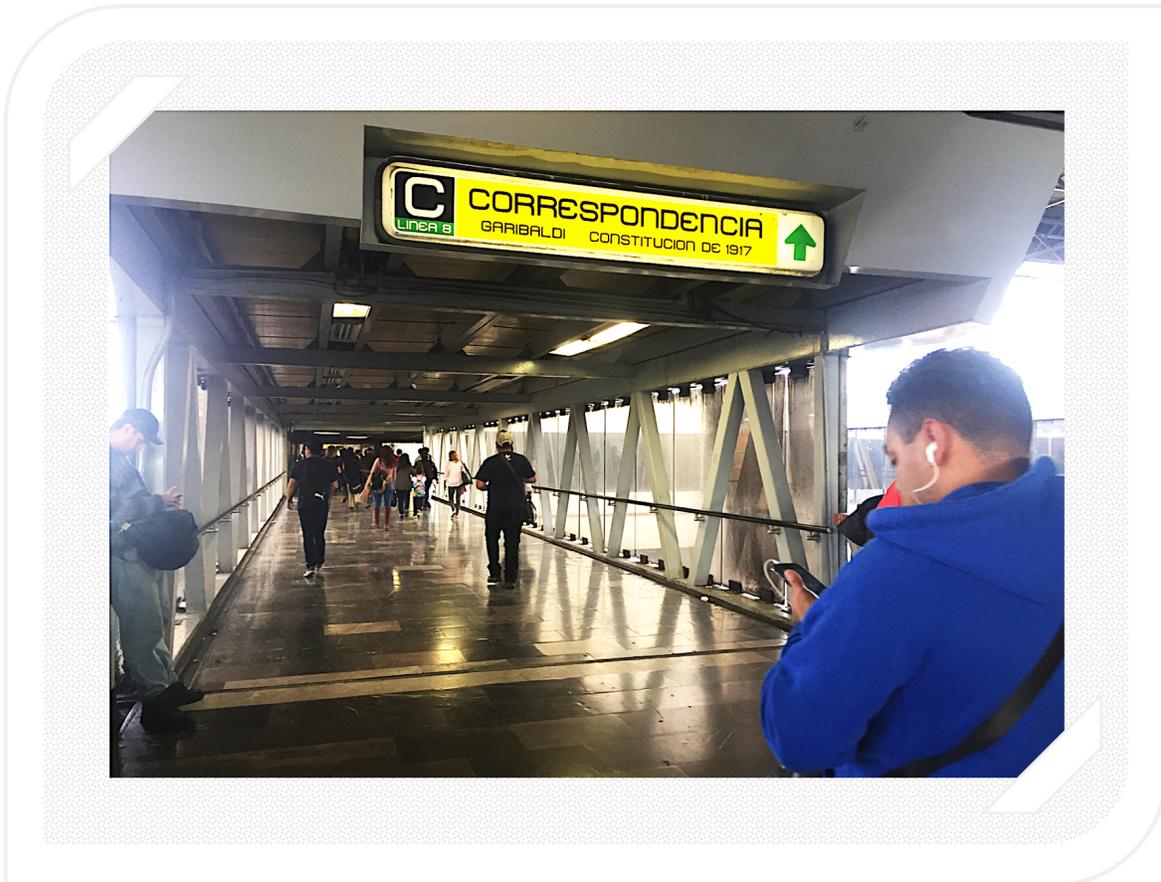


Ilustración 20 Estación Chabacano\_ Señalización en techo.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Una de las ventajas de las escaleras eléctricas dentro de una estación de transferencia es mantener un flujo constante, ya que sin importar las condiciones de los usuarios se mantendrá un avance constante (ver Ilustración 21)

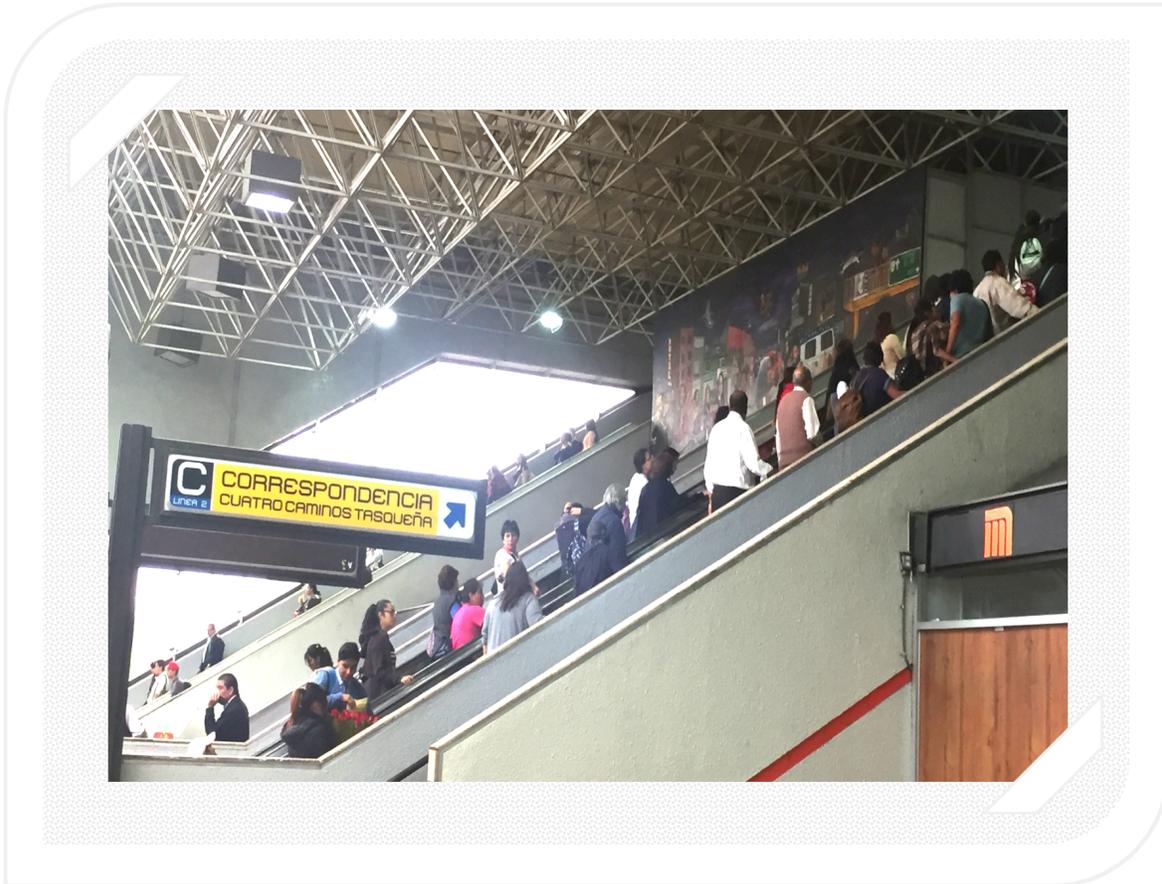


Ilustración 21 Estación Chabacano\_Señalización de dirección.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En la estación se han utilizado el espacio y la visibilidad en la pared para reforzarla señalización, lo que se traduce en un guía constante dentro de la estación para el usuarios y le ayuda en caso de que necesite cambiar de dirección dentro de la misma línea o incluso un cambio de línea (ver Ilustración 22).



Ilustración 22 Estación Chabacano\_Señalización en pared.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En esta estación también se aprovecha el contrapaso en las escaleras para orientar a los usuarios. También se puede observar en el piso triángulos de color amarillo que indican la dirección en el que debe ir el flujo, reforzando los señalamientos estándar como en cualquier otra estación (ver Ilustración 23).



Ilustración 23 Estación Chabacano\_Señalización en el contrapaso.

Fuente:

Fuente: Visita técnica (2018).

Otro de los mecanismos empleados para el control en los pasillos de los pasillos de transferencia son los barandales, señalamientos en techo, piso y se ve reforzado en la parte superior de la escalera con el mensaje “*Circule por la Derecha*”. También se puede observar que la mayoría de los usuarios, viajan con al menos un bolso, mochila; usuarios detenidos en el barandal y más adelante un comerciante instalado (ver Ilustración 24).

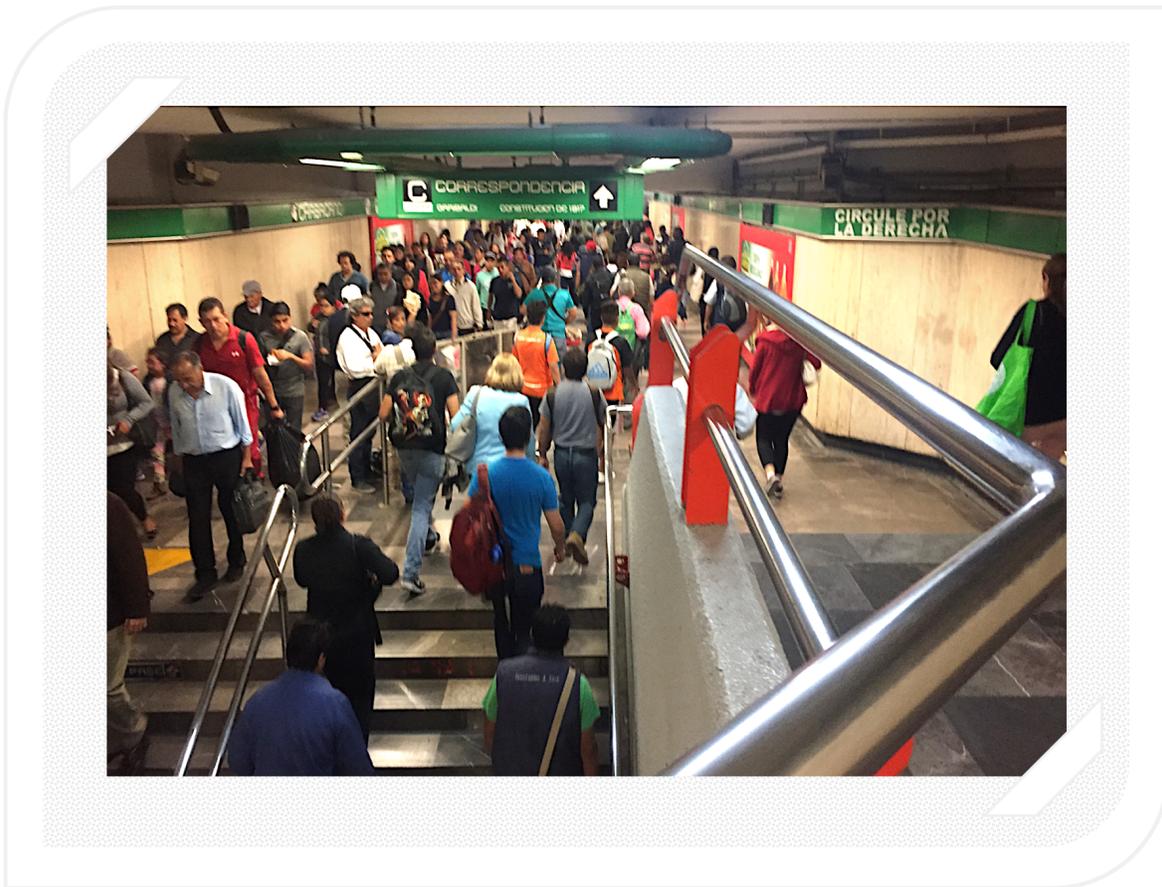


Ilustración 24 Estación Chabacano\_ “Circule por la derecha”.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Parte de los usuarios, hacen uso del servicio de transporte muy livianos, mientras que otros pueden transportar mochila y otros objetos como una guitarra, otros usuarios, aprovechan el tiempo para ingerir algo, mientras que otros se dejan llevar por los espacios comerciales (ver Ilustración 25).



Ilustración 25 Estación Chabacano\_Usuario transportando objeto voluminoso.

Fuente: Visita técnica (2018).

Algunos usuarios se desvían de su camino para acercarse a un comercio, otros prefieren solo echar un vistazo a los negocios mientras continúan su camino, mientras que otros usuarios pueden estar un poco aislados del resto por el uso de audífonos (ver Ilustración 26).

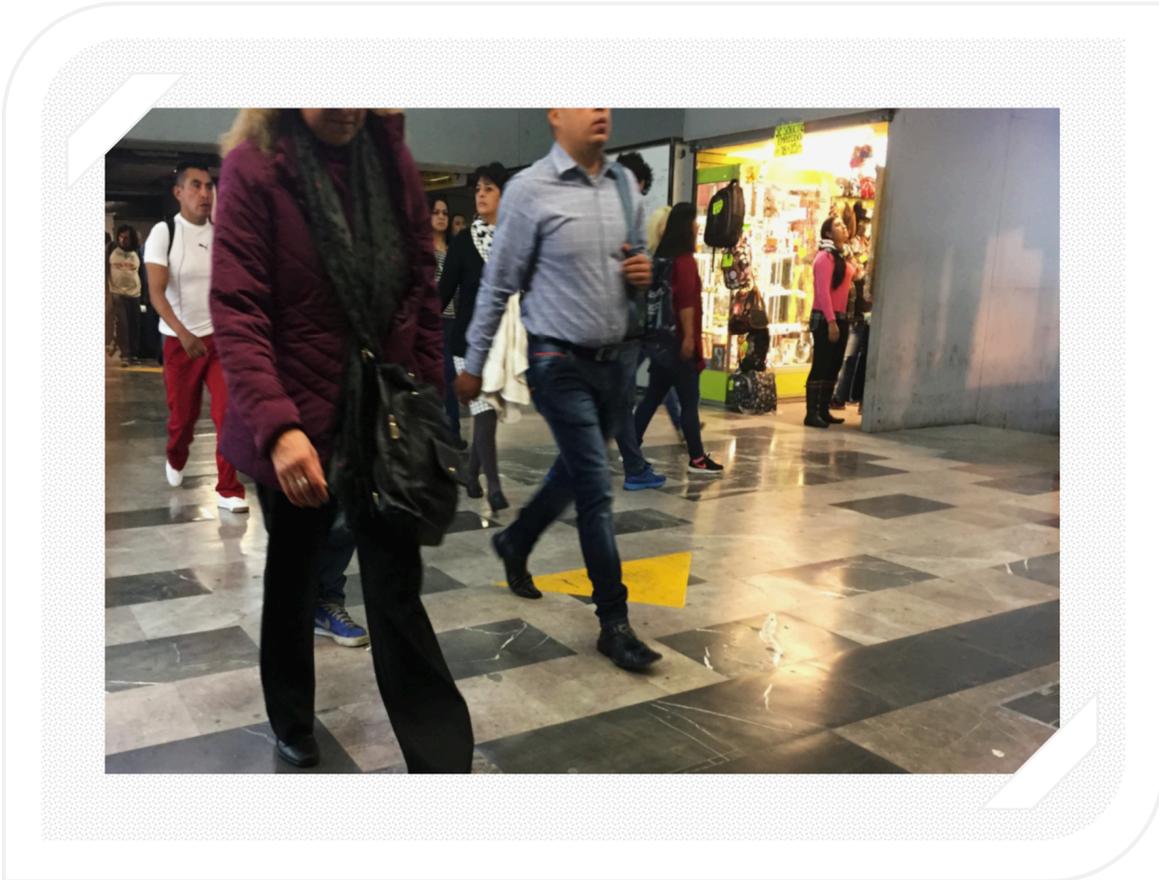


Ilustración 26 Estación Chabacano\_Distracción en zona de comercios.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Adicional a los múltiples señalamientos que pueden observarse en esta imagen, se puede notar que, a una persona en silla de ruedas en medio del pasillo, que provoca una reducción del espacio de libre tránsito. En la Ilustración 27 también se puede observar a una persona detenida en el pasillo reduce el espacio para el flujo y puede ocasionar la pausa o detenimiento del flujo de otros usuarios.

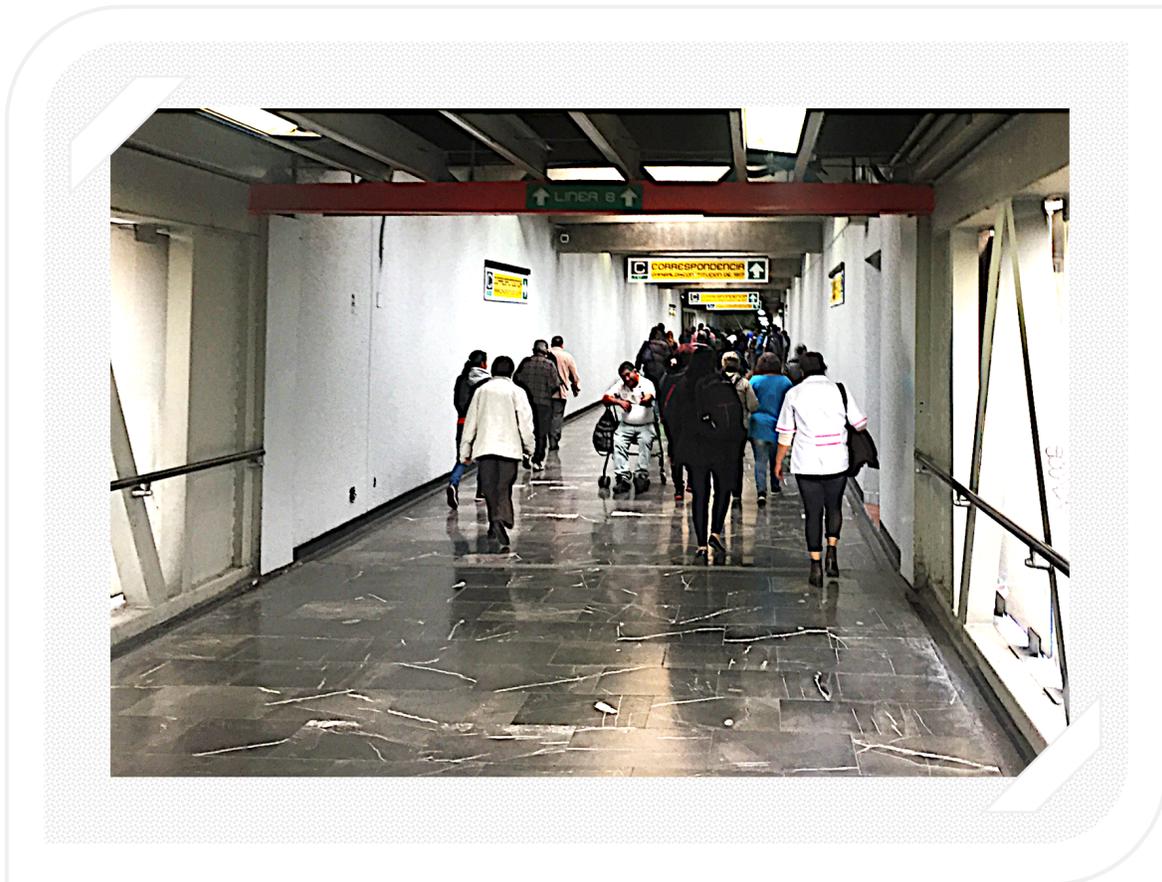


Ilustración 27 Estación Chabacano\_ Señalización y pasillo usuario detenido.  
Fuente: Visita técnica (2018).

El comercio informal se puede encontrar en pasillos (ver ilustración 28) o escaleras (ver Ilustración 29) obstruyendo al menos la mitad del ancho del paso que esta designado para el tránsito de los usuarios, esta situación se torna más crítica conforme aumenta la demanda de usuarios en estos espacios, ya que evidentemente genera una congestión de usuarios innecesaria y ajena a la operación per se del STC.

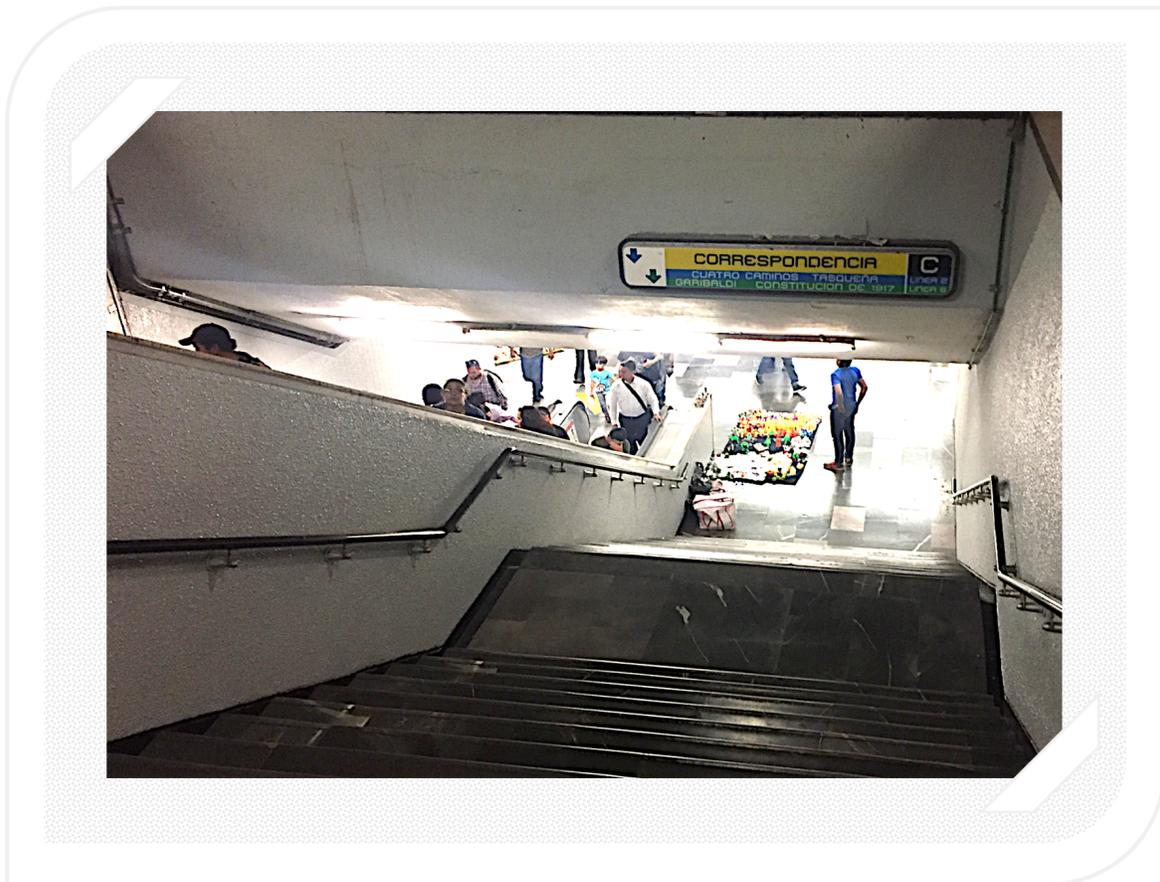


Ilustración 28 Estación Chabacano\_Comercio informal en escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

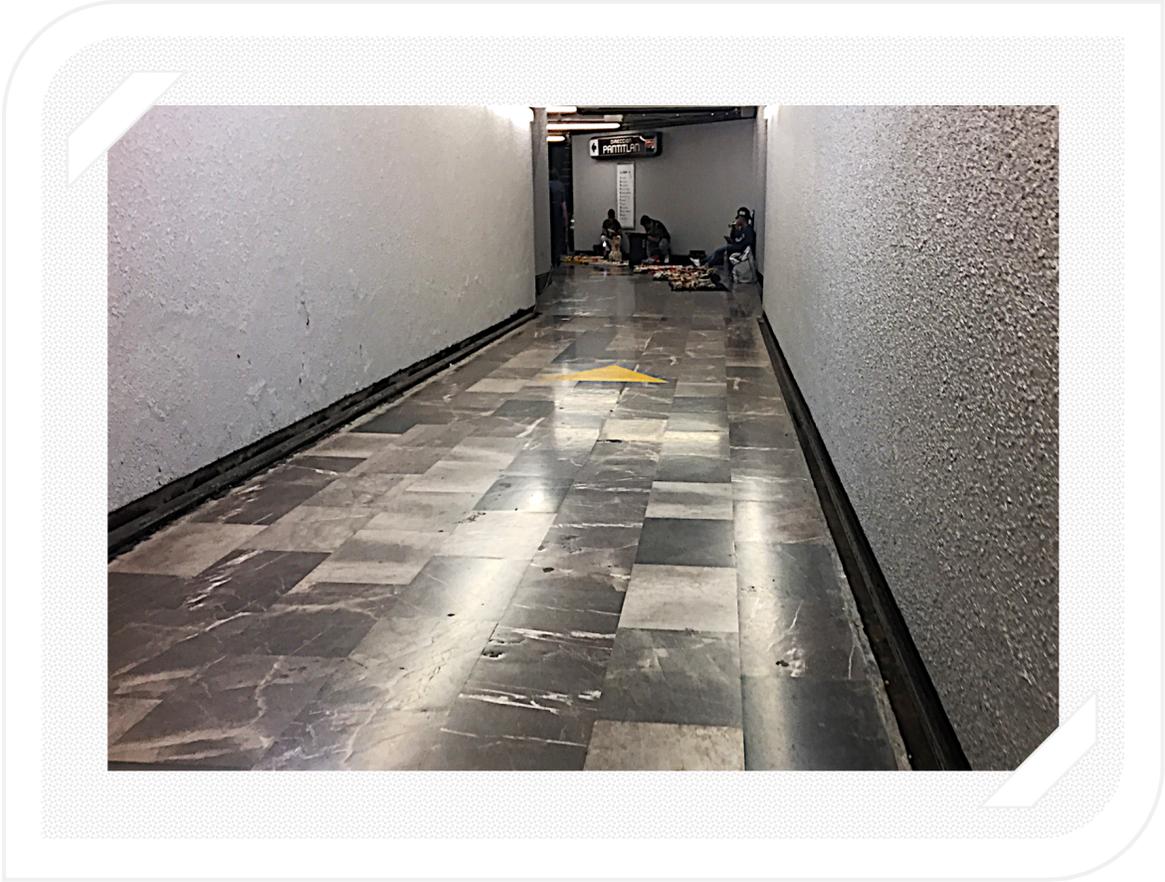


Ilustración 29 Estación Chabacano \_Comercio informal en pasillo.  
Fuente: Visita técnica (2018).

### 1.3.2.3. Estación Zapata.

La estación Zapata que conecta dos líneas (línea 3 y línea 12), es una de las estaciones de transferencia más recientes habilitada en la red del STC (Metro), cobra relevancia por su ubicación geográfica (plazas, escuelas, paradero, oficinas y comercios informales) por su importante actividad económica.

En la estación Zapata de la línea 12, se caracteriza por sus entradas amplias al igual que el pasillo principal, sin embargo, para conectar con la línea 3 el espacio se ve reducido casi un 50% ocasionando un cuello de botella, donde los usuarios pueden colisionar y en consecuencia entorpecer la velocidad del tránsito (ver Ilustración 30).

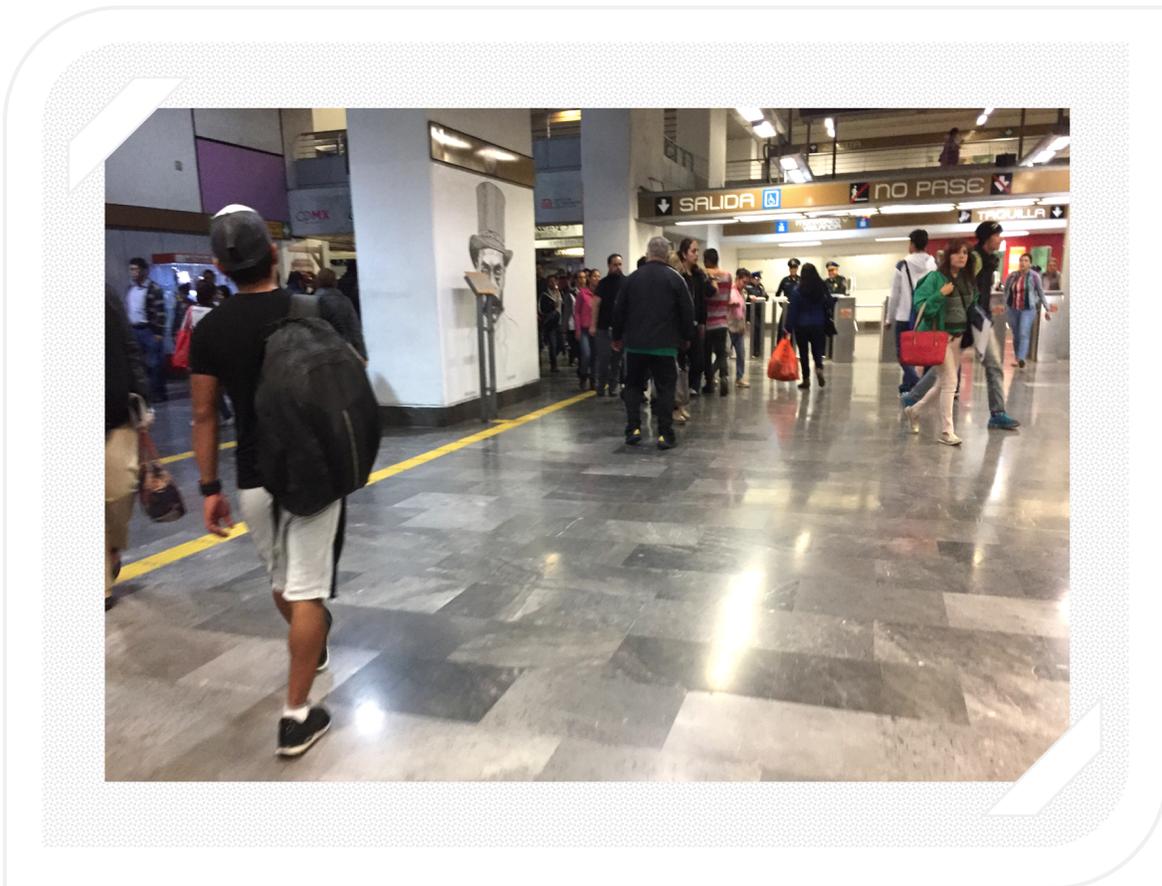


Ilustración 30 Estación Zapata\_Pasillo de Línea 12 a Línea 3.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Uno de los pasillos que conectan con la línea 3 – dirección Universidad, se encuentra una zona de escaleras, con la señalización estándar indicando la correspondencia para la mitad del espacio y la otra mitad con un “No Pase”, pero debido a la gran cantidad de usuarios y el poco espacio se congestiona muy fácilmente y según la dirección que tenga más demanda es la que abarca más espacio, aun cuando se trate de subir (considerando que se requiere más esfuerzo y menos campo de visión). La mayoría de los usuarios lleva por lo menos una maleta o bolso que puede requerir más espacio y según el peso de la carga o alguna limitación de salud o por la edad avanzada puede representar una dificultad para desplazarse ágilmente (ver Ilustración 31 y 32).



Ilustración 31 Estación Zapata\_Escaleras de Línea 12 a Línea 3.  
Fuente: Visita técnica (2018).

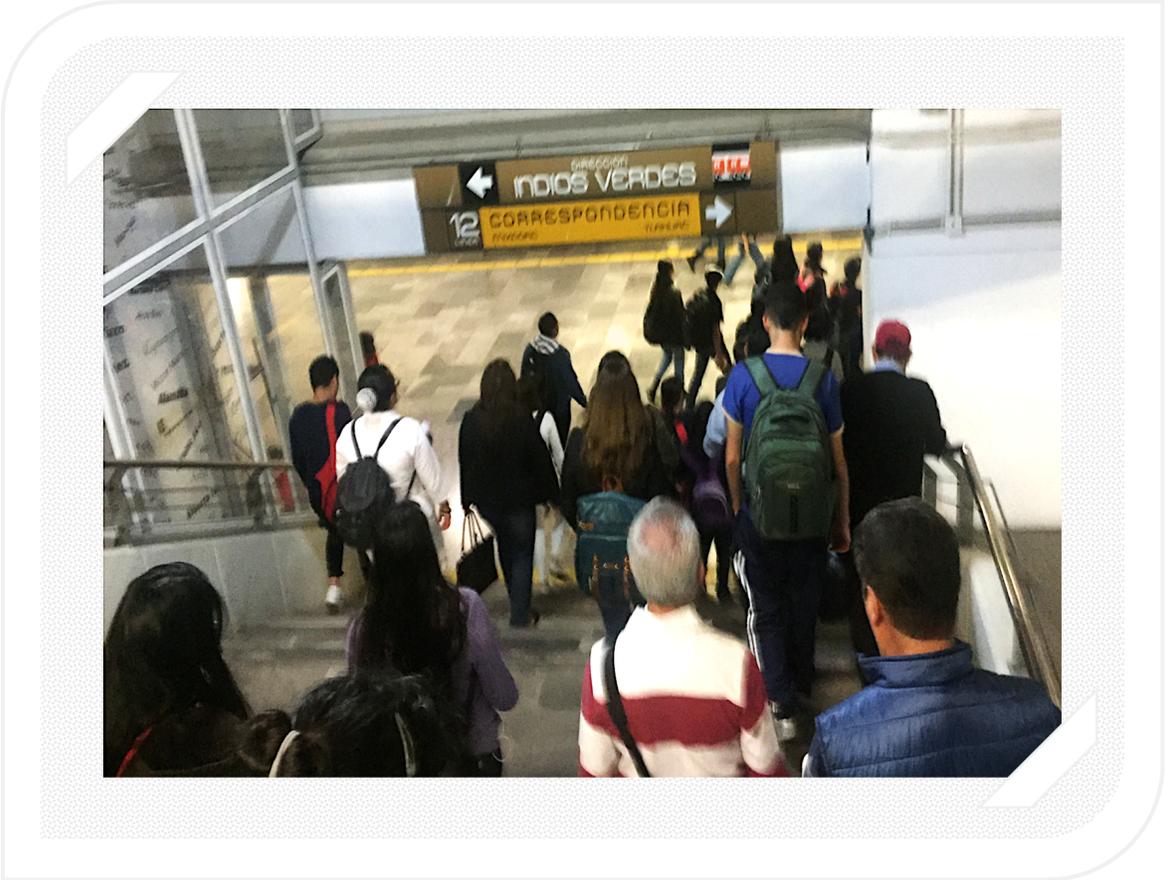


Ilustración 32 Estación Zapata\_Escaleras de Línea 3 a Línea 12.  
Fuente: Visita técnica (2018).

La invasión de carril no es exclusiva de la zona de escaleras, también se presenta a lo largo del pasillo y según el flujo con más demanda es la que abarca más espacio en el pasillo (Ilustración 33).



Ilustración 33 Estación Zapata\_Pasillo de Transferencia.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En la línea 3 – Dirección Indios Verdes, se encuentran escaleras que conectan un pasillo que lleva a la línea 12, para acceder a las escaleras los usuarios frecuentemente utilizan el camino más corto que a su vez es más estrecho donde solo puede pasar una persona a la vez para entrar o salir de las escaleras (Ilustración 34).

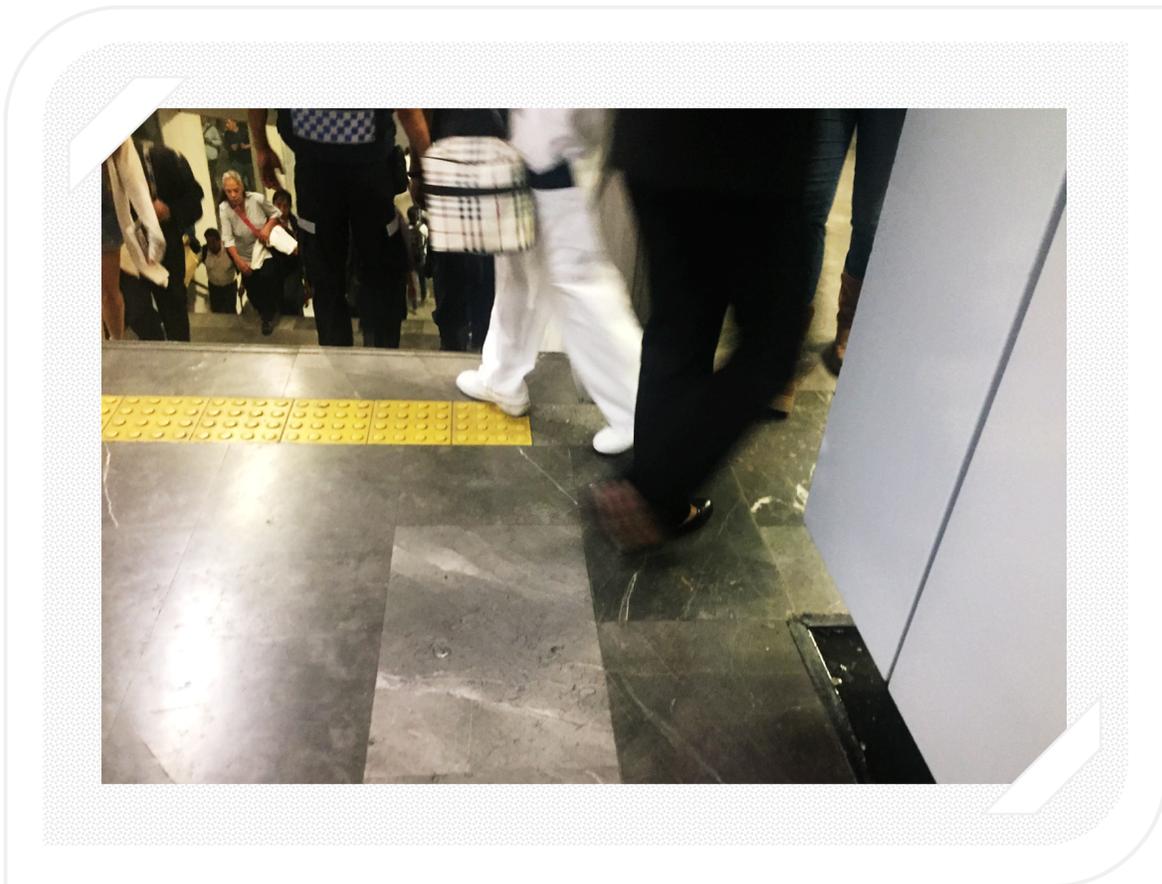


Ilustración 34 Estación Zapata\_Acceso estrecho a escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En la zona de escaleras de la Línea 3 con las que se puede cambiar de Dirección de Indios Verdes a Universidad y viceversa, Los usuarios que requieren apoyarse de los pasamanos pueden ir de ambos lados del mismo carril, provocando que otros usuarios vayan esquivándolos, aprovechando lo amplio de las escaleras o incluso tomar las escaleras del lado contrario (Ilustración 35).

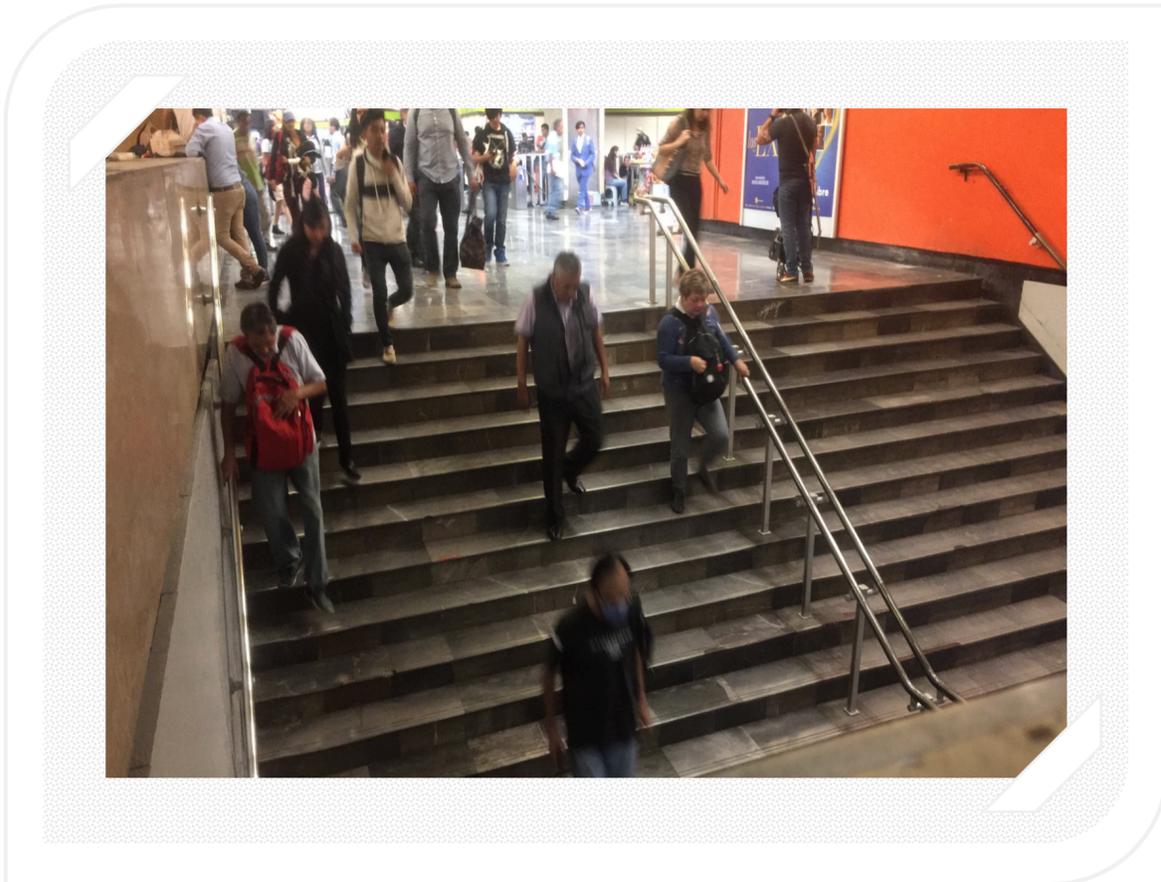


Ilustración 35 Estación Zapata\_Escaleras línea 3  
Fuente: Visita técnica (2018).

Los usuarios utilizan las escaleras del lado derecho, aunque las escaleras del carril derecho se encuentren parcialmente despejadas, ocasionando una reducción y ligera congestión de usuarios que descienden (ver Ilustración 36).

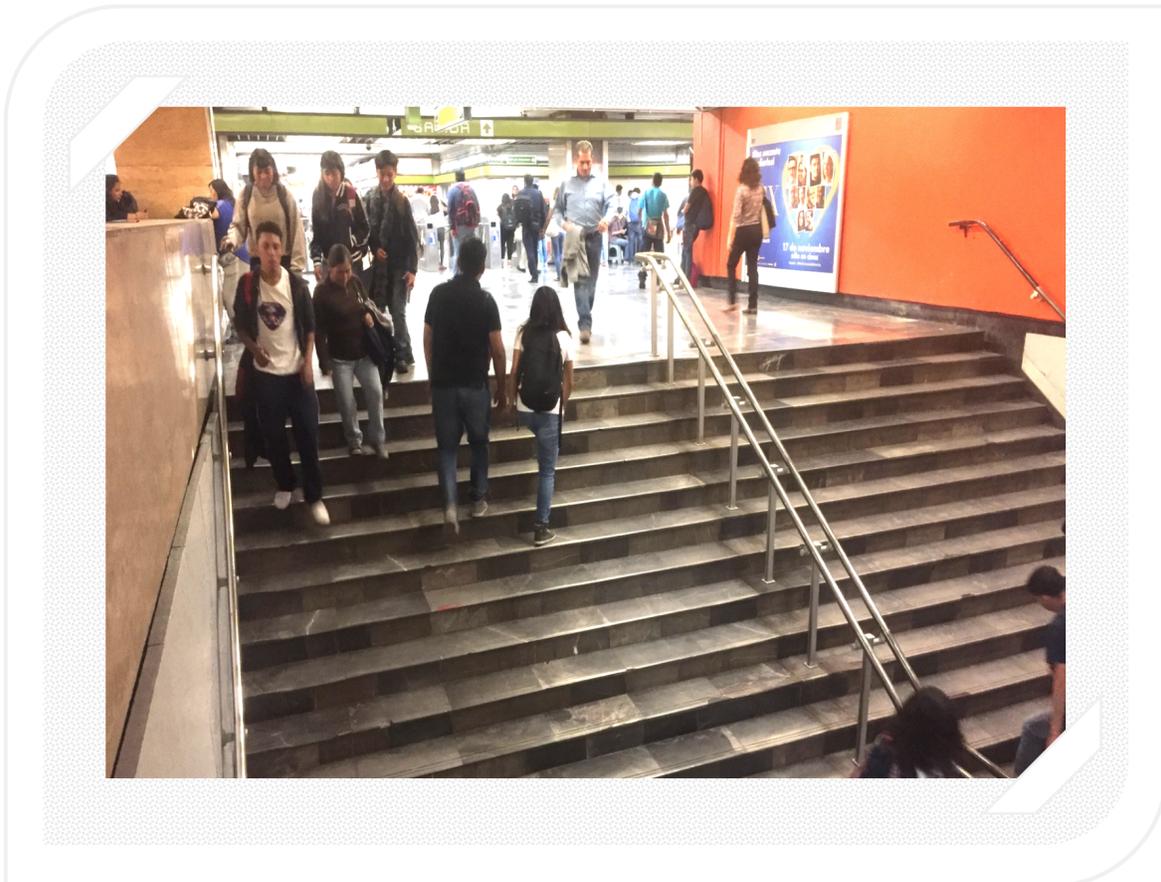


Ilustración 36 Estación Zapata\_Escaleras línea 3.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Otras de los comportamientos inapropiados de los usuarios son la obstrucción (detenerse a leer el celular), distracción (usar el móvil mientras desciende las escaleras) o maniobras (amarrar las agujetas) en las escaleras puede representar un riesgo para los usuarios que se encuentren cerca (ver Ilustración 37).

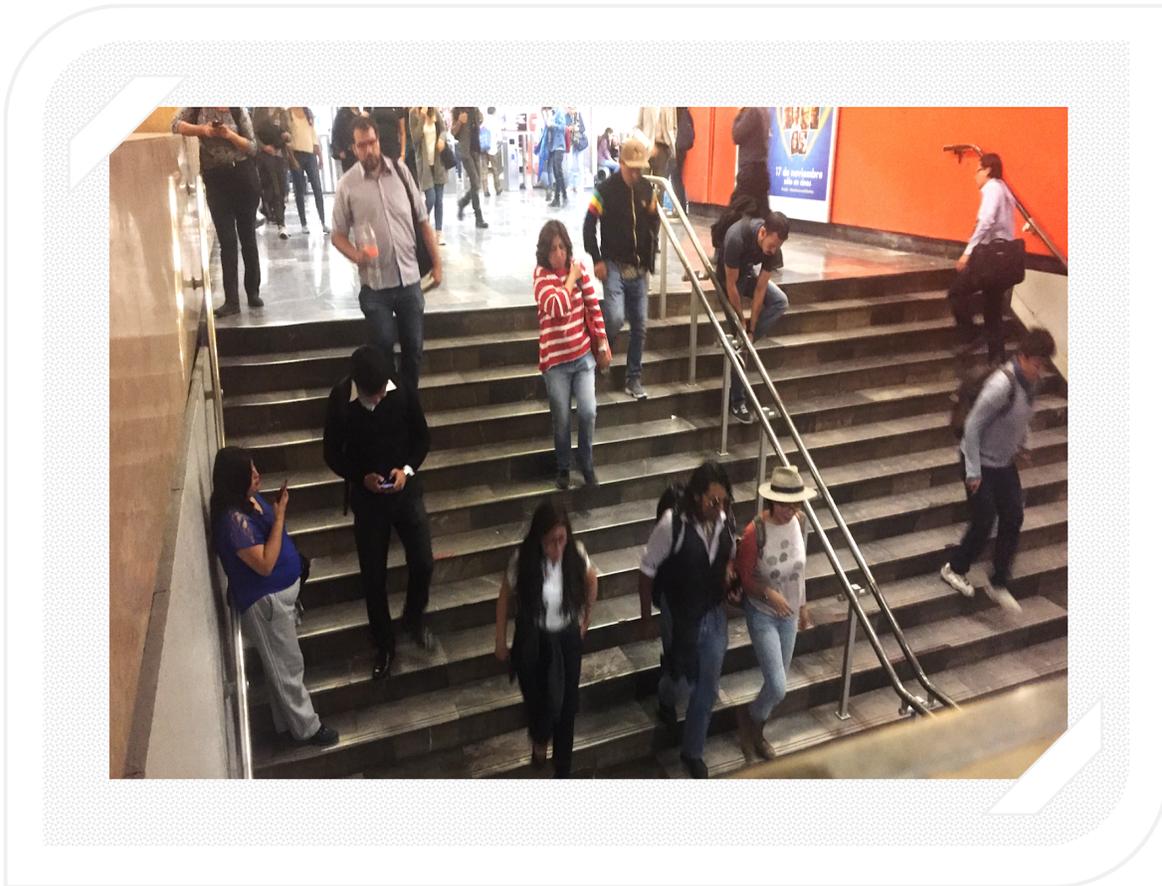


Ilustración 37 Estación Zapata\_Usuarios detenidos en escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En las escaleras eléctricas que ascienden de la línea 12 – Dirección Mixcoac, los usuarios hacen uso del espacio para detenerse, reduciendo el espacio para que continúe la afluencia de usuarios que están dejando las escaleras eléctricas. También podemos notar usuarios con bastón, usuarios con niños y personas que transporta un carrito de mandado (ver Ilustración 38).

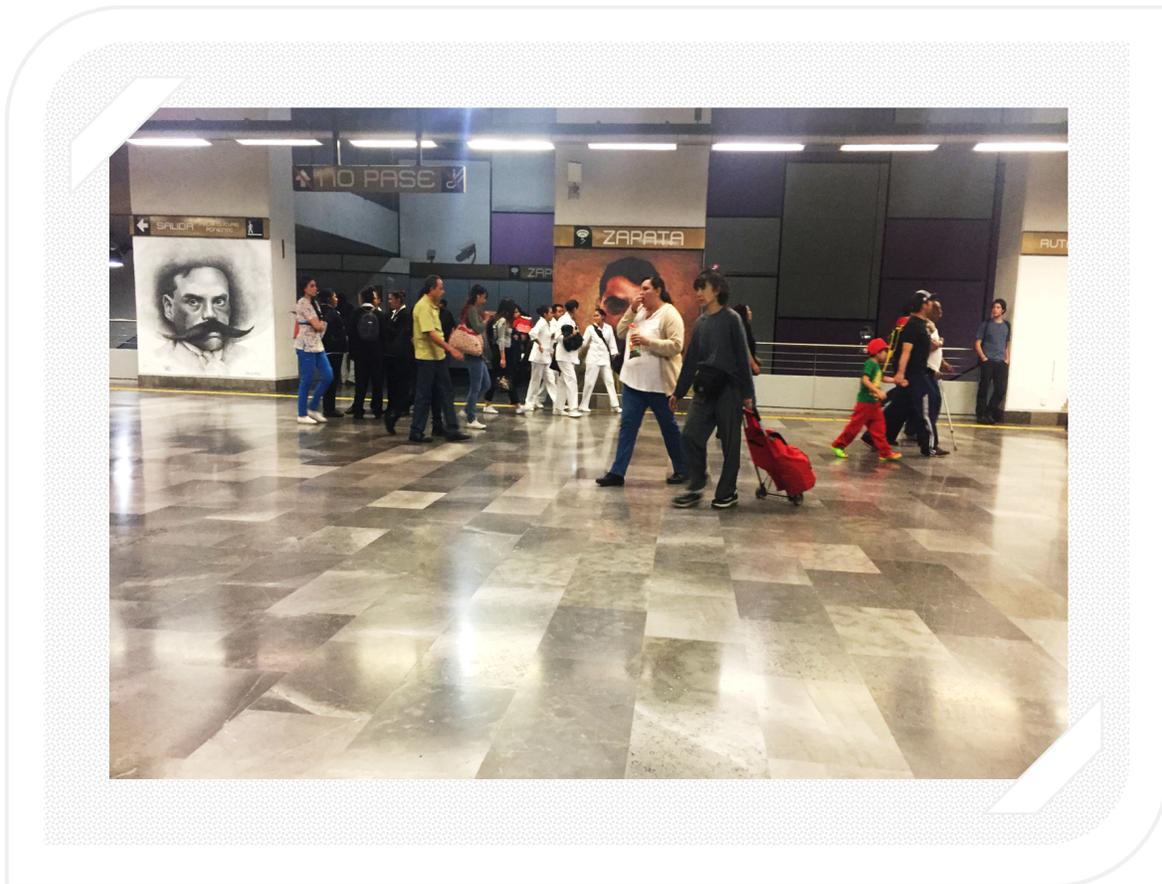


Ilustración 38 Estación Zapata\_Congestión de usuarios en las escaleras  
Fuente: Visita técnica (2018).

La estación Zapata ha sido declarada el Museo de la Caricatura, en el pasillo principal de la línea 12 se encuentran caricaturas de E. Zapata en los muros y en uno de los pasillos que conectan con la línea 3 se puede apreciar caricaturas en techo, muros y paredes, es un atractivo visual donde los usuarios no pierden oportunidad para voltear, observar o tomar fotografías a las caricaturas expuestas, aunque esto significa que haya una disminución o alto total del flujo de usuarios (ver Ilustración 39).

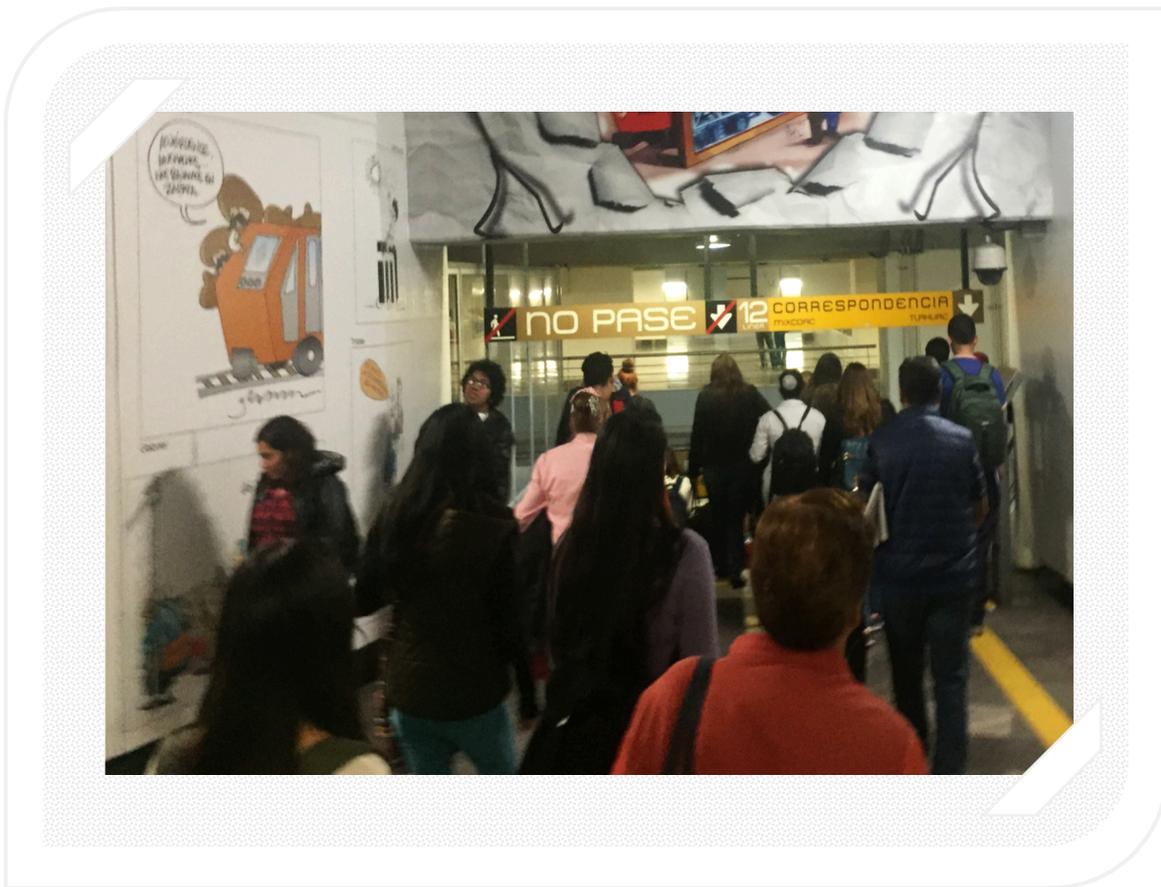


Ilustración 39 Estación Zapata\_Usuarios distraídos por las caricaturas.  
Fuente: Visita técnica (2018).

#### 1.3.2.4. Estación Guerrero.

La estación Guerrero forma parte del grupo de las 25 estaciones que se caracterizan por conectar con dos líneas en un mismo punto de la red del STC. Esta estación tiene correspondencia con la línea 3 y la línea B. Debido a una alta tasa de usuarios en los días laborables entre semana, se han implementado mecanismos para guiar y dosificar el tránsito, como son carriles y señalamientos especiales para el tránsito de lunes a viernes de 06:00 a 10:00 horas (ver Ilustración 40).

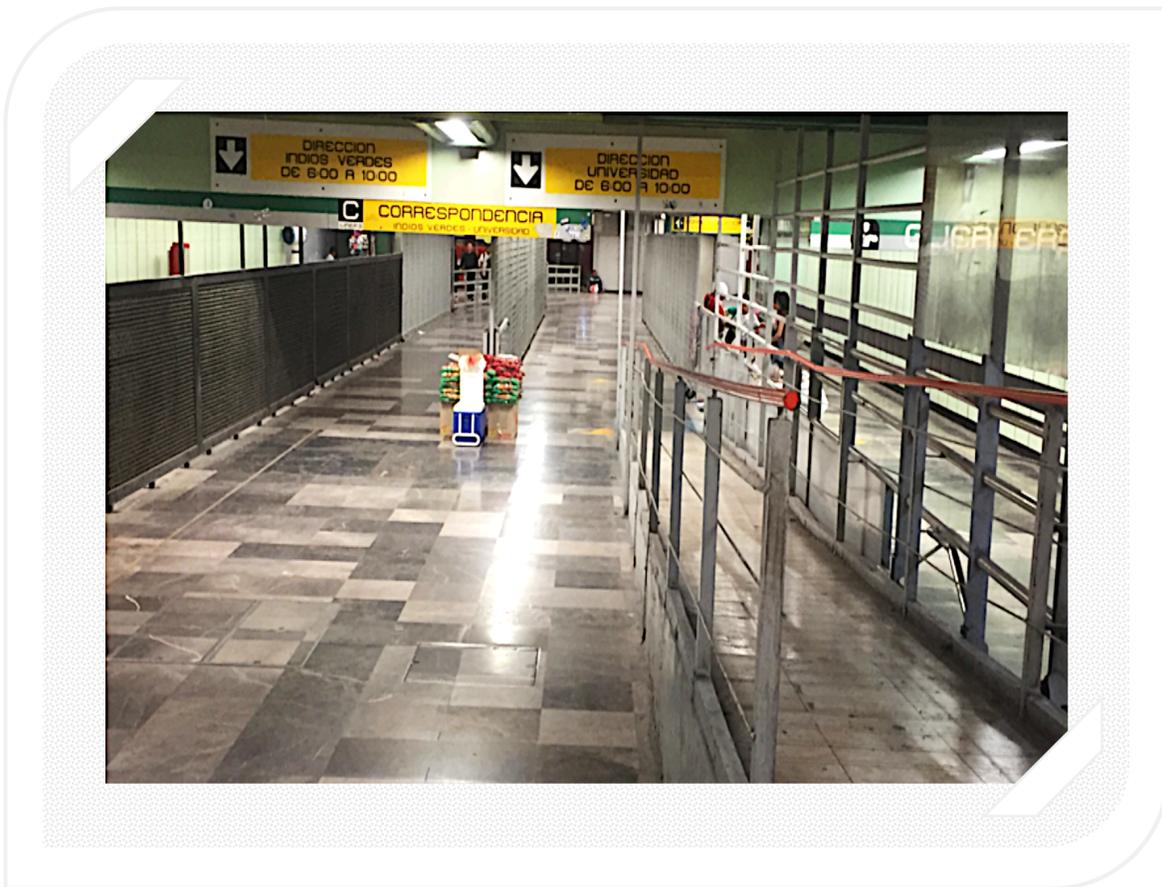


Ilustración 40 Estación Guerrero\_Flujo definido para la hora pico.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En algunas áreas de la estación Guerrero se encuentra señalización en techo y piso, también se puede observar que el pasillo que conecta de Línea 3 a Línea B es un cuello de botella ya que se encuentra parcialmente obstruido por comercio y mobiliario en desuso (ver Ilustración 41).

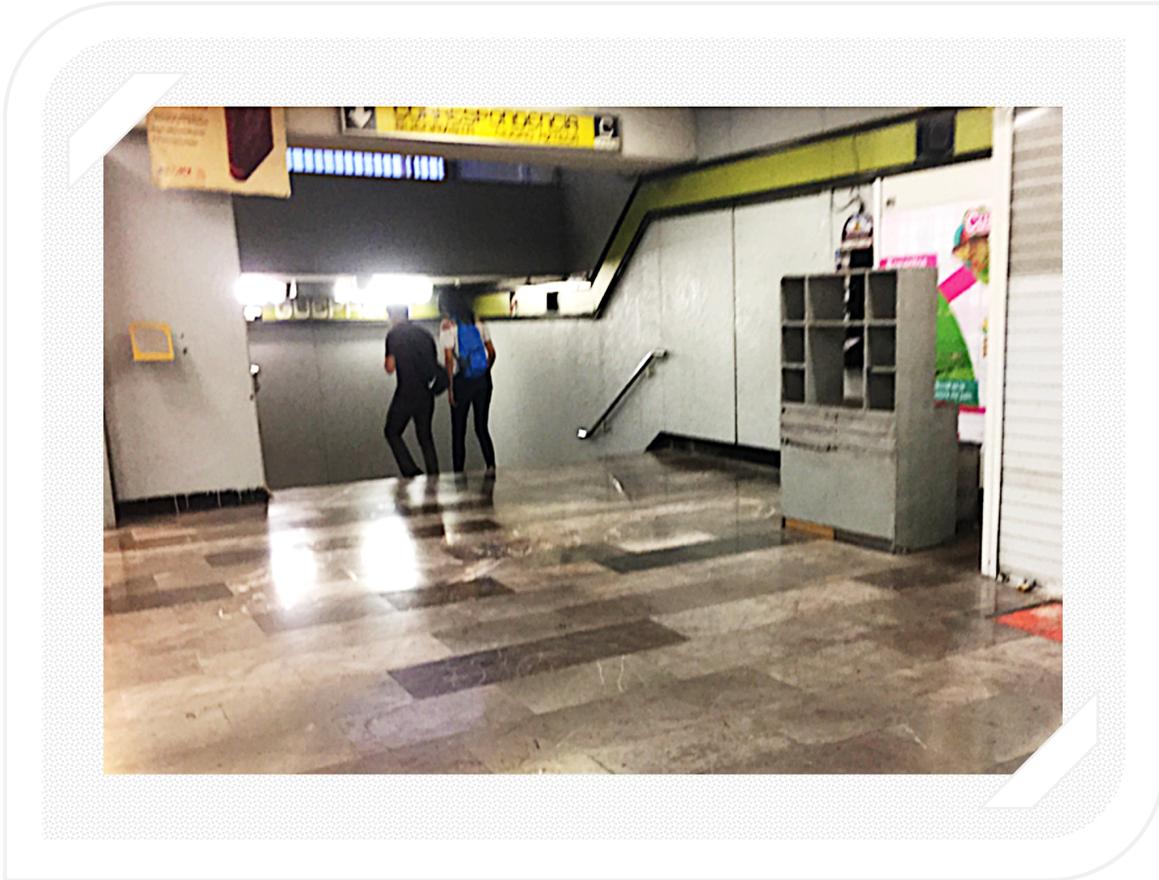


Ilustración 41 Estación Guerrero\_Pasillo de conexión entre línea 3 y línea B.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Para guiar y delimitar los carriles, se fijaron algunas vallas metálicas y se colocaron otras vallas de plástico como complemento temporal (ver Ilustración 42).

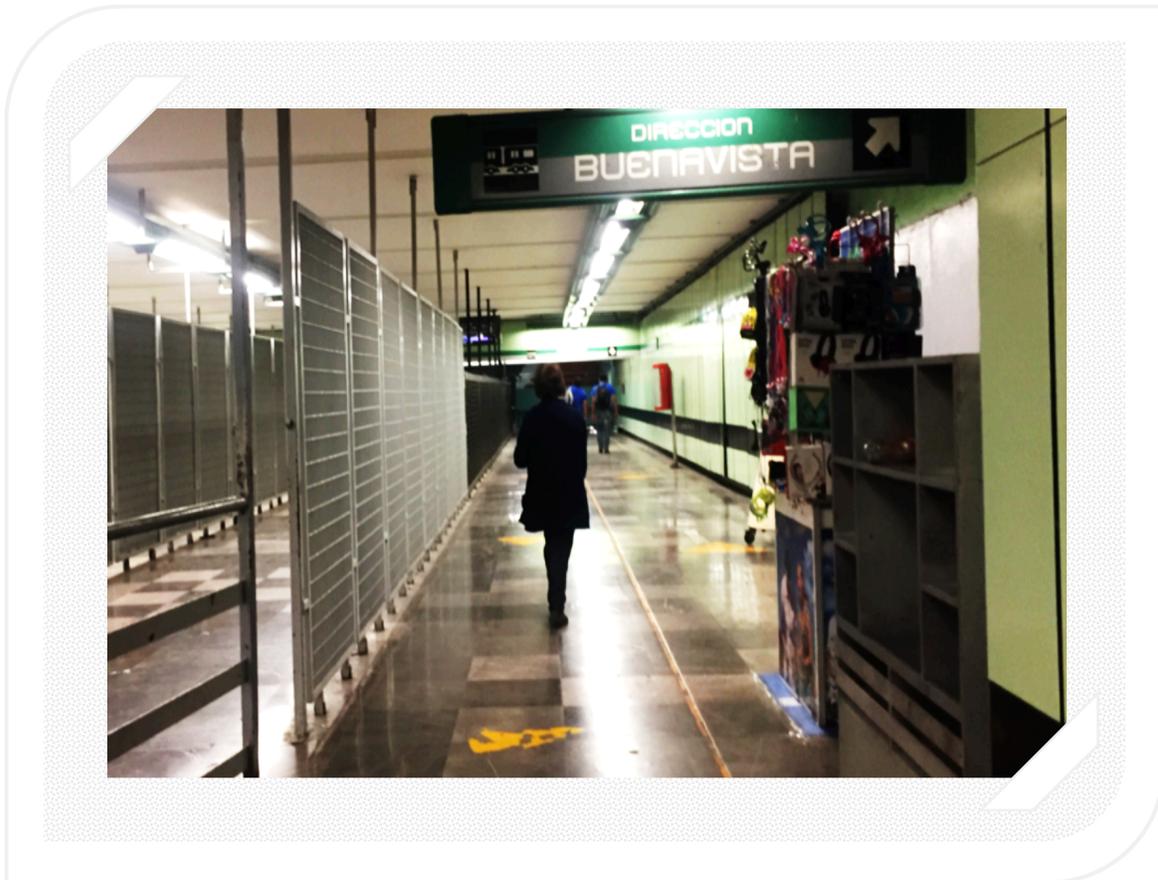


Ilustración 42 Estación Guerrero\_Carriles delimitados.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En hora pico se tiene dos escaleras disponibles para conectar de línea B a Línea 3, en los extremos del pasillo principal de la Línea B, en cada arribo de los trenes de la línea B se congestiona el área de escaleras, donde los usuarios deben subir 18 escalones, un descanso, bajar cinco escalones o pasar sobre una rampa y continuar por los pasillos centrales que dirigen a la Línea 3 Dirección Universidad (Ilustración 43 y 44).

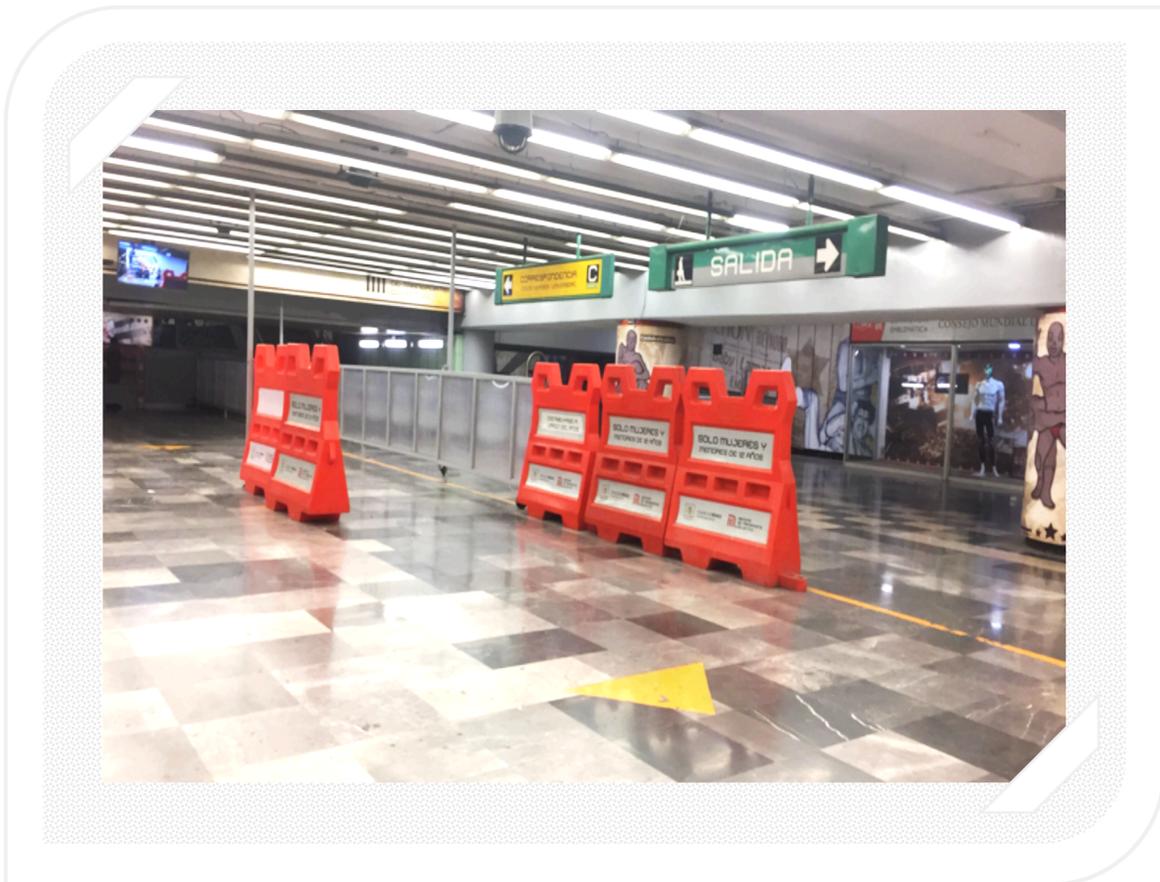


Ilustración 43 Estación Guerrero\_Carriles delimitados temporalmente.  
Fuente: Visita técnica (2018).

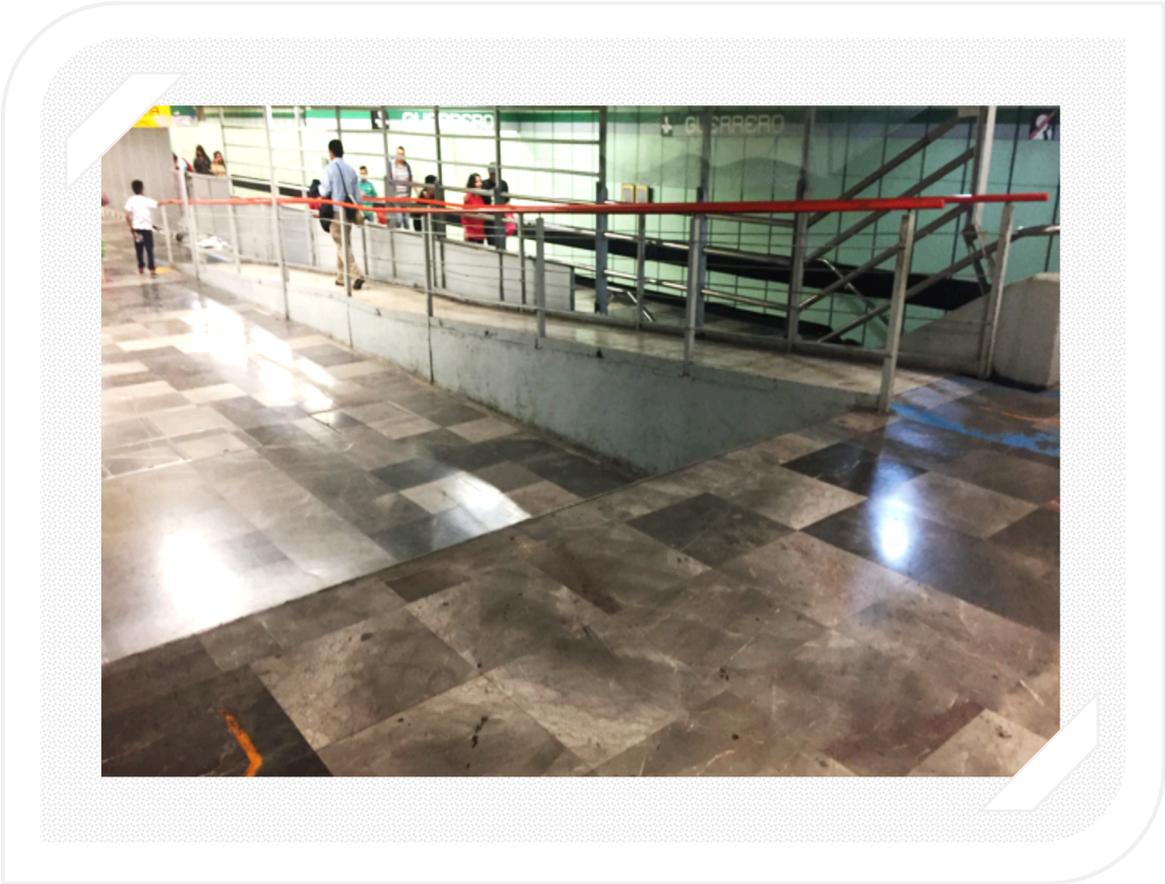


Ilustración 44 Estación Guerrero\_Rampa en la sección de transferencia.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Cerca de la zona de torniquetes en la línea B, se colocaron señalamientos que dirigen a la salida y de cada lado se encuentra la señalización para los usuarios que entren a la estación de la Línea B (ver Ilustración 45).

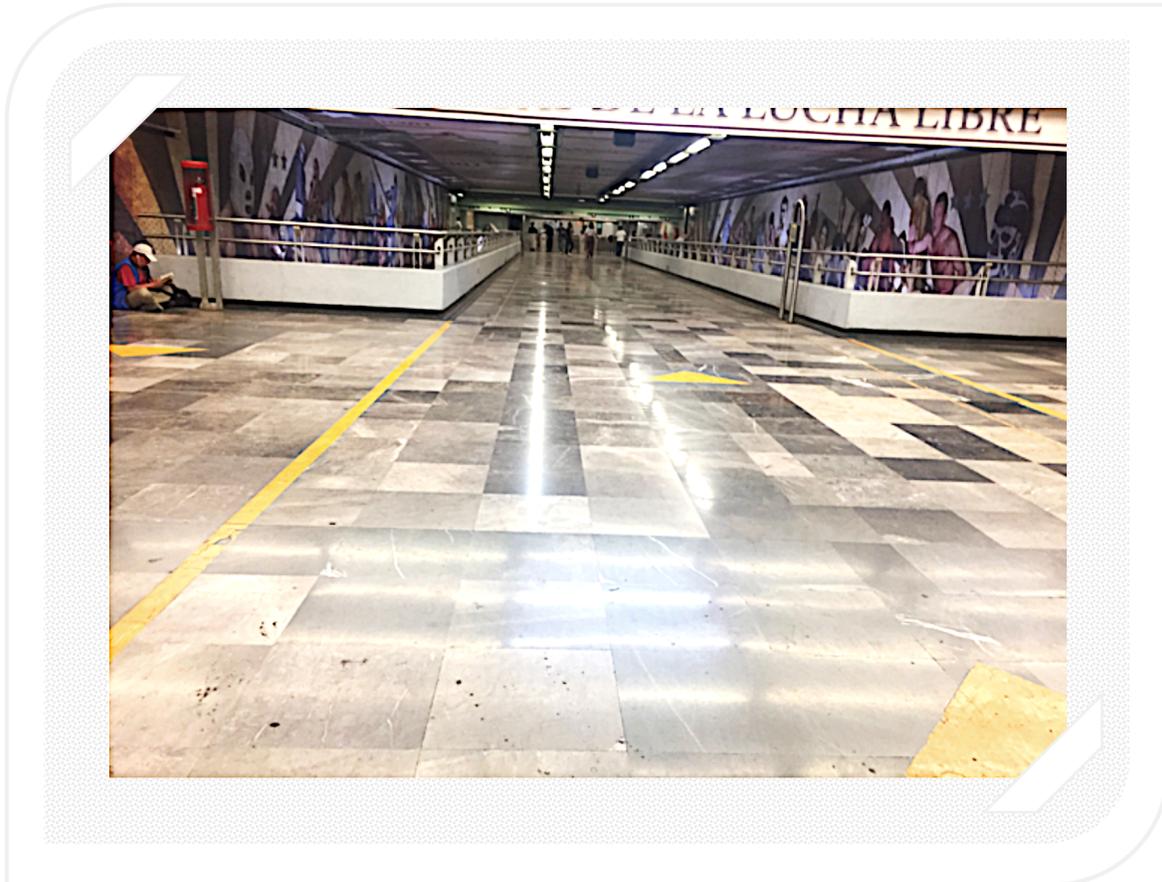


Ilustración 45 Estación Guerrero\_Señalización en piso.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Dentro de la estación Guerrero en línea 3, cuenta con 2 caminos ambos con escalones de ascenso y descenso para ir de Dirección Indios Verdes a Universidad y viceversa, sin embargo, solo en uno de los caminos se encuentra una escalera eléctrica que se utiliza comúnmente para el ascenso (ver Ilustración 46).

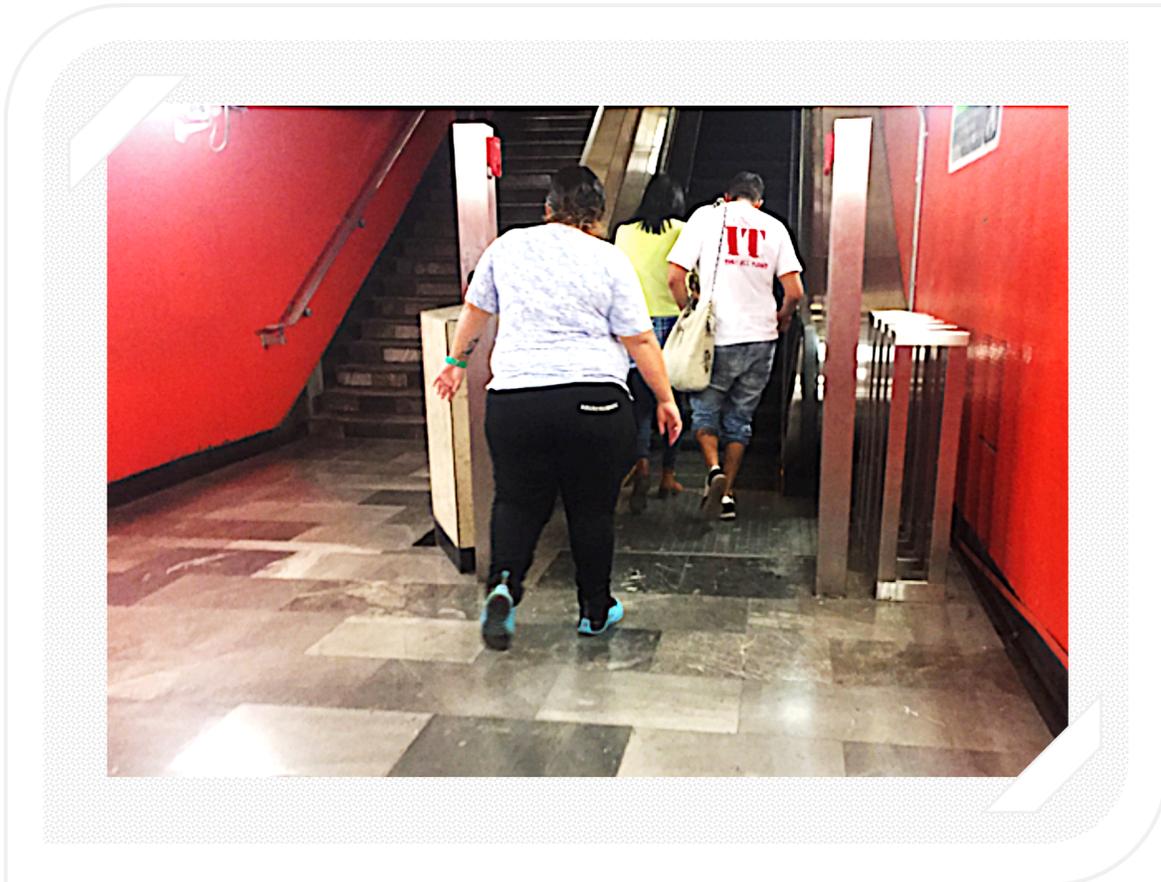


Ilustración 46 Estación Guerrero\_Escaleras Eléctricas.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Como parte de las medidas de contingencia ante la alta demanda en la estación Guerrero en la hora pico (de 06:00 a 10:00 hrs.), personal del metro supervisa la distribución de los usuarios a lo largo del andén Dirección Universidad (andén con mayor volumen de arribos dentro de la estación Guerrero en hora pico), y apoya en los cagones centrales para un correcto cierre de puertas (ver Ilustración 47).

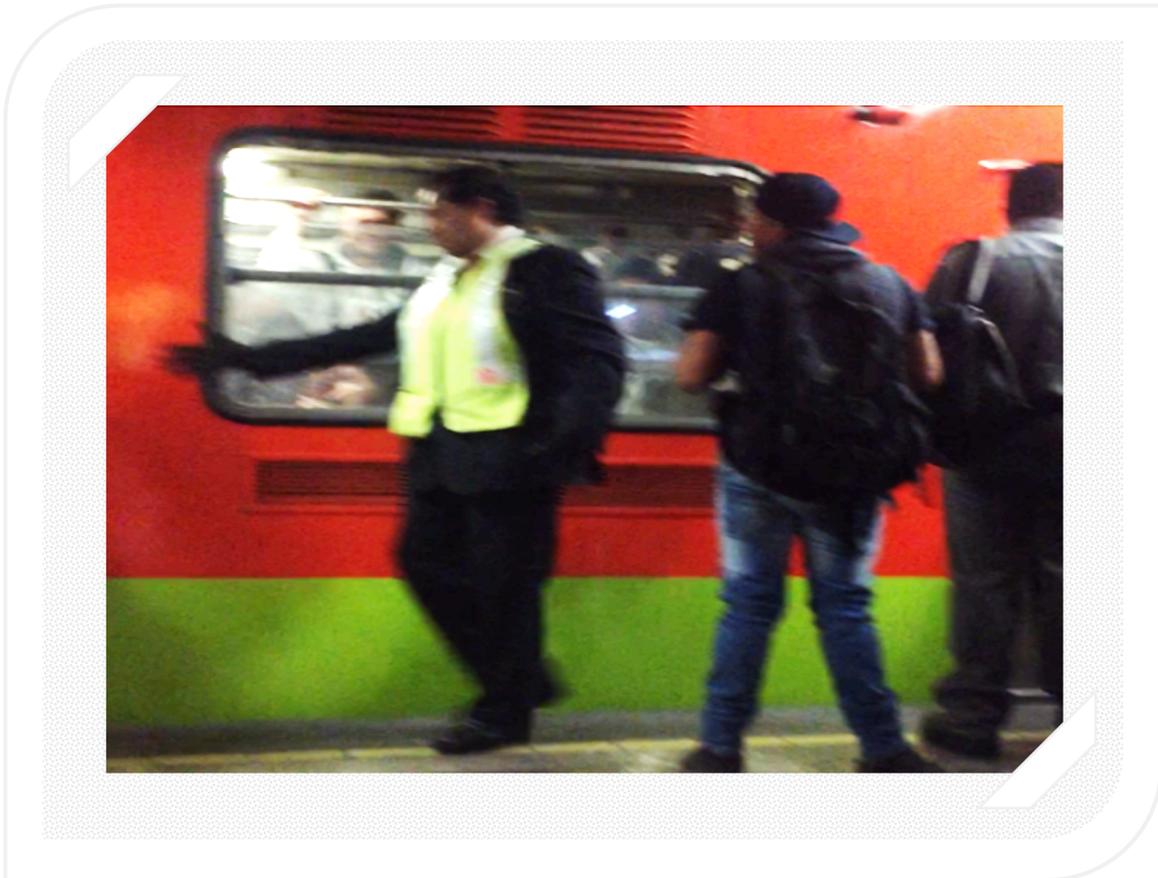


Ilustración 47 Estación Guerrero\_Personal de apoyo en andén.  
Fuente: Visita técnica (2018).

En hora pico el andén con Dirección a Universidad tiene alta demanda de usuarios, pero en cada arribo de un tren poco son los que pueden ingresar en alguno de los vagones, por lo que el andén tiende a congestionarse cada 20 minutos (aprox.), y como acción por parte del equipo de operación del STC gestionan el arribo de un tren vacío (ver Ilustración 48).



Ilustración 48 Estación Guerrero\_Congestión de usuarios en el andén.  
Fuente: Visita técnica (2018).

También se identificó en esta estación a usuarios que comúnmente

transportan una o dos bolsos o mochila, u objetos voluminosos (ver Ilustración 49, 50 y 51).

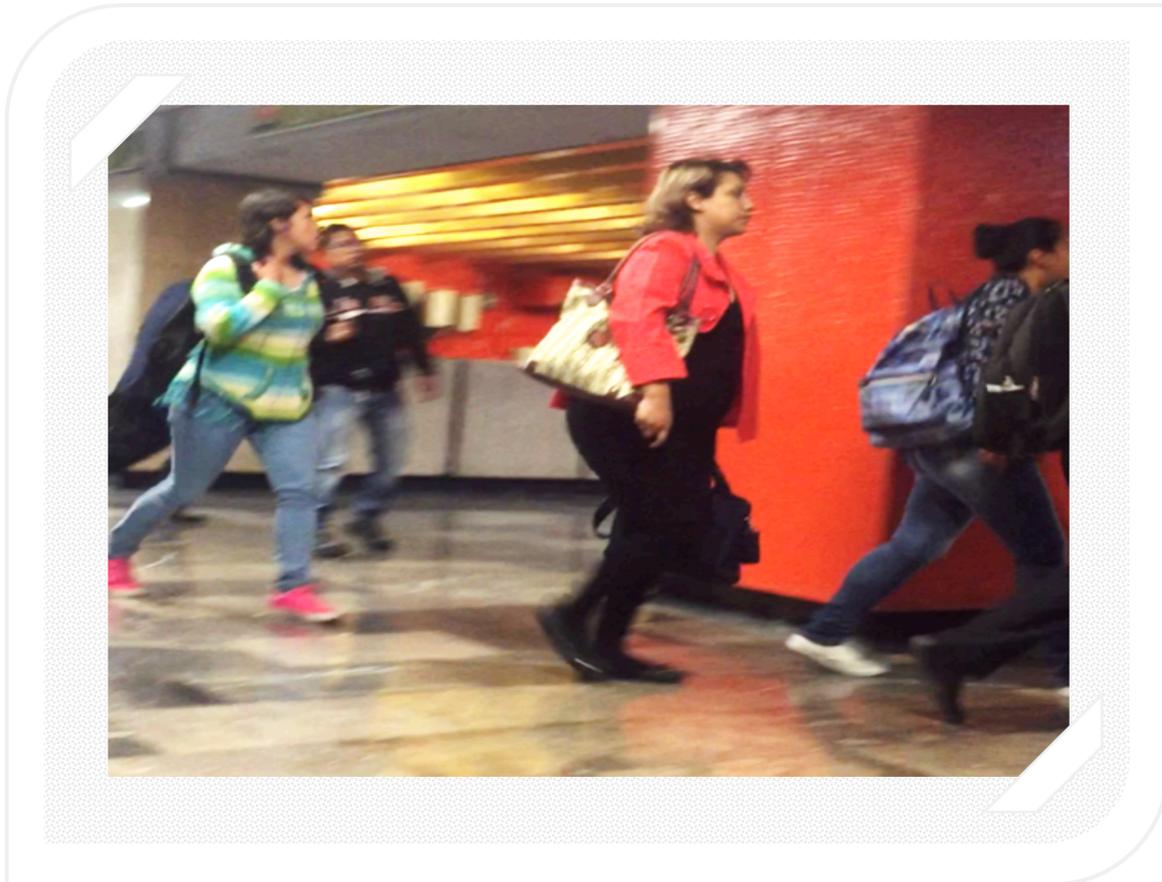


Ilustración 49 Estación Guerrero\_Usuarios transportando mochilas y bolsos.  
Fuente: Visita técnica (2018).

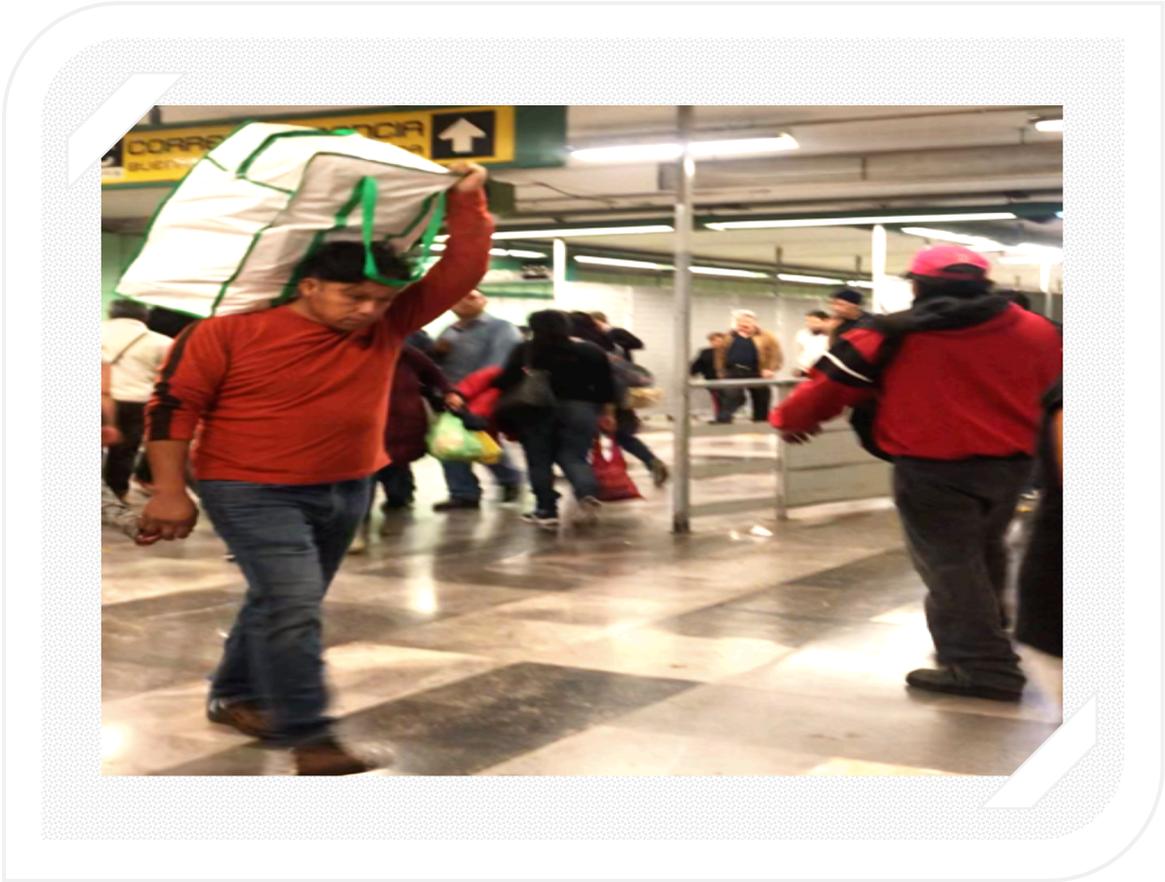


Ilustración 50 Estación Guerrero\_Usuario con objeto voluminoso.  
Fuente: Visita técnica (2018).

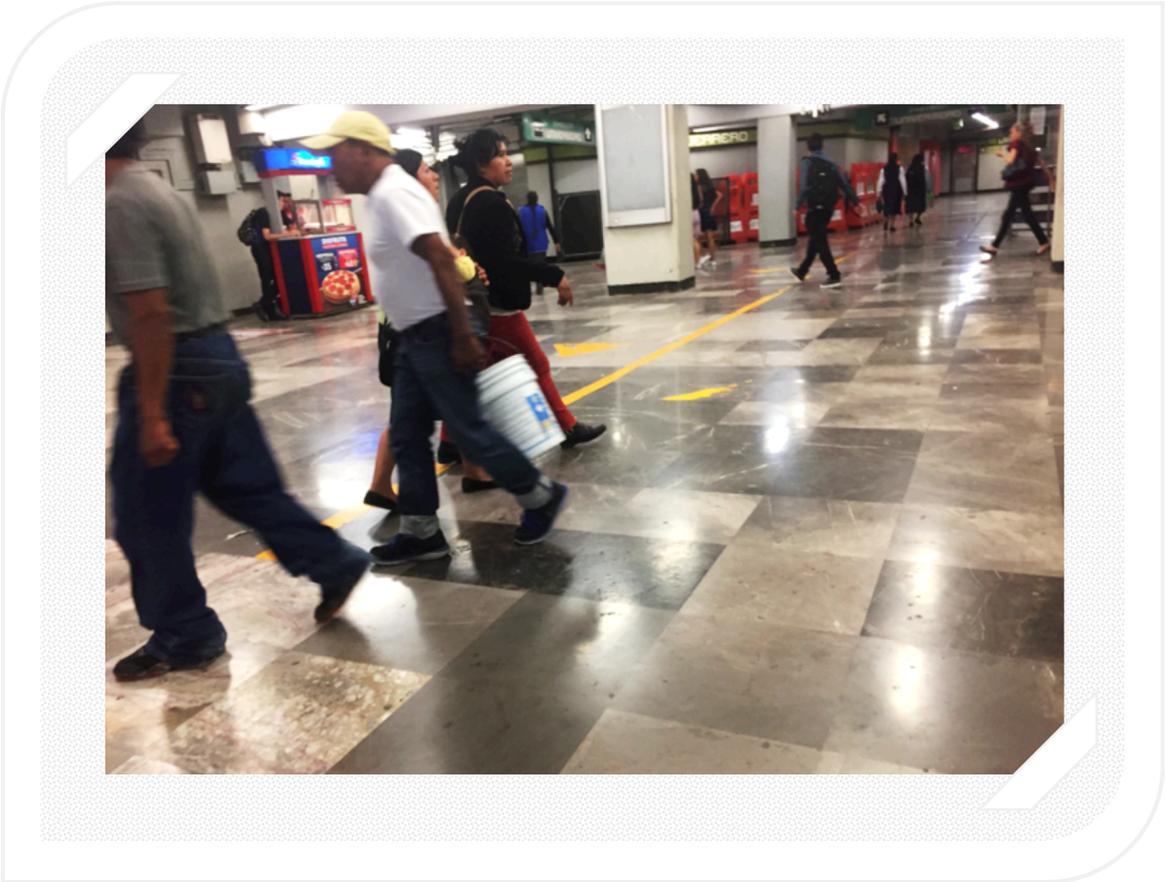


Ilustración 51 Estación Guerrero\_Usuario con cubeta.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Aunque existe la señalización para indicar la correspondencia y las direcciones, para algunos usuarios es necesario hacer una pausa para definir el camino que deben seguir para llegar a su destino (ver Ilustración 52).

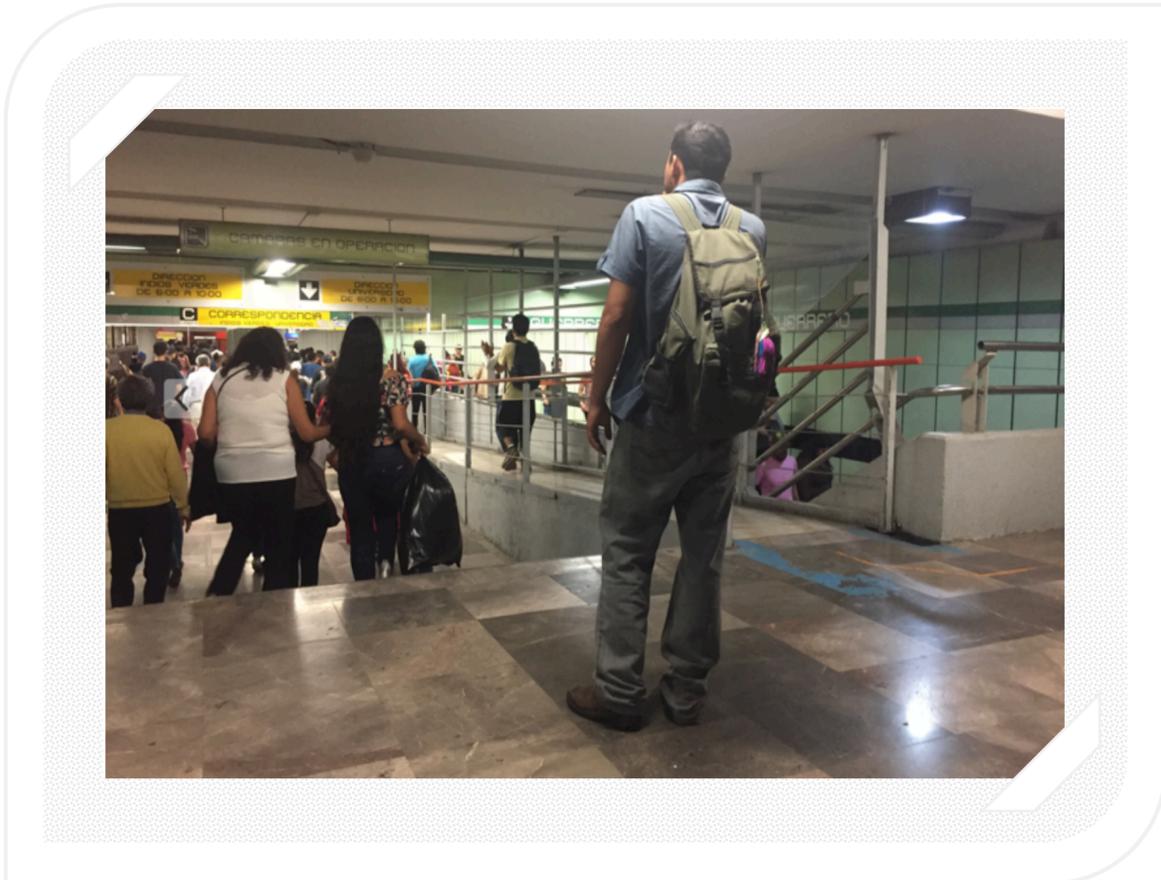


Ilustración 52 Estación Guerrero\_Usuario leyendo señalizaciones.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Dentro de la visita técnica a la estación Guerrero se tuvo la oportunidad de observar que algunos usuarios presentaban alguna limitación o capacidad diferente, requieren hacer uso del servicio que ofrece el STC, sin embargo, las condiciones no resultan favorable para su transferencia de una línea debido al esfuerzo adicional que tiene que hacer para subir escaleras, para después hacer uso de la rampa y continuar entre otros usuarios que avanzan más rápido. Lo usuarios pueden ser mayores de edad, viajar con el apoyo de muletas, y además llevar consigo una mochila (ver Ilustración 53 y 54), o pueden ir en sillas de ruedas con acompañantes (ver Ilustración 55) e incluso pueden tener discapacidad visual (ver Ilustración 56).

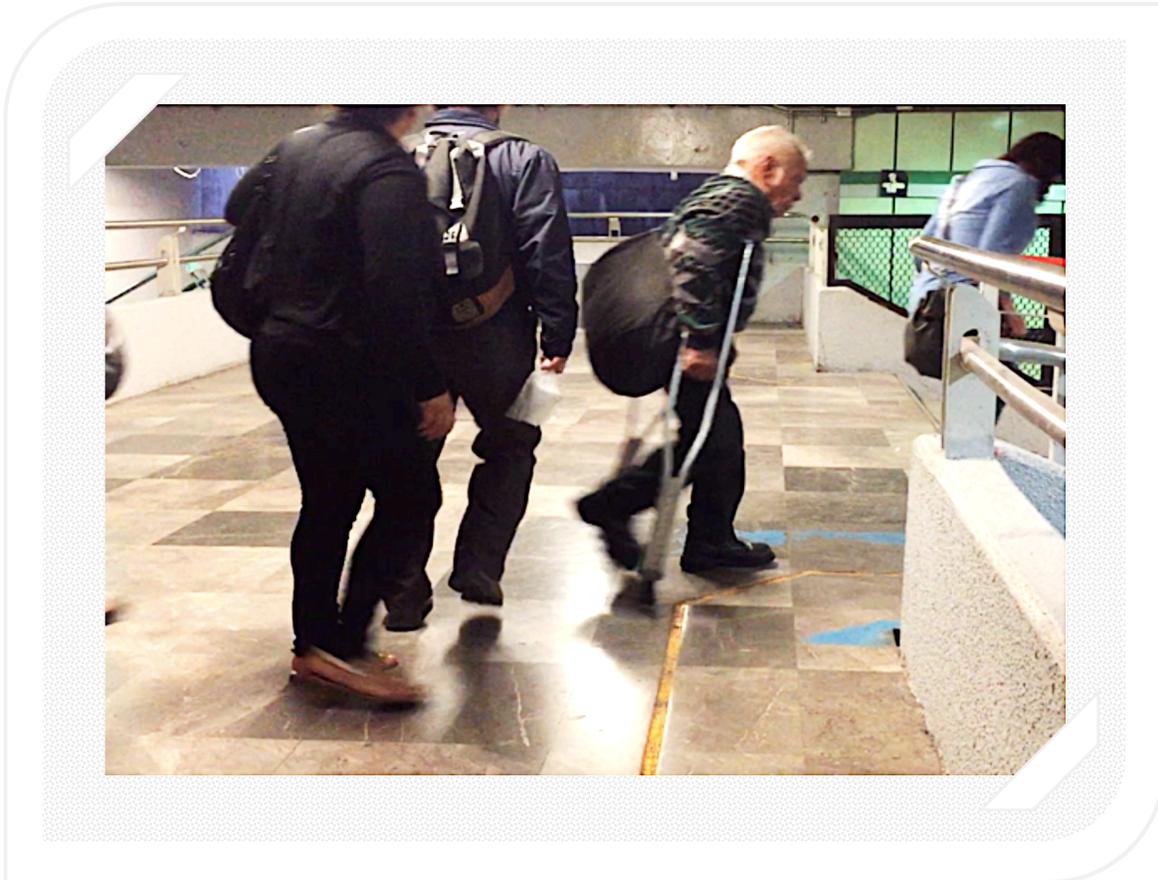


Ilustración 53 Estación Guerrero\_Usuario con muletas.  
Fuente: Visita técnica (2018).

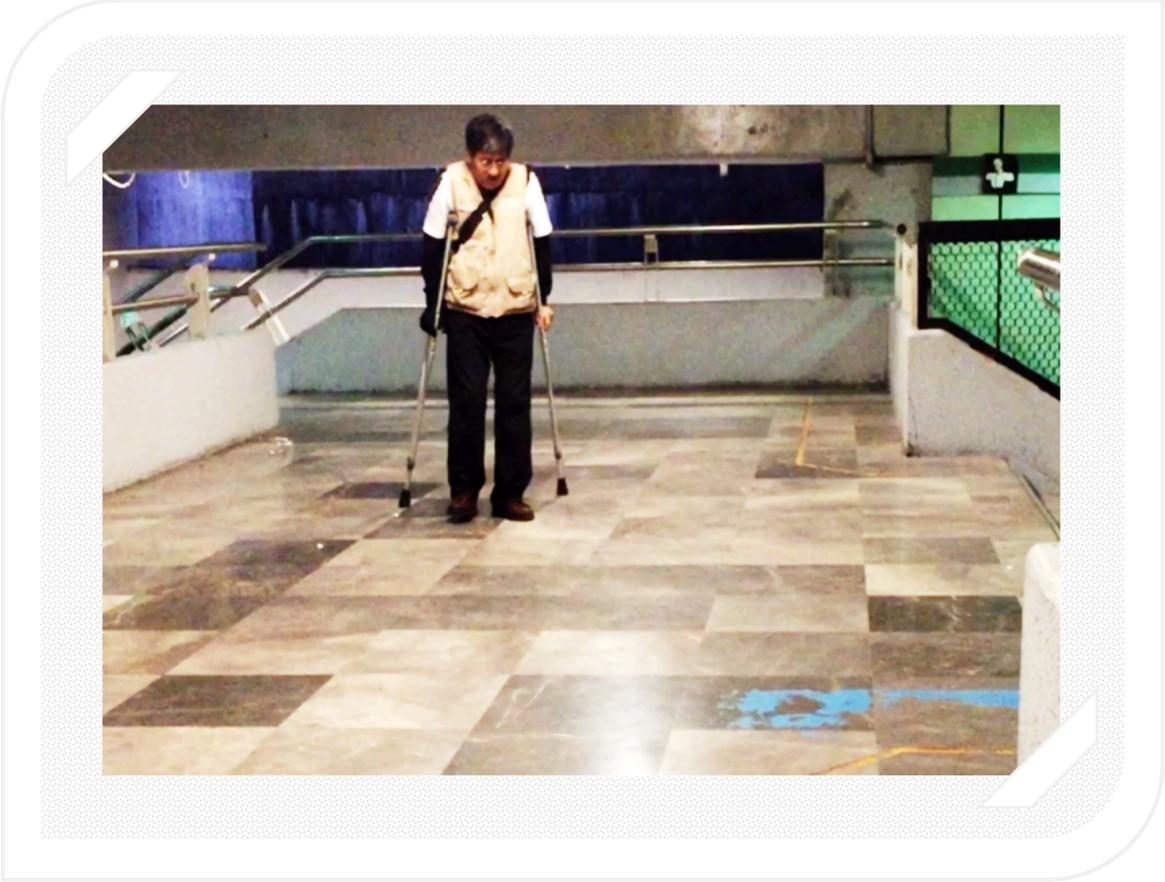


Ilustración 54 Estación Guerrero\_Usuario con muletas.  
Fuente: Visita técnica (2018).

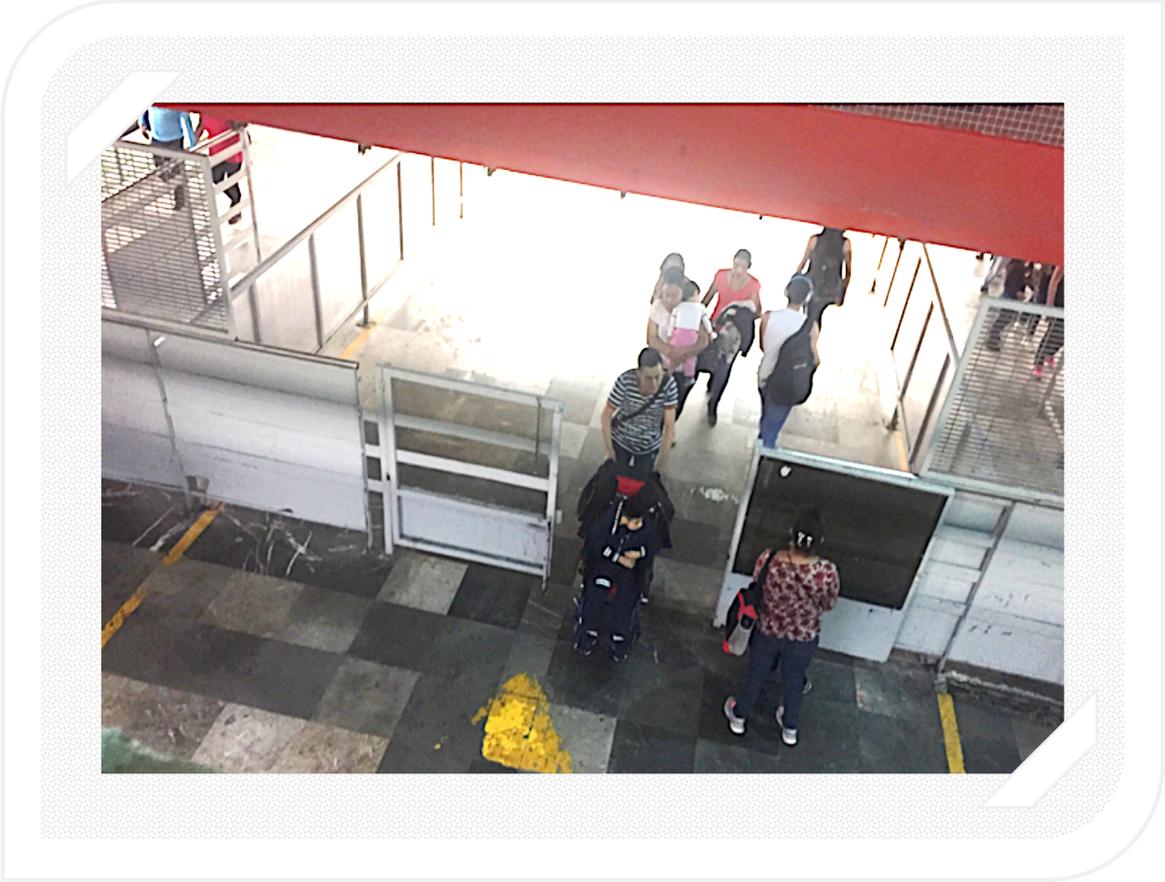


Ilustración 55 Estación Guerrero\_Usuario con silla de ruedas.  
Fuente: Visita técnica (2018).

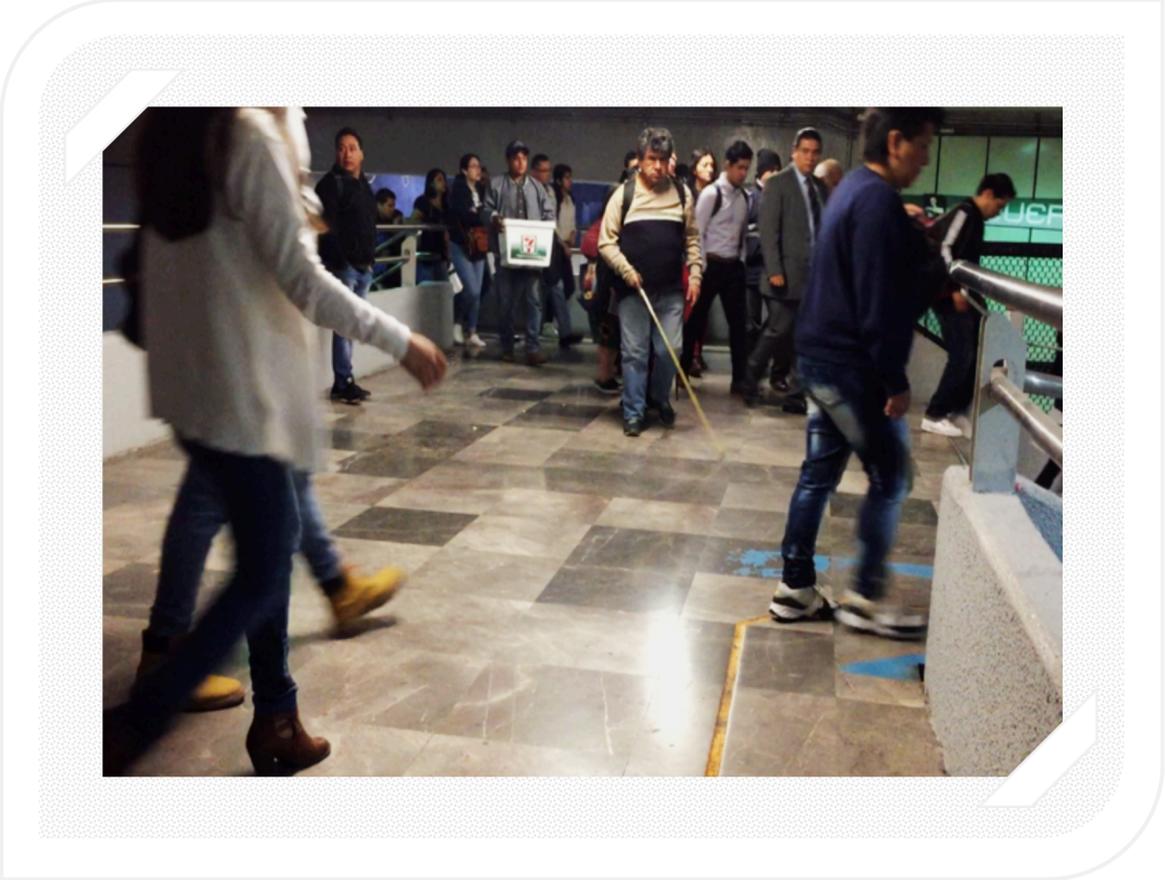


Ilustración 56 Estación Guerrero\_Usuarios con discapacidad visual.  
Fuente: Visita técnica (2018).

Dentro de las instalaciones de la estación Guerrero se encuentran comercios establecidos (Ilustración 57, 58 y 59) pero también se puede encontrar el negocio informal (Ilustración 60 y 61). Sin importar el tipo de comercio, este tipo de actividad suele ocupar parte del espacio que los usuarios ya sea con motivo de la infraestructura de su negocio, mercancía o por el hecho de realizar la venta como se puede observar en las siguientes seis ilustraciones.



Ilustración 57 Estación Guerrero\_Módulos comerciales.  
Fuente: Visita técnica (2018).

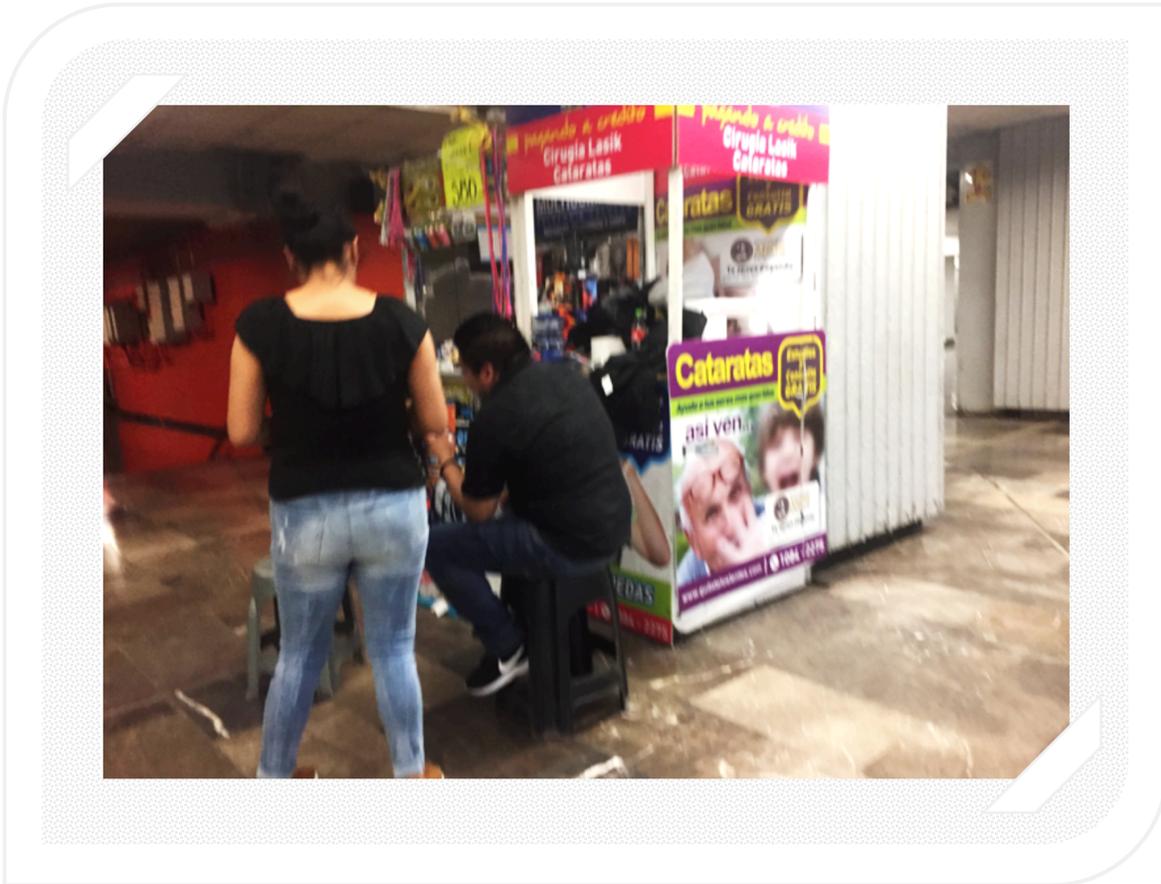


Ilustración 58 Estación Guerrero\_Comercio a pie de escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

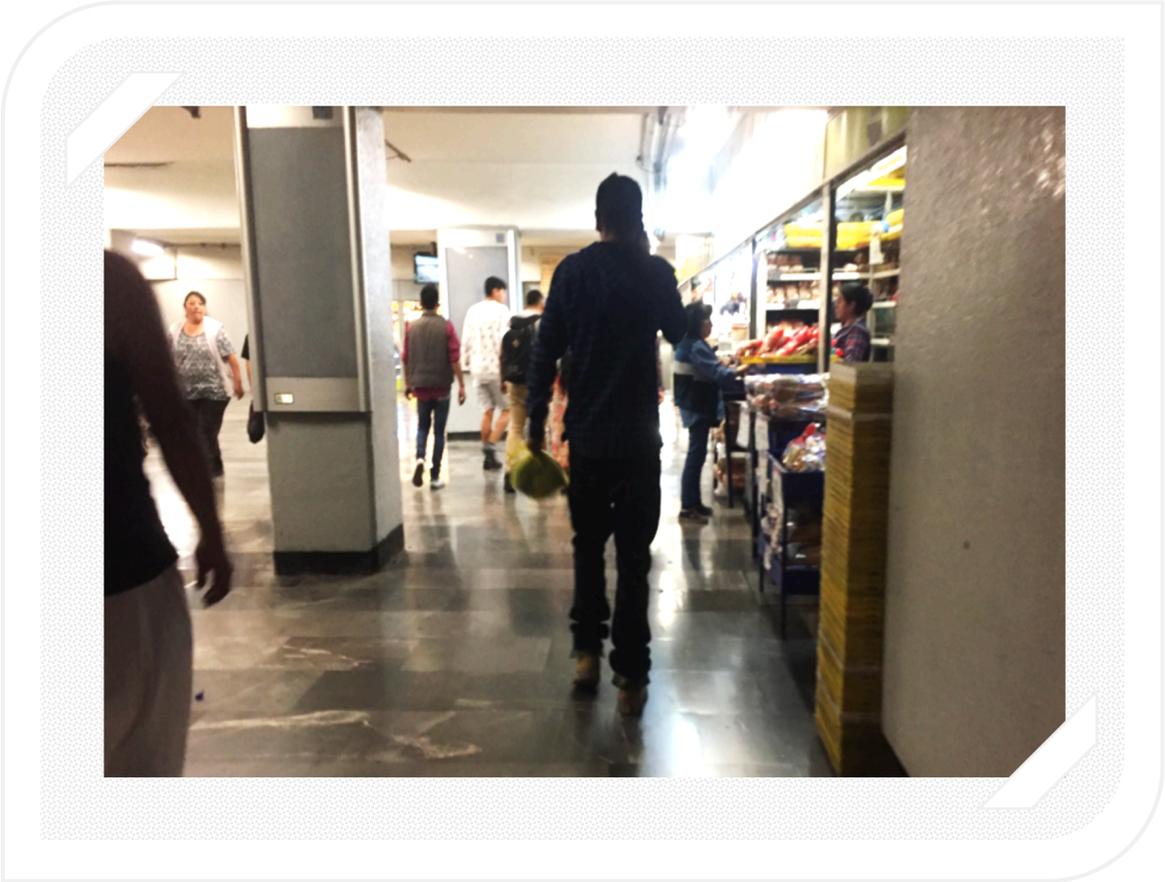


Ilustración 59 Estación Guerrero\_Usuaría detenida en comercio.  
Fuente: Visita técnica (2018).

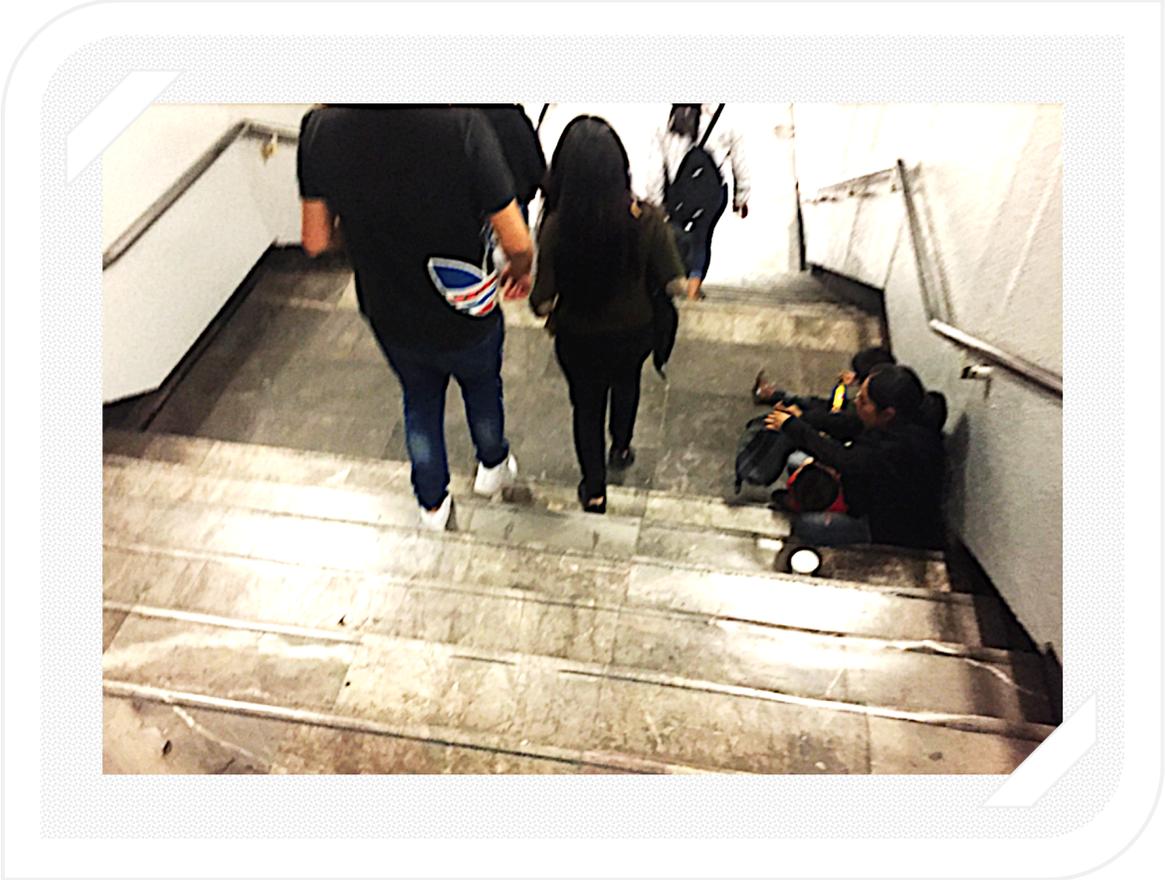


Ilustración 60 Estación Guerrero\_Personas sentadas en escaleras.  
Fuente: Visita técnica (2018).

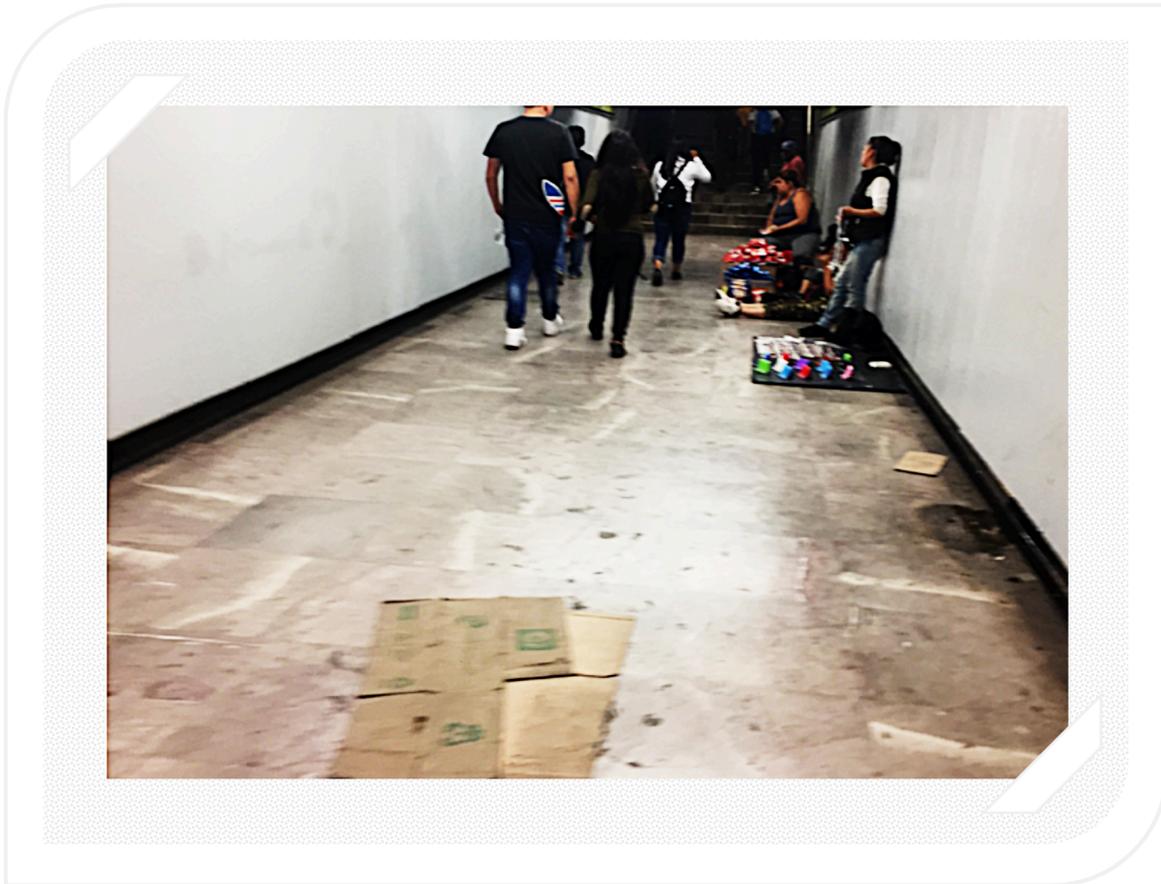


Ilustración 61 Estación Guerrero \_Comerciantes en pasillo de transferencia  
Fuente: Visita técnica (2018).

### **Movilidad de Usuarios y mercancías implícitas**

La razón de ser del STC es facilitar la movilidad de las personas dentro de Ciudad de México y parte de la Zona Metropolitana (la mayor parte de las estaciones de la Línea A y de la Línea B); sin embargo, es muy común ver que los usuarios hacen uso del servicio para trasladar algunos bienes, ya sea mochilas, bolsos, equipaje.

Transportación que se ofrece a los usuarios conlleva implícitamente un traslado de objetos/mercancías

Considerando la alta demanda y desventajas que presenta la estación Guerrero, se ha considerado realizar un análisis FODA (Ilustración 62).



Ilustración 62 Matriz FODA\_Estación Guerrero  
Fuente: Elaboración propia, (2018).

**1.4. El problema por resolver**

Derivado de las visitas técnicas, se observaron deficiencias que impiden un adecuado flujo de los usuarios dentro de las estaciones de transferencia, ya sea por falta de señalización, infraestructura limitada, la alta demanda, comercios que invaden el espacio para transitar en los pasillos o usuarios distraídos se ve afectado el flujo dentro de las instalaciones del STC, y en ocasiones poniendo en riesgo la integridad de los usuarios ya que se ocasionan colisiones constantes (por la congestión de pasajeros) en algunos puntos críticos (cuellos de botella).

## **1.5. El objetivo general**

Desarrollar un modelo de simulación basada en agentes que contribuya al entendimiento de la dinámica del flujo de pasajeros teniendo en cuenta su seguridad para reducir la congestión en zonas críticas de la Estación Guerrero del STC.

## **1.6. Los objetivos específicos**

- I. Revisar la literatura que brinde elementos para el estudio y elementos y/o herramientas para la propuesta de solución.
- II. Desarrollar un modelo de simulación que replique el comportamiento del flujo de usuarios en un horario de alta demanda en la estación Guerrero del STC (metro).
- III. Diseñar una serie de escenarios que permitan conocer el comportamiento bajo la manipulación controlada de variables y formular los distintos escenarios de cómo se comportaría el sistema.
- IV. Presentar el escenario que ayuda a la mejora del sistema y resuelva el problema, disminuyendo la congestión en puntos críticos.

## **Capítulo 2. La Revisión de la Literatura y Marco Teórico**

En el este capítulo, se consideran los temas más relevantes dentro del marco de la teoría de los sistemas de transporte como son: elemento, relaciones, componentes estructurales de las redes de transporte, los desafíos más comunes de los sistemas de transporte y la transferencia de pasajeros en el sistema Ferroviario. Antes de pasar a la sección de la revisión de la literatura, se complementará con algunos conceptos relevantes de Sistemas y de los modelos de simulación Como resultado de la revisión de la literatura, se listan algunos autores que han realizado estudios sobre la transferencia de pasajeros en los últimos años, finalmente se presentan los enfoques de simulación.

### **2.1. Sistema de transporte**

De acuerdo con Rodrigue (2017), la Geografía de Transporte a través de cada disciplina científica trata de ofrecer una perspectiva desde la cual se puede comprender e interpretar el mundo real y centra su atención en comprensión los movimientos, se centra en las ubicaciones que los generan y manejan, en las interacciones de las personas, la carga y la información que representan, así como en las infraestructuras establecidas para apoyarlos.

Como se puede observar en la ilustración 63, existen conceptos clave relacionados con la geografía del transporte, entre los cuales las redes de transporte, los nodos de transporte y la demanda de transporte están en su núcleo (formando el sistema de transporte). Están estrechamente vinculados a la geografía económica, política, regional, histórica y de población, entre otros. Varios otros conceptos, como la planificación regional, los sistemas de información, la investigación de operaciones y la teoría de la ubicación se utilizan comúnmente en la geografía del transporte, en particular como herramientas y métodos para el análisis espacial del transporte. A

un nivel más amplio, existen vínculos con varios campos principales de la ciencia, incluidas las ciencias naturales, las matemáticas y la economía (Rodríguez, 2017).

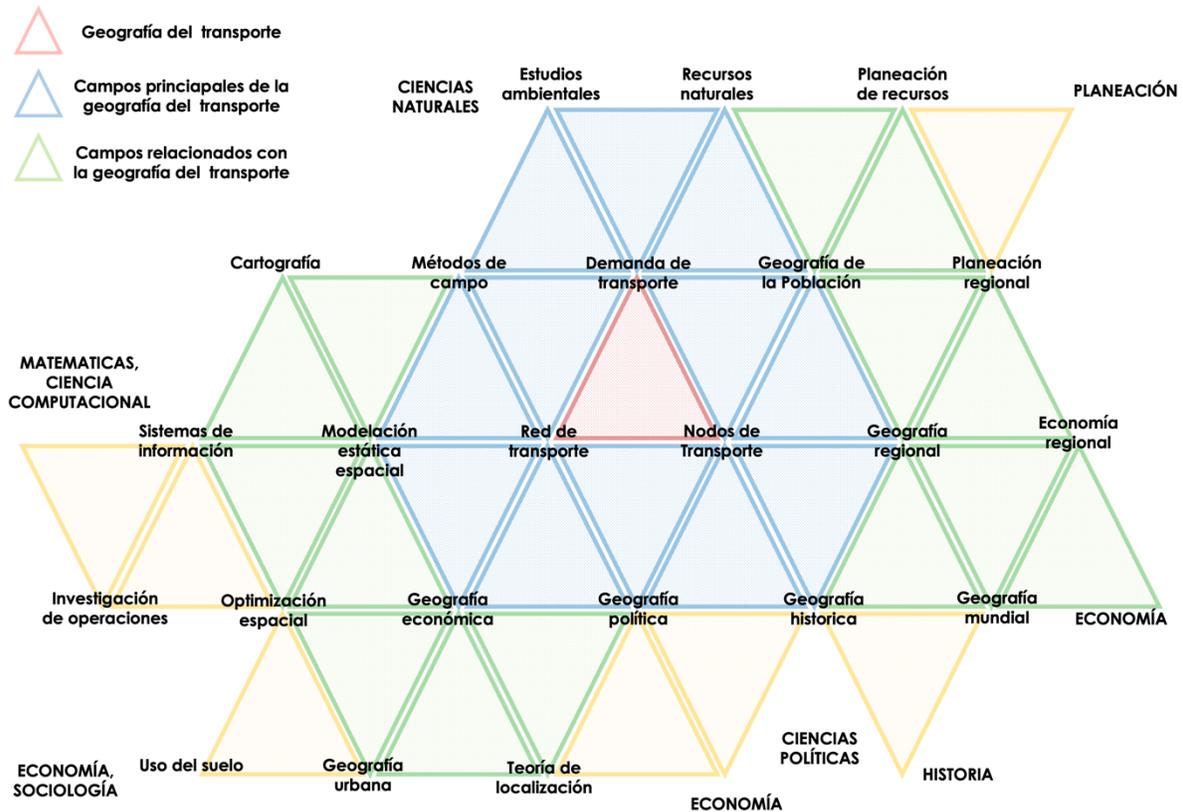


Ilustración 63. La Geografía del Transporte.

Fuente: Elaboración propia con información de Rodríguez, (2017).

Según señala Rodríguez (2017) un sistema de transporte puede conceptualizarse como el conjunto de relaciones entre nodos, redes y demanda. Estas relaciones implican ubicaciones que expresan espacialmente esta demanda, flujos entre ellos e infraestructuras diseñadas para manejar estos flujos y su diseño debe facilitar los movimientos de pasajeros, carga e información.

**Demanda.** Una función derivada del movimiento de personas carga e información.

**Nodos** Donde los movimientos son originarios, finales y en tránsito (intermediación); Puntos de entrada o salida en un sistema de transporte.

nodos locales, como ejemplo la estación de metro.

nodos globales, por ejemplo, terminales de puerto o aeropuerto.

**Redes** Compuesto por un conjunto de enlaces que expresan la conectividad entre lugares y la capacidad.

**Ubicaciones.** Nodos donde la demanda se expresa como origen, destino o punto de tránsito. El nivel de acumulación espacial de actividades socioeconómicas (producción y consumo) define conjuntamente la demanda y dónde se está produciendo esta demanda.

**Flujos** La cantidad de tráfico a través de una red, es una función conjunta de la demanda y la capacidad de los vínculos para apoyarlos.

**Infraestructuras.** Los medios de transporte, la realidad física de una red y están diseñados para manejar una demanda con características específicas de volumen y frecuencia.

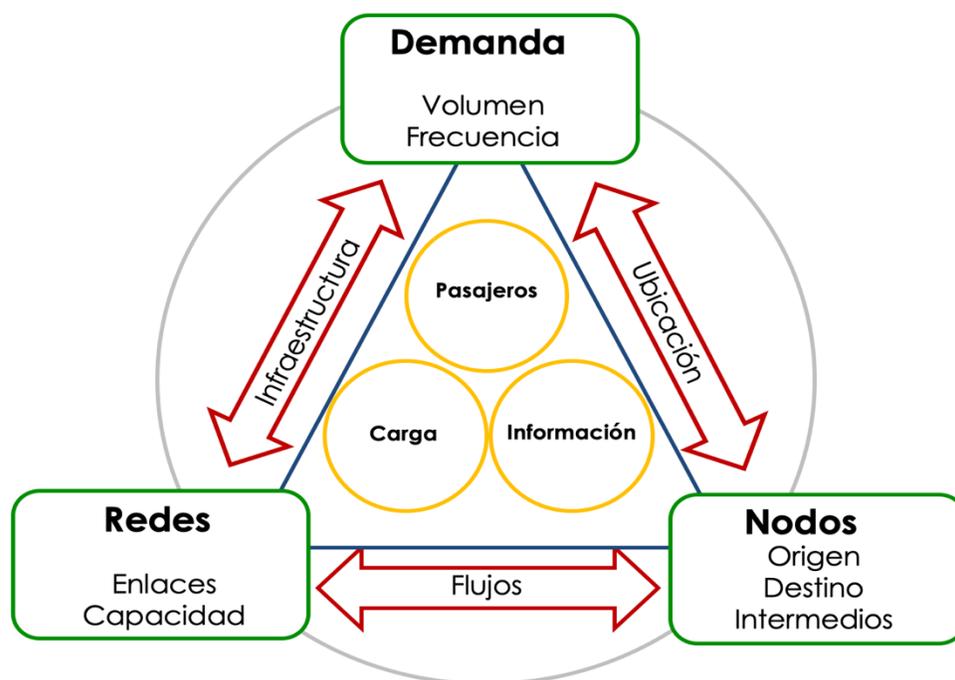


Ilustración 64 Sistema de transporte.

Fuente: Elaboración propia con información de Rodrigue, (2017).

### 2.1.1. Elementos principales de un sistema de transporte.

Para que el transporte tenga lugar, Rodrigue, (2017) considera que, deben existir cuatro componentes básicos:

**Modo.** Representan los medios de transporte, en su mayoría en forma de vehículos que se utilizan para apoyar la movilidad de los pasajeros o la carga.

**Infraestructuras.** El soporte físico de los modos de transporte, donde las rutas (por ejemplo, vías férreas, canales o carreteras) y terminales (por ejemplo, puertos o aeropuertos) son los componentes más significativos.

**Red.** Un sistema de ubicaciones vinculadas que se utilizan para representar la organización funcional y espacial del transporte. Este sistema indica qué ubicaciones están conectadas y cómo se atienden. Dentro de una red, algunas ubicaciones son más accesibles (más conexiones) que otras (menos conexiones).

**Flujo.** Movimientos de personas, fletes e información a través de sus respectivas redes. Los flujos tienen orígenes, ubicaciones intermedias y destinos. En ocasiones se hace uso de nodos intermedios para ir desde un origen a un destino.

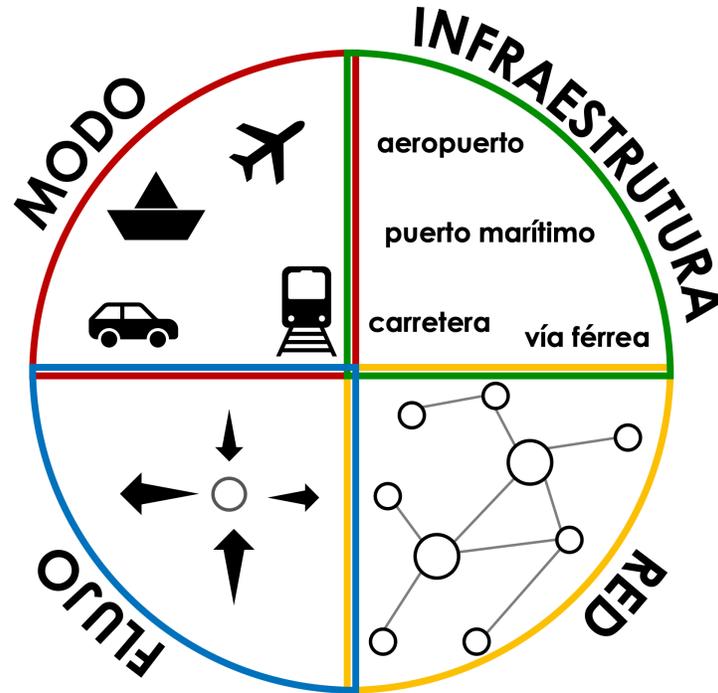


Ilustración 65 Componentes básicos de un sistema de transporte.

Fuente: Elaboración propia con información de Rodrigue, (2017).

### 2.1.2. Componentes de la red de transporte.

Rodrigue (2017) sugiere considerar que en la estructura de una red de transporte podemos encontrar los siguientes componentes:

**Nodo.** Cualquier ubicación que tenga acceso a una red de transporte.

**Enlace.** Infraestructuras físicas de transporte que permiten conectar dos nodos.

**Flujo.** La cantidad de tráfico que circula en un enlace entre dos nodos y la cantidad de tráfico que pasa a través de un nodo.

**Nodo Multimodal.** Un nodo que está conectando dos sistemas de circulación diferentes que generalmente son redes separadas (modos) y que actúa como paso obligatorio para varios flujos.



es particularmente el caso de los terminales de contenedores que tienen una gran huella de tierra para propósitos de apilamiento.

**Aeropuertos.** Para los aeropuertos, es el aeródromo el que tiene la huella más significativa, ya que se requieren áreas extensas para pistas, rodaje y estacionamiento. Las terminales tienen comparativamente una huella más pequeña y, en muchos casos, las áreas de estacionamiento de automóviles pueden representar una gran parte de ellas. La interfaz se realiza a través de pasarelas o escaleras de embarque para pasajeros o carros y rampas para carga.

**Terminales ferroviarias de pasajeros.** La estación ferroviaria de pasajeros puede ser importante, ya que las plataformas representan más de la mitad del espacio. Para estaciones más pequeñas, este porcentaje puede ser incluso mayor.

**Terminales de carga ferroviaria.** Similar a los puertos, es la función de almacenamiento que tiene la huella más grande, particularmente para terminales intermodales. La interfaz es comúnmente realizada por equipos de grúa o cargadores laterales.

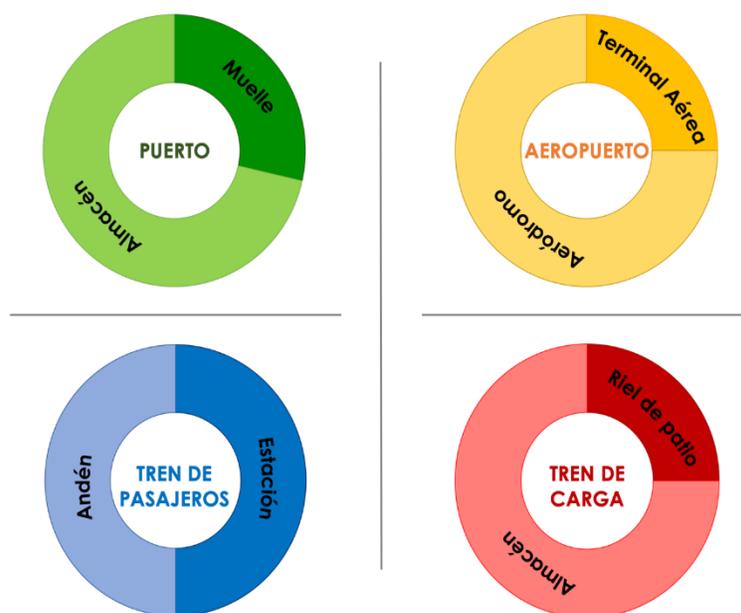


Ilustración 67 Separación física entre las terminales de transporte  
Fuente: Elaboración propia con información de Rodrigue, (2017).

#### 2.1.4 La transferencia de pasajeros en el sistema ferroviario.

Los sistemas de transporte son tan importantes para el movimiento de mercancías como de pasajeros y todos los modos de transporte se han convertido en una parte esencial que ahora presenta retos para mejorar la operación y es por eso que Rodrigue (2017) menciona algunos de los desafíos comunes para los sistemas de transporte:

**Capacidad:** Una restricción básica se refiere a la capacidad adecuada, tanto a lo largo de una ruta de transporte como en una terminal. La capacidad de un sistema de transporte a menudo está restringida por sus cuellos de botella de circulación.

**Transferencia:** Los puntos de transferencia son cruciales, ya que permiten la interfaz entre diferentes sistemas de transporte, una función que suelen cumplir los concentradores o las puertas de enlace.

**Confiabilidad:** Un problema multidimensional que concierne a la expectativa de que un movimiento ocurrirá dentro de un rango de *tiempo y costo específico*. Si bien una *ruta* podría ser más corta, puede no ser tan confiable como una ruta más larga. La *congestión* es un factor común que afecta la confiabilidad de un sistema de transporte, ya que suele representar demoras en la operación.

**Integración:** Implica explotar los beneficios de cada modo de transporte para que los flujos sean más confiables y / o menos costosos (transporte intermodal).

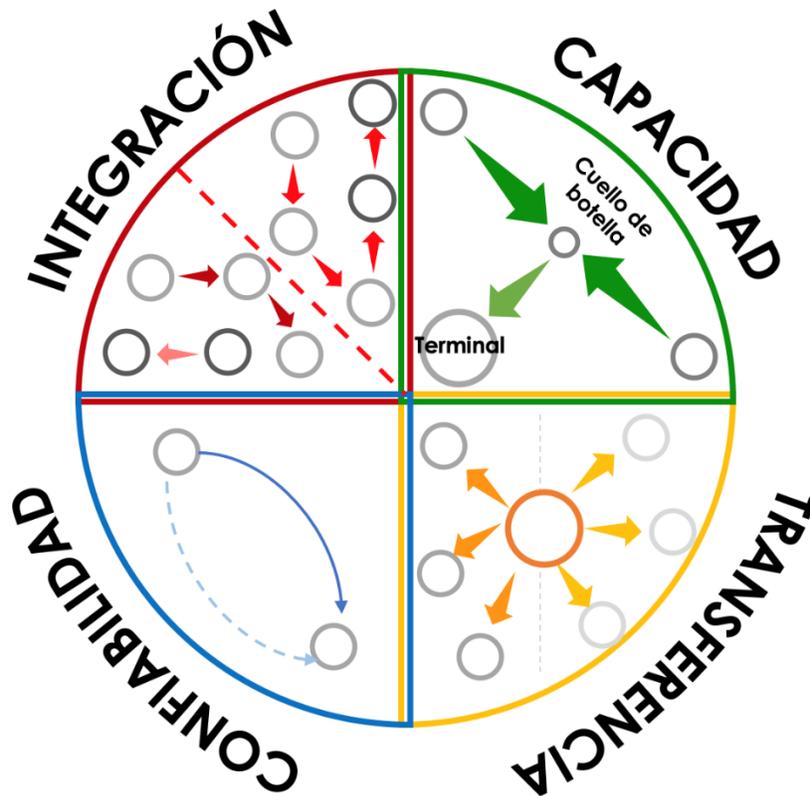


Ilustración 68 Los retos más comunes de los sistemas de transporte.  
Fuente: Elaboración propia con información de Rodrigue, (2017).

Aunando más en el problema de la congestión de los sistemas de transporte Rodrigue (2017) sobresalta que es común enfrentar la congestión que se produce a través de los modos y ubicaciones y surge de dos causas.

- Cuando la demanda de movilidad excede la capacidad.
  - el aumento de la capacidad engendra una demanda oculta, por lo que agregar carriles a una vía rápida tiende a atraer aún más circulación. Además, la demanda está aumentando constantemente, por lo que la practicidad de esta solución puede ser cuestionada.
- Eventos aleatorios provocan una interrupción temporal del servicio.

- En este caso es posible mitigar sus efectos si la ocurrencia es frecuente, como los accidentes, o si los riesgos son grandes.

La congestión está ligada espacialmente, se lleva a cabo en lugares específicos con impactos en una multitud de escalas. Cada evento produce una respuesta espacial, desde el conductor del automóvil que busca una ruta alternativa hasta el remitente que selecciona un modo o punto de entrada diferente para los envíos posteriores. El aumento de la demanda y las crecientes probabilidades de congestión intensificarán las nuevas respuestas espaciales y, por lo tanto, es muy probable que surjan nuevos flujos y estructuras espaciales, por lo anterior (Rodrigue, 2017) recomienda tener en cuenta lo siguiente:

**Gestión de la demanda.** Se refiere a las condiciones y en qué tipos de ubicaciones se puede modificar la demanda de viajes. En un contexto de mercado, cuando la oferta es fija y la demanda aumenta, inevitablemente se produce un ajuste de precios al alza. Existe una creciente necesidad de proporcionar incentivos (o desincentivos) y reevaluar la prioridad en el uso de la infraestructura, particularmente en las áreas urbanas.

**Concentración VS. desconcentración.** La accesibilidad y las mejoras de infraestructura generalmente conducen a una concentración de actividades, mientras que la congestión actúa como una fuerza que contrarresta la concentración, ya que crea varias deseconomías. La densidad de las actividades económicas y sociales y la intensidad relacionada con el uso del transporte implican un equilibrio entre las fuerzas de concentración y desconcentración.

**Impactos económicos y sociales.** En un contexto en el que las redes de transporte están cada vez más sincronizadas, la congestión puede crear efectos multiplicadores que no solo afectan los costos, sino también la confiabilidad de los sistemas de transporte. En los países en desarrollo donde puede impedir el crecimiento económico.

**Pasajeros VS. carga.** La congestión también plantea la cuestión de la priorización de los pasajeros frente a la carga cuando comparten infraestructura de transporte o cuando las actividades de carga, como terminales o centros de distribución, están cerca de lugares donde transitan grandes cantidades de pasajeros. Un problema importante se refiere a cómo la distribución de carga podría integrarse mejor en el entorno urbano donde los movimientos de pasajeros tienden a dominar.

Otro de los puntos más importantes en la operación de un sistema de transporte es el mantenimiento de la infraestructura y para Rodrigue (2017) el mantenimiento puede estar sujeto a diferentes enfoques:

**Reactivo.** El enfoque estándar cuando el mantenimiento se realiza después de un daño o falla de la infraestructura.

**Preventivo.** El mantenimiento se realiza de forma regular para garantizar que la infraestructura de transporte funcione de acuerdo con parámetros y supuestos bien definidos en términos de vida útil.

**Proactivo.** El mantenimiento se realiza antes de que se predice que una infraestructura se dañará o fallará.

## **2.2. Concepto de sistema y tipos de sistema.**

Para complementar la sección anterior, a continuación se retoman algunos conceptos de sistemas, los principales tipos de sistemas, y los modelos principales con los que se estudian los sistemas.

Un sistema se puede definir como un conjunto de objetos con relaciones entre los mismos objetos y entre sus relaciones (Hall&Fagen, 1956).

Un sistema puede ser conceptualizado como una colección de entidades. (Schmidt & Taylor, 1970).

Sistema Discreto. Es aquel para el cual las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados en el tiempo. Law & Kelton, 1991)

Sistema Continuo. Es aquel para el cual las variables de estado cambian continuamente con respecto al tiempo. Law & Kelton, 1991)

Un estudio de los sistemas nos permite comprender las relaciones entre los diversos componentes, o para predecir el rendimiento bajo algunas condiciones nuevas que se están considerando. Law & Kelton, (1991).

### **2.2.1 El estudio del sistema y los tipos de modelos.**

Experimentar con el sistema real vs. Experimente con un modelo del sistema: si es posible (y rentable) alterar el sistema físicamente y luego dejarlo funcionar bajo las nuevas condiciones, probablemente sea conveniente hacerlo, porque En este caso no hay duda sobre si lo que estudiamos es relevante. Sin embargo, rara vez es factible hacer esto, porque tal experimento a menudo sería demasiado costoso o perjudicial para el sistema. Law & Kelton, (1991).

Modelo físico frente a modelo matemático: los modelos físicos (también llamados modelos icónicos) y no son típicos de los tipos de modelos que suelen ser de interés en la investigación de operaciones y el análisis de sistemas. Se ha encontrado útil construir modelos físicos para estudiar ingeniería o sistemas de gestión. Pero la gran mayoría de los modelos creados para tales propósitos son matemáticos, representan un sistema en términos de relaciones lógicas y cuantitativas que son manipuladas y modificadas para ver cómo reacciona el modelo y, por lo tanto, cómo reaccionaría el sistema, si el modelo matemático es válido. uno. Law & Kelton, (1991).

Solución analítica frente a simulación: si el modelo es lo suficientemente simple, puede ser posible trabajar con sus relaciones y cantidades para obtener una solución analítica exacta.

por medio de simulación, ejercitando numéricamente el modelo de las entradas en cuestión para ver cómo afectan las medidas de rendimiento de la salida. Si una solución analítica para un modelo matemático está disponible y es computacionalmente eficiente, generalmente es conveniente estudiar el modelo de esta manera en lugar de hacerlo a través de una simulación.

Sin embargo, muchos sistemas son muy complejos, por lo que el modelo matemático válido de ellos es complejo, lo que excluye cualquier posibilidad de una solución analítica. Law & Kelton, (1991).

## **2.3 Simulación**

Partiendo de las herramientas que ofrece el campo de investigación de operaciones, entre ellas contamos con la simulación que es una alternativa de la observación del sistema, ya que contribuye al entendimiento del comportamiento en el tiempo, con base en la recopilación de la información del sistema. Clasifican los modelos de simulación en tres dimensiones diferentes:

Modelos de simulación estática frente a dinámica: un modelo de simulación estática es una representación de un sistema en un momento determinado (por ejemplo, Monte Carlo), un modelo dinámico representa un sistema a medida que evoluciona con el tiempo, como un sistema de transporte en una fábrica. Law & Kelton, (1991).

Modelo de simulación determinista y estocástico. Si un modelo no contiene ningún componente probabilístico (aleatorio), se llama determinista. En los modelos deterministas, la salida se "determina" una vez que el conjunto de cantidades y relaciones de entrada en el modelo evalúa lo que es. Los modelos de simulación

estocástica producen resultados que son en sí mismos aleatorios y, por lo tanto, deben tratarse como una estimación de las verdaderas características del modelo. Law & Kelton, (1991).

Modelos de simulación continua y discreta: la simulación de eventos discretos se refiere al modelado de un sistema a medida que evoluciona a lo largo del tiempo mediante una representación en la que las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados en el tiempo. Law & Kelton, (1991).

### 2.3.1. Simulación de Eventos Discretos

A continuación, se listan los principales conceptos que son claves en un proceso de simulación de eventos discretos que nos sugiere Banks, (1998) en su obra "Handbook of Simulation".

**Evento:** como ocurrencia que cambia el estado del sistema. Hay eventos endógenos y eventos exógenos.

**Modelo:** es una representación de un sistema real, el modelo debe ser lo suficientemente complejo como para responder a las preguntas planteadas.

**Sistema:** límites del modelo representan el sistema real.

**Variables de estado del sistema:** son la recopilación de toda la información necesaria para diferenciar lo que sucede en un sistema a un nivel suficiente en un momento dado. Las variables de estado del sistema son una constante del modelo de eventos discretos en intervalos de tiempo y cambian de valor solo en ciertas pintas bien definidas llamadas tiempos de eventos.

**Entidad:** un objeto que requiere definición explícita puede tener atributos que pertenecen solo a esa entidad.

**Atributos:** deben ser considerados como valores locales.

**Recursos:** es una entidad que proporciona servicio a entidades dinámicas. El recurso puede servir a una o más de una entidad dinámica al mismo tiempo.

**Procesamiento de listas:** Las entidades se gestionan asignándolas a recursos que brindan servicio; adjuntándolos a avisos de eventos, suspendiendo así su actividad en el futuro; o colocándolos en una lista ordenada. La lista se utiliza para representar colas.

**Actividad:** es un período de tiempo cuya duración se conoce antes del comienzo de la actividad. Así, cuando comienza la duración, su final puede ser programado.

**Retraso:** es una duración indefinida causada por alguna combinación de condiciones del sistema. Cuando una entidad se une a una cola para un recurso, el tiempo que permanecerá en la cola puede ser desconocido inicialmente, ya que ese tiempo depende de otros eventos que puedan ocurrir.

**Modelo de simulación de eventos discretos:** se lleva a cabo a lo largo del tiempo ("ejecución") mediante un mecanismo que hace avanzar el tiempo simulado. El estado del sistema se actualiza en cada evento, junto con la captura y liberación de recursos que pueden ocurrir en ese momento (Banks, 1998). La metodología DES es también conocida como macro simulación.

Banks en su obra "Handbook of Simulation" nos sigue una serie de pasos para el desarrollo de una simulación.

### 2.3.2. Modelación y Simulación Basada en Agentes

La Modelación basada en agentes (también conocidas como micro simulación) permite construir modelos en los que las entidades individuales y sus interacciones están representadas directamente, y ofrece la posibilidad de modelar la heterogeneidad individual, representando a los agentes explícitamente. (Gilbert N., 2007)

Los modelos basados en agentes pueden también realizar experimentos porque permiten aislar virtualmente procesos sociales de otros procesos e investigar las causas de los efectos observados (García J. y Medina V., 2011).

En gran parte de los modelos basados en agentes, los propios agentes son capaces de moverse dentro de su entorno a través de sensores por medio de los cuales perciben a sus vecinos locales (Huerta Barrientos, 2016).

Algunos de los atributos que interesa modelar en los agentes son: Conocimiento y creencias, inferencias, modelos sociales, representación del conocimiento, metas, planeación, lenguaje y emociones (Huerta Barrientos, 2016).

Debido a la naturaleza del sistema es necesario emplear la metodología Simulación de Eventos Discretos (DES por sus siglas en inglés) y Modelación Basada en Agentes (ABM por sus siglas en inglés), y para el desarrollo de la simulación, haremos uso de la metodología MoSASCoM para desarrollar la modelación y simulación con la menor incertidumbre ya que permite emplear la macro y la micro simulación (Huerta A., 2016).

### **2.3.3. Modelación Híbrida.**

La metodología MoSASCoM, tiene el propósito de guiar el proceso completo de la modelación y simulación de sistemas complejos, hasta alcanzar un análisis de las propiedades emergentes (Huerta Barrientos, 2016).

La metodología MoSASCoM, se establece en un marco cíclico y recursivo, y consta de 5 etapas que conllevan un constante y enriquecido flujo de información de una etapa a otra, las etapas son las siguientes:

1. Pregunta Base: ¿Cuáles son las propiedades emergentes más probables?
2. Desarrollo del modelo Conceptual (DEMO)
3. Simulación del Modelo (SIMO)
4. Análisis del Modelo (AMSI)
5. Documentación del Modelo (DOMSI)

La metodología MoSASCoM, se desarrolla en el siguiente capítulo, ya que se ha tomado como guía para el desarrollo de la modelación y simulación de la estación Guerrero.

## 2.4 La revisión de la literatura

Algunas de los trabajos de investigación publicación en algunas revistas se han encontrado los siguientes trabajos a fines con el propósito de este trabajo y las metodologías que han empleado en su mayoría consisten en trabajo de simulación de eventos discretos principalmente.

La revisión de la búsqueda se realizó a través de Scopus, Elsevier, Science Direct La búsqueda por palabras claves fueron, hub, hub station, transferring passenger, transfer passenger, public transport, rail transport.

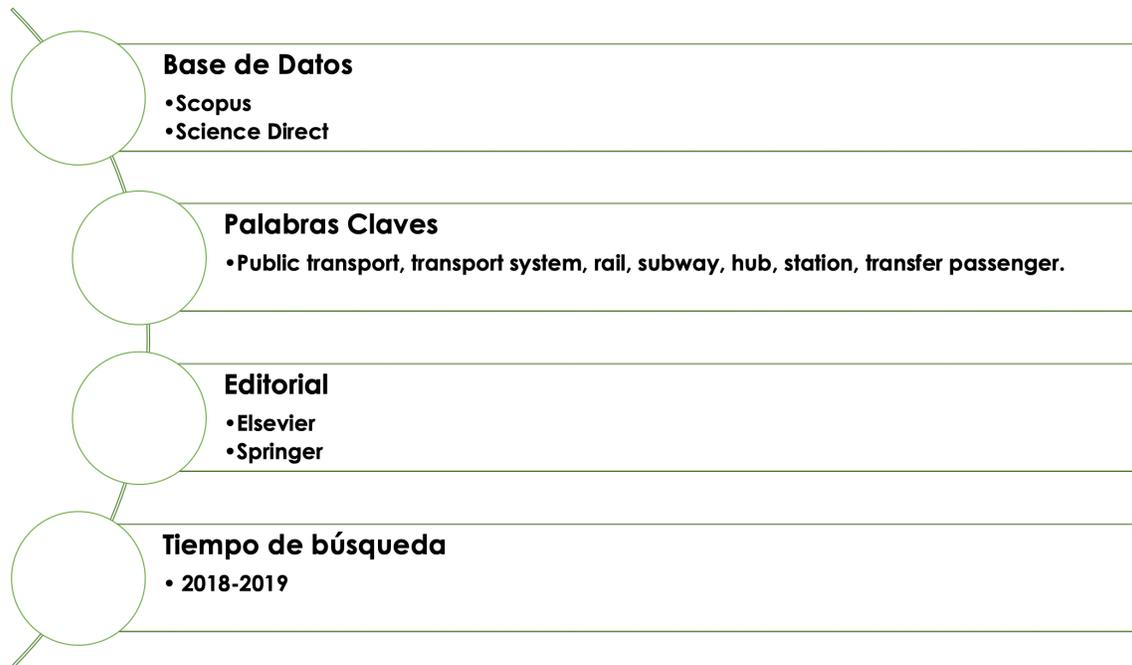


Ilustración 69 La revisión de la literatura  
Fuente: Elaboración propia, (2019).

Del material recuperado inicialmente (36 artículos) el 50% centraba su investigación en campos y objetivos diversos, que no eran compatibles con el objetivo de este estudio (ver Ilustración 70).

### Material Recuperado

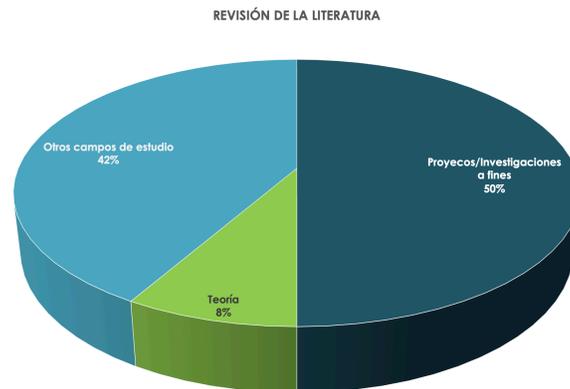


Ilustración 70 Material recuperado  
Fuente: Elaboración propia, (2019).

Los 18 artículos que fueron seleccionados, que contiene información a fines con el propósito de este trabajo. Durante el proceso de la selección del material, se eligieron aquellos estudios que se centraban o estaban directamente relacionados con el sistema de transporte ferroviario, otra de las consideraciones importantes fue el tema de transferencia de pasajeros o aquellos que contuvieran información relevante acerca del estudio (congestión, selección de rutas, cuellos de botella, entre otros) de los pasajeros en andén, estación, línea, red, o en algún nodo multimodal (ver Ilustración 71).



Ilustración 71 Selección del Material recuperado  
Fuente: Elaboración propia, (2019).

Tabla 3 Revisión de la Literatura.  
Fuente: Elaboración propia, (2019).

Año	Autor	Título	Objeto de Estudio	Objetivo	Herramienta / Metodología
2002	Richard Freling, Ramon M. Lentink, Leo G. Kroon, Dennis Huisman	Shunting of Passenger Train Units in a Railway Station	Red ferroviaria de pasajeros	Un modelo de capas múltiples para analizar los patrones de flujo de tráfico en las redes de metro, con base en los datos de viaje y un calendario de operación del sistema de metro de Beijing.	Red multicapa
2013	Xiang-ming Yao Peng Zhao Ke Qiao Wei-jia Li	Modeling on Dynamic Passenger Flow Distribution in Urban Mass Transit Network	Red ferroviaria de pasajeros	Un modelo de simulación multiagente para describir todo el sistema de metro de pasajeros y trenes.	Modelo de simulación multiagente (MAS)
2013	Wei Li Jingnan Zhou	The Optimize Management of Passenger Organization in Transfer Station Based on Dynamic Passenger Flow Analysis	Estación ferroviaria de pasajeros	Obtener datos de entrada y salida de la estación, el número de transferencias entre líneas y el número de transferencias a cada línea	Un algoritmo sobre el análisis dinámico
2014	Marc Starmans Lee Verhoeff Jeroen van den Heuvel	Passenger transfer chain analysis for reallocation of heritage space at Amsterdam Central station	Terminal Multimodal	Evaluación de alto nivel en la operación de trenes (posiciones, horarios y salidas de plataforma), utilizando un modelo de transferencia de pasajeros.	Modelo de Simulación macroscópica

2014	Yuting Zhu Chunping Hu Dejie Xu Jimeng Tang	Research on Optimization for Passenger Streamline of Hubs	Estación ferroviaria de pasajeros	Un modelo de optimización de pasajeros para promover la organización de la gestión de estaciones de transferencia.	Algoritmo de la ruta más corta
2015	Zhibin Jiang Ching-Hsien Hsu Daqiang Zhang Xiaolei Zou	Evaluating rail transit timetable using big passengers' data	Línea del sistema ferroviario	Un modelo de simulación para calcular el factor de carga de las líneas ferroviarias para diferentes horarios y líneas del metro.	Micro-Simulación
2016	Wei Li, Wei Zhu	A dynamic simulation model of passenger flow distribution on schedule-based rail transit networks with train delays	Red ferroviaria de pasajeros	Un modelo de simulación para analizar distribución del flujo de pasajeros en redes de tránsito basadas en horarios con retrasos en el tren	Simulación de eventos discretos.
2016	Oded Catsa, Jens Westb, Jonas Eliasson	A dynamic stochastic model for evaluating congestion and crowding effects in transit systems	Red ferroviaria de pasajeros	Un método para capturar los beneficios de una mayor capacidad utilizando un modelo de asignación de tránsito dinámico y estocástico.	Modelo de simulación basado en agentes
2016	Xu Chen, Haiying Li, Jianrui Miao, Shixiong Jiang, Xi Jiang	A multiagent-based model for pedestrian simulation in subway stations	Estación ferroviaria de pasajeros	Un modelo de abstracción del entorno de la estación de metro, un modelo de agente peatonal de tres niveles con una base de reglas interactivas.	Simulación multiagente. Modelación orientada a objetos. Modelo NOMAD

2016	Cristobal Pineda Daniel Schwarz Esteban Godoy	Comparison of passengers' behavior and aggregate demand levels on a subway system using origin-destination surveys and smartcard data	Red ferroviaria de pasajeros	Determinar las cargas de pasajeros y los flujos de transferencia para cada línea de la red del metro de Santiago	Matriz Origen - Destino Modelo de equilibrio de tránsito
2016	Shasha Liu Enjian Yao Xin Cheng Yongsheng Zhang	Evaluation of level of service for transfer passengers at airports	Red ferroviaria de pasajeros	Analizar los factores que afectan el nivel de servicio en la transferencia de pasajeros, para evaluar el impacto de nuevas líneas en el flujo de pasajeros de las estaciones existentes.	Análisis de regresión
2017	Xavier Boulet, Mahdi Zargayouna, Fabien Leurent, Bachar Kabalan, Feirouz Ksontini	A Dynamic Multiagent Simulation of Mobility in a Train Station	Estación ferroviaria de pasajeros	1. Modelo de simulación multi agente de viajeros y su interacción en el andén. 2. Definir estrategias respecto al tipo de información que se debe proporcionar, su frecuencia y el medio para transmitir. 3. Administración de andenes para optimizar la fluidez del tráfico.	Simulación Multiagente
2017	Fabien Leurent Xiaoyan Xie	On passenger repositioning along station platform during train waiting	Andén	Construcción de un modelo estocástico del tiempo de viaje del pasajero y el tiempo de espera del tren, considerando los puntos de entrada y salida de la estación, y del andén.	Modelo estocástico Estimación estadística

2017	Xiaoxia Yang Hairong Dong Xiuming Yao	Passenger distribution modelling at the subway platform based on ant colony optimization algorithm	Estación ferroviaria de pasajeros	Modelo de simulación de la distribución de pasajeros en el andén, para predecir los procesos de elección en el área de espera.	Modelo de simulación microscópica Algoritmo de optimización ACO Modelo de fuerza social
2017	Zhan Guo Jinhua Zhao Chris Whong Prachee Mishra Lance Wyman	Redesigning subway map to mitigate bottleneck congestion- An experiment in Washington DC using Mechanical Turk	Red ferroviaria de pasajeros	Explorar la posibilidad de utilizar los mapas del metro como herramienta de planificación, para influir en la elección de rutas de pasajeros para mitigar la congestión.	Mechanical turk
2017	Jia Feng Xiamiao Li Baohua Mao Qi Xu Yun Bai	Weighted complex network analysis of the Beijing subway system- Train and passenger flows	Red ferroviaria de pasajeros	Analizar los patrones de flujo de tráfico en las redes de metro, con base en base los datos de viaje y un calendario de operación obtenido del Sistema de Metro de Beijing.	Red multicapa
2017	Haixiao Pan Jing Li Qing Shen Cheng Shi	What determines rail transit passenger volume? Implications for transit-oriented development planning	Red ferroviaria de pasajeros	Examinación empírica del efecto del desarrollo orientado al tránsito (TOD) basado en el volumen diario de pasajeros de la estación del metro.	Modelo de regresión

2018	Tianyu Zhang Dewei Li Yu Qiao	Comprehensive optimization of urban rail transit timetable by minimizing total travel times under time-dependent passenger demand and congested conditions	Red ferroviaria de pasajeros	Diseñar horarios con el objetivo de minimizar el tiempo total de viaje de los pasajeros, considerando las operaciones del tren y los procesos de ascenso y descenso de pasajeros.	Modelo de programación no lineal y no convexa Simulación recocido controlado adaptable algoritmo de búsqueda.
------	-------------------------------------	--	------------------------------	---	---

De los 18 artículos presentados en la tabla anterior, 1 corresponde a un estudio en la zona de andenes, 5 se centran en el estudio a nivel estación, 1 estudia una línea en particular, 10 enfocan el estudio a nivel red del sistema ferroviario y 1 corresponde a un estudio en una estación multimodal (ferroviario - aéreo). Aunque los niveles de estudio pueden variar, coinciden en que el estudio, para el beneficio del usuario. Y unos de los factores principales por los que se han realizado el estudio se debe a una congestión en el sistema y buscan una mejora sustentada para contribuir en una mejora, disminuyendo el tiempo de espera o traslado de los usuarios del sistema de transporte ferroviario. Dentro de las principales metodologías o herramientas utilizadas para el estudio, utilizan modelos matemáticos y en la mayoría utilizan los modelos de simulación de microanálisis o una combinación con otras herramientas.

Por lo anterior, se ha optado por utilizar la metodología de simulación para estudiar la transferencia de pasajeros en hora pico en la Estación Guerrero, el desarrollo del modelo de simulación se muestra en el siguiente capítulo.

## Capítulo 3. Un Modelo de Simulación de la Estación

### Guerrero.

Dentro de este capítulo se detalla la construcción del modelo de simulación de la estación Guerrero del STC (Metro), con la base metodológica de MoSASCoM y utilizando Anylogic™. Para la caracterizar la demanda y los flujos de usuarios en la Estación Guerrero en los días laborales y hora pico, utilizando los datos que se obtuvieron en las visitas técnicas a la estación; dichos datos fueron procesados y ajustados con la ayuda de Stat::Fit (Software especializado para realizar el ajuste de datos)

Considerando que el STC (Metro) cobra una importancia económica social muy importante para la economía mexicana siendo el segundo transporte más utilizado en la ZMVM (de acuerdo con la encuesta realizada en 2017 por el INEGI) que facilita el movimiento de personas (hasta 5.5 millones de usuario diario de acuerdo con lo declarado por el STC (Metro)) y mercancías que son transportadas por los usuarios.

La estación Guerrero ha significado un reto para la persona de operación de dicha estación, ya que la demanda de 06:00 a 10:00 horas es mayor respecto a otros horarios y los usuarios tienden a irromper los flujos establecidos con el propósito de alcanzar el vehículo más próximo.

El STC (Metro) se ha comprometido para brindar un servicio de transporte público masivo, seguro, confiable y tecnológicamente limpio, por lo que situaciones como las que pueden presentarse en la estación Guerrero son el tipo de retos que tiene por resolver y es por ello que a través de una Herramienta de apoyo a la toma de decisión como lo un proyecto de Simulación se pretende ayudar a mejorar el servicio en la Estación Guerrero que tiene correspondencia con línea B y línea 3.

La estación Guerrero es un claro ejemplo de un sistema complejo de tipo teleológico. Desde la perspectiva del usuario que desea minimizar el tiempo de llegar de su punto origen a un punto destino dentro de la estación y del personal de la estación Guerrero que busca mejorar la distribución de flujos dentro de la estación.

### **3.1. Construcción del modelo de simulación de la estación Guerrero.**

La metodología de MoSASCoM, ha sido desarrollada para enfrentar aquellos problemas que resultan complejos y que requieren uno o más enfoques para la modelación del sistema a estudiar; gracias a que el desarrollo de la metodología es cíclica permite una abstracción del sistema, favoreciendo el entendimiento del sistema y sus propiedades emergentes, así como la interrelación entre sus elementos.

#### **3.1.1. Etapa 1. Pregunta base**

***¿Cuáles son las propiedades emergentes más probables del sistema complejo bajo consideración?***

La pregunta base, ayudará para crear el modelo conceptual con base en supuestos a nivel macro, y en consecuencia se identificará el estado dinámico global del sistema (Huerta-Barrientos, 2016).

A lo anterior se consideran las siguientes preguntas para el caso de la estación Guerrero.

¿Cuántos y cuáles con los accesos de entrada a la estación Guerrero? ¿Y cuál es la tasa de llegada?

¿Cuáles son los carriles con mayor demanda de usuarios?

Propiedades emergentes

Dentro de las características inherentes al sistema que comprende la estación Guerrero, se encuentran: la demanda de usuarios, distribución del flujo de usuarios, el espacio por usuario (aprox.) y la velocidad de desplazamiento de usuarios.

### 3.1.2. Etapa 2. Desarrollo del Modelo Conceptual (DEMO)

#### I. Nivel de abstracción.

En esta etapa se especifica la información contenida en el modelo conceptual (Huerta Barrientos-2016). En esta etapa se identificaron los puntos donde convergen 2 o más líneas de la red del STC en un mismo punto (ver Ilustración 72)



Ilustración 72 Estaciones y terminales de la red del STC.  
Fuente: STC (2018)

Continuando con la abstracción del sistema, partiendo del macro sistema que es la Red del STC que esta integrado por 12 líneas en la que se pueden encontrar los 28 puntos donde se puede realizar una transferencia (cambio de línea), tomamos el subsistema “estación Guerrero” donde convergen Línea B y Línea 3, para identificar los principales componente que integran este subsistema en el que centraremos el estudio (ver Ilustración 73).

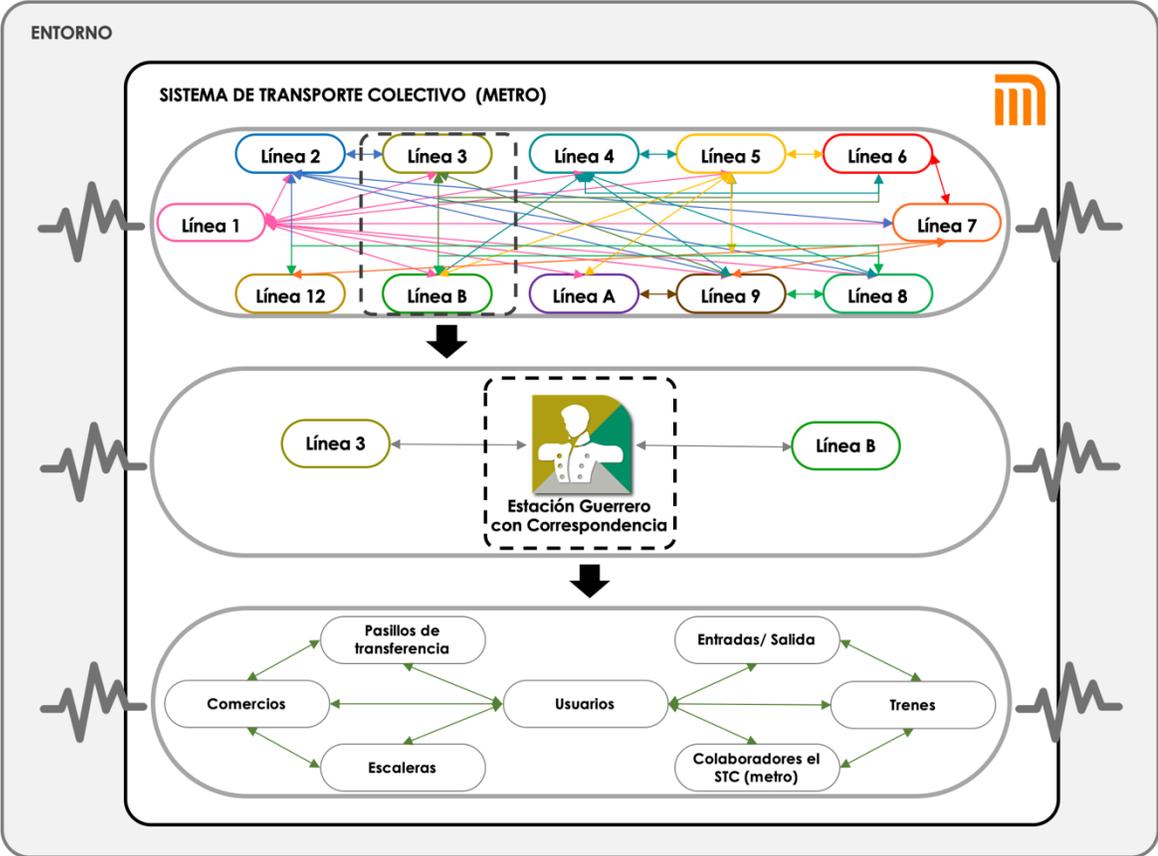


Ilustración 73 Abstracción del sistema (Estación Guerrero)  
 Fuente: Elaboración propia, (2019).

Para finalizar la parte de la fase de abstracción, se elaboró un flujograma para representar el recorrido que puede realizar el usuario dentro de la estación de transferencia, tomando en cuenta que los puntos de entrada y salida de la estación puede ser a través de los torniquetes o a través de los trenes que llegan a la zona de andenes para el ascenso y descenso de usuarios a la estación (ver Ilustración 74)

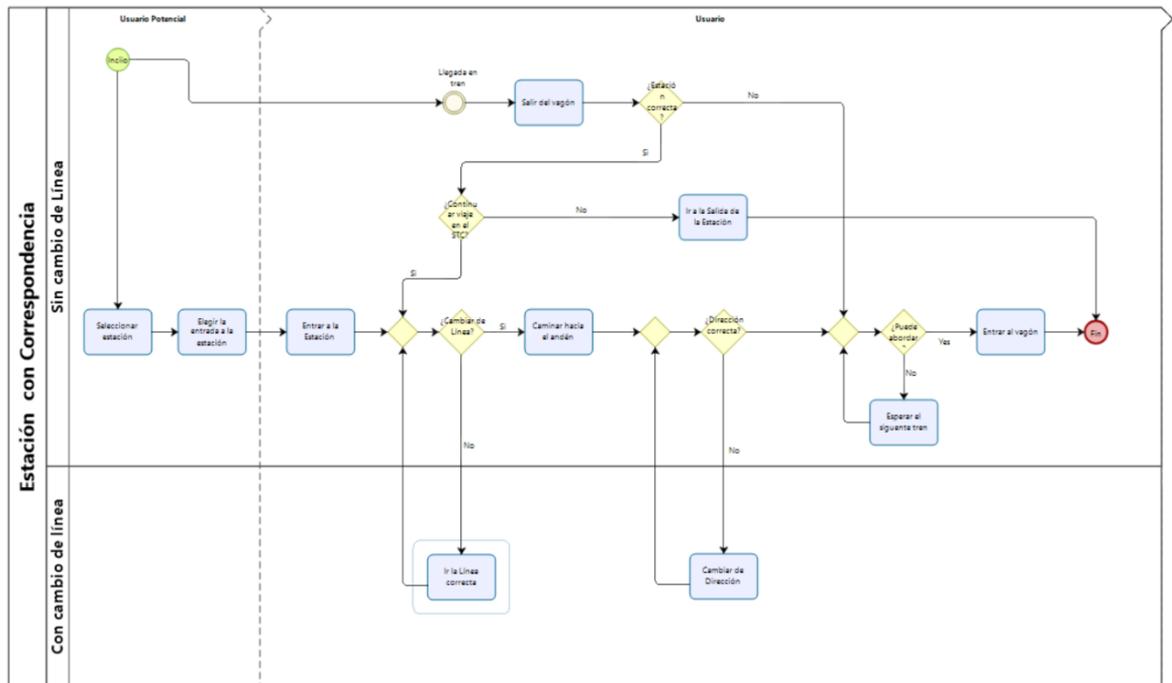


Ilustración 74 Flujograma de una estación con correspondencia.  
 Fuente: Elaboración propia, (2019).

## II. Perspectiva

En esta etapa se comienza a integrar información relevante del sistema complejo. Se ha identificado el flujo y direcciones de usuarios a la estación, así y algunos cuellos de botella presentes en los pasillos de transferencia, así como algunas causas(ver Ilustración 75).

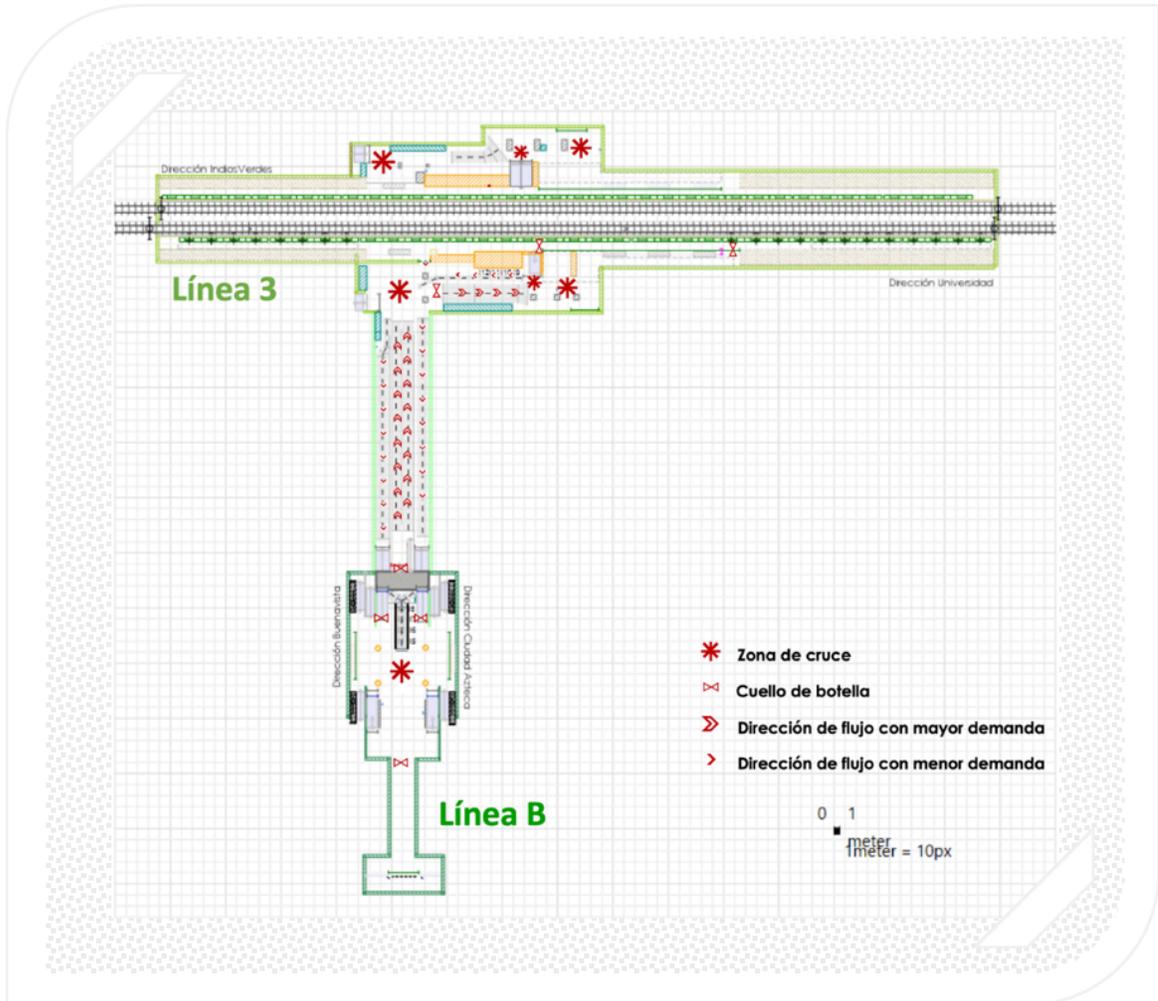


Ilustración 75 Dirección de flujo y puntos de congestión  
Fuente Elaboración propia, (2019).

### III. Operaciones del Sistema

Se ha tomado la medida la velocidad al caminar de los usuarios en las diferentes secciones que tienen que recorrer dentro de la estación, el volumen que pueden caracterizarlos con el transporte de unos o más mochilas, bolso, entre otras mercancías que transportan, además se modelado el arribo de trenes lo que represente un aumento y/o disminución de los pasajeros en la estación Guerrero.

## Recolección y Análisis de Datos

Como fue mencionado anteriormente, las vistas técnicas que se realizaron a la Estación Guerrero no solo fueron útiles para la conocer la estación y obtener los datos cualitativos que permitieron recrear la estación, sino también para obtener los datos que hacen posible un estudio a través de datos cuantitativos como son los, la cantidad de usuarios que entran y salen de la estación ya sea por el área de torniquetes o en la zona de andenes.

Teniendo como premisa realizar el estudio en horas pico que se presenta de lunes a viernes, la primer visita técnica se llevó a cabo en fin de semana, con el propósito de conocer la estación, desde dimensión, pasillos y longitud de conexión ente la Línea B y la línea 3, la señalización dentro de la estación y detalles que caracterizan a la estación, posteriormente se realizó una segunda visita técnica, esta vez fue entre semana con el propósito de observar el comportamiento en hora pico y a su vez elegir los puntos estratégicos para la toma de datos,

Los puntos seleccionados (ver Figura 84 )para la toma de datos, fueron los que permitieron un amplio campo de visión para la recolección de datos, evitando obstruir algún flujo o actividad usual de los Usuarios pero que permitieran obtener los datos de entrada, salida de la estación así como la distribución de usuarios dentro de la estación.

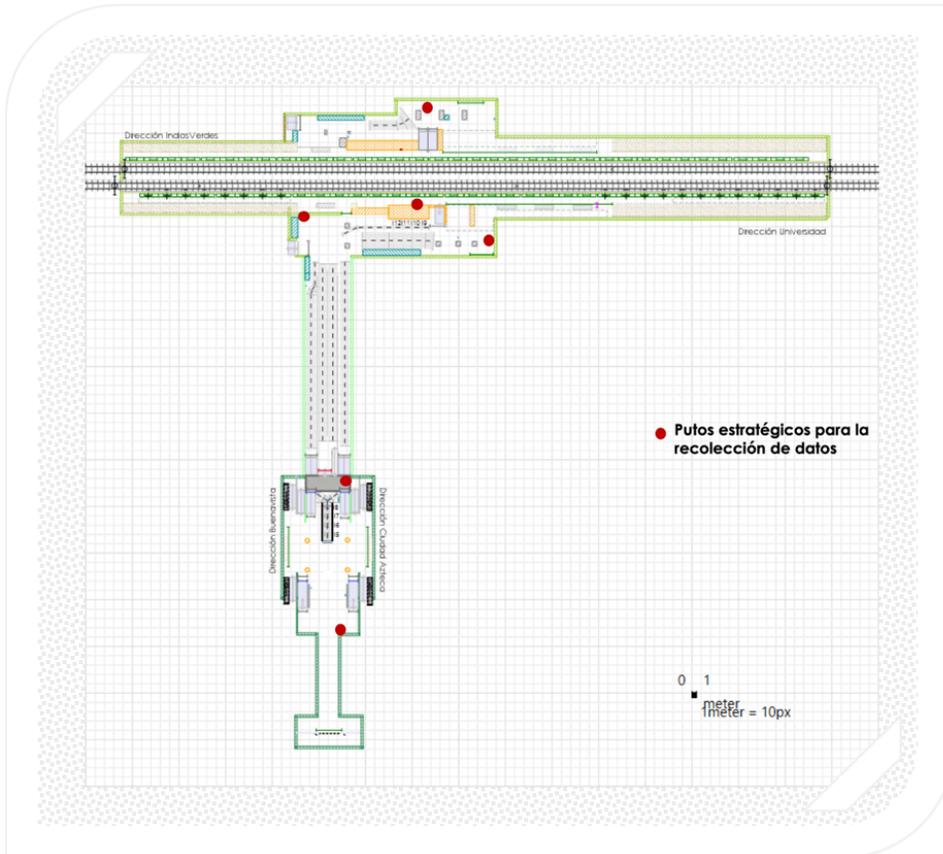


Ilustración 76 Puntos de recolección de datos  
 Fuente: Elaboración propia, (2019).

Una vez definidos los puntos estratégicos para la recolección, se estableció el periodo de 5 días considerando únicamente de lunes a viernes y en un horario de 8:00 a 9:00 horas. Fue así como se obtuvieron los datos de entrada, salida y distribución de los usuarios entro de la estación. Con los datos recolectados se elaboraron las tablas con datos de entrada y salida (ver Tabla 4, 5 y 6), las matrices origen-destino de los puntos dentro de la estación ver tablas 7, 8 y 9).

### Estación Guerrero, Línea B, Área de Torniquetes.

Tabla 4 Entradas y salidas de la estación Guerrero\_Línea B\_Torniquetes  
Fuente: Elaboración propia, (2018)

Horario	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
08:09:00 a 08:09:59	8	9	6	2	1	22	1	7	5	1
08:10:00 a 08:10:59	2	3	3	0	9	21	4	19	5	0
08:11:00 a 08:11:59	8	0	5	24	2	0	6	3	12	14
08:12:00 a 08:12:59	9	9	15	11	10	1	19	7	19	9
08:13:00 a 08:13:59	6	20	6	3	10	4	9	3	1	5
08:14:00 a 08:14:59	10	0	4	7	14	0	18	8	13	22
08:15:00 a 08:15:59	4	0	6	9	7	7	7	25	4	7

### Estación Guerrero, Línea 3 - Dir. Indios Verdes, Área de Torniquetes.

Tabla 5 Entradas y salidas en la estación Guerrero\_Línea 3\_ Torniquetes\_Dir. Indios Verdes  
Fuente: Elaboración propia, (2018).

Horario	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
08:00:00 a 08:00:59	1	10	2	0	2	9	6	13	3	21
08:01:00 a 08:01:59	3	13	3	1	5	3	4	1	4	5
08:02:00 a 08:02:59	4	10	2	11	7	23	2	1	2	0
08:03:00 a 08:03:59	1	9	1	3	4	0	2	0	2	2
08:04:00 a 08:04:59	5	6	1	16	5	0	3	0	2	15
08:05:00 a 08:05:59	13	3	3	2	5	23	4	13	0	12
08:06:00 a 08:06:59	4	35	3	0	3	1	2	8	0	0

## Estación Guerrero, Línea 3 - Dir. Universidad, Área de Torniquetes.

Tabla 6 Entradas y salidas en la estación Guerrero\_Línea 3\_Torniquetes\_Dir. Universidad

Fuente: Elaboración propia, (2018)

Horario	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
08:18:00 a 08:18:59	6	6	6	4	7	10	7	13	7	18
08:19:00 a 08:19:59	4	5	10	5	8	4	7	5	5	0
08:20:00 a 08:20:59	6	5	10	6	11	2	3	6	13	7
08:21:00 a 08:21:59	8	1	6	1	12	6	11	2	6	5
08:22:00 a 08:22:59	9	8	8	2	9	4	5	0	12	5
08:23:00 a 08:23:59	5	4	3	5	7	3	11	1	6	8
08:24:00 a 08:24:59	9	3	16	11	20	9	10	2	14	7

Tabla 7 Distribución del flujo de pasajeros\_Línea B

Fuente: Elaboración propia, (2018)

	Torniquetes Línea B	Dirección Buenavista	Dirección Ciudad Azteca	Dirección Indios Verdes	Dirección Universidad	Total
Torniquetes Línea B		23%	46%	15%	16%	100%
Dirección Buenavista	7%			49%	44%	100%
Dirección Ciudad Azteca	3%			7%	9%	100%

Tabla 8 Distribución del flujo de pasajeros\_Línea 3\_Dir. Indios Verdes  
Fuente: Elaboración propia, (2018)

	Torniquetes Indios Verdes	Andén Dir. Indios Verdes	Escaleras 1	Escaleras 2	Total
Torniquetes Indios Verdes		73%	11%	16%	100%
Andén Dir. Indios Verdes	30%		36%	34%	100%
Escaleras 1		100%			100%
Escaleras 2	5%	95%			100%

Tabla 9 Distribución del flujo de pasajeros en Línea 3\_Dir. Universidad  
Fuente: Elaboración propia, (2018)

	Torniquetes Dir. Universidad	Andén Dir. Universidad	Dir.Línea B	Escaleras 1	Escaleras 2	Total
Torniquetes Dir. Universidad		90%		7%	3%	100%
Andén Dir. Universidad	34%		58%	8%		100%
Dir.Línea B		89%		5%	6%	100%
Escaleras 1	1%	2%	97%			100%
Escaleras 2		4%	96%			100%

Otros de los datos que se obtuvieron y que se han considerado para caracterizar a los usuarios, es la velocidad con la que se desplazan. Los usuarios que llevan niños menores de edad, personas con discapacidad o que trasladan algún objeto voluminoso, frágil o una carga pesada tienden a caminar con una velocidad promedio de 1.5 m/s. Las personas que solo llevan una mochila/bolso o sin acompañante se desplazan a entre 2.5 y 3 m/s., también se distinguió otro tipo de usuarios que se desplazan a una mayor velocidad según se lo permitan las condiciones del espacio, pero pueden alcanzar una velocidad de hasta 4.5 m/s (son personas que prácticamente corren y suelen ir al principio de los flujos (ver Ilustración 77).

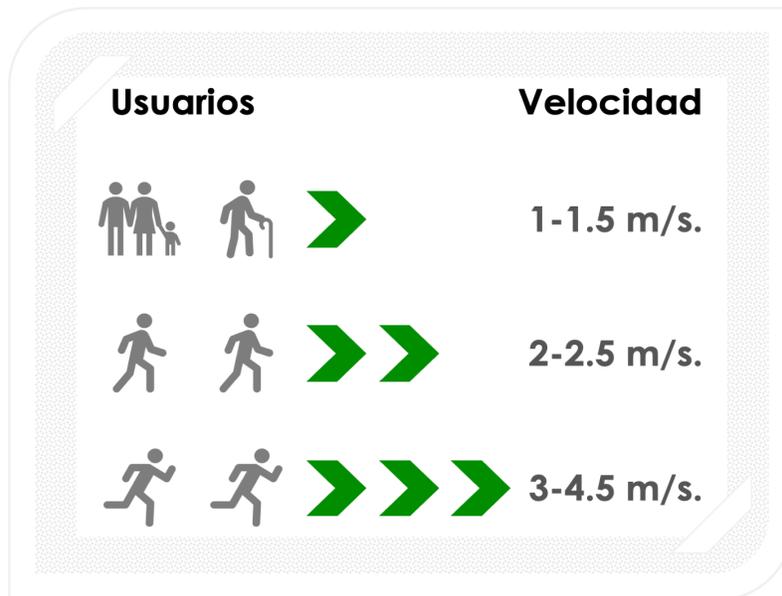


Ilustración 77 Velocidad de desplazamiento de los usuarios.  
Fuente: Elaboración propia, (2019).

### **Análisis y ajuste de datos.**

Con los datos de las entradas y salidas de las instalaciones de la Estación Guerrero, se realizó un ajuste de los datos con la ayuda de Stat::Fit, la distribución de los datos que resulte, se utilizará en el software de simulación donde se implementa el modelo de simulación. Stat::Fit es un software especializado para realizar pruebas de bondad de ajuste, para propósitos de este estudio se ha utilizado la versión “*Student*”, que tiene un límite de 50 datos de entrada.

### **Datos de Entrada en Estación Guerrero\_Línea B\_Torniquetes**

De acuerdo con ejercicio de bondad de ajuste para los datos de entrada que se obtuvieron en la Estación Guerrero-Línea B en la zona de torniquetes, le corresponde la distribución de Poisson con una  $\lambda=7.66$  (ver Ilustración 78) y en la gráfica 3 representa la distribución ajustada, de una muestra de 35 datos.

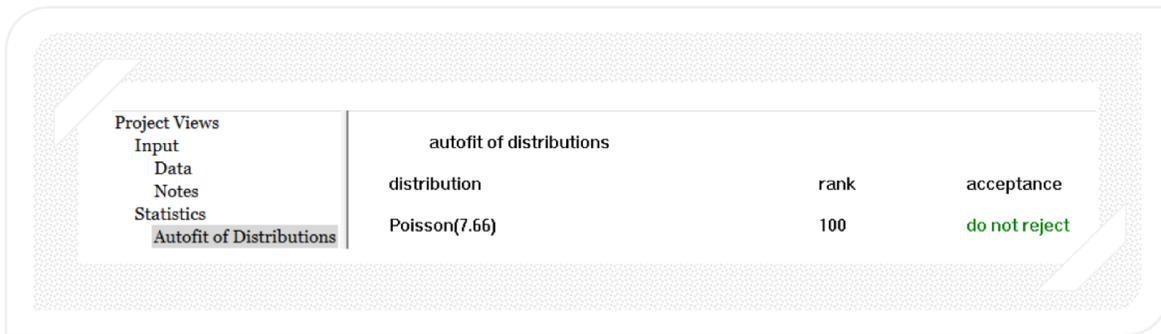
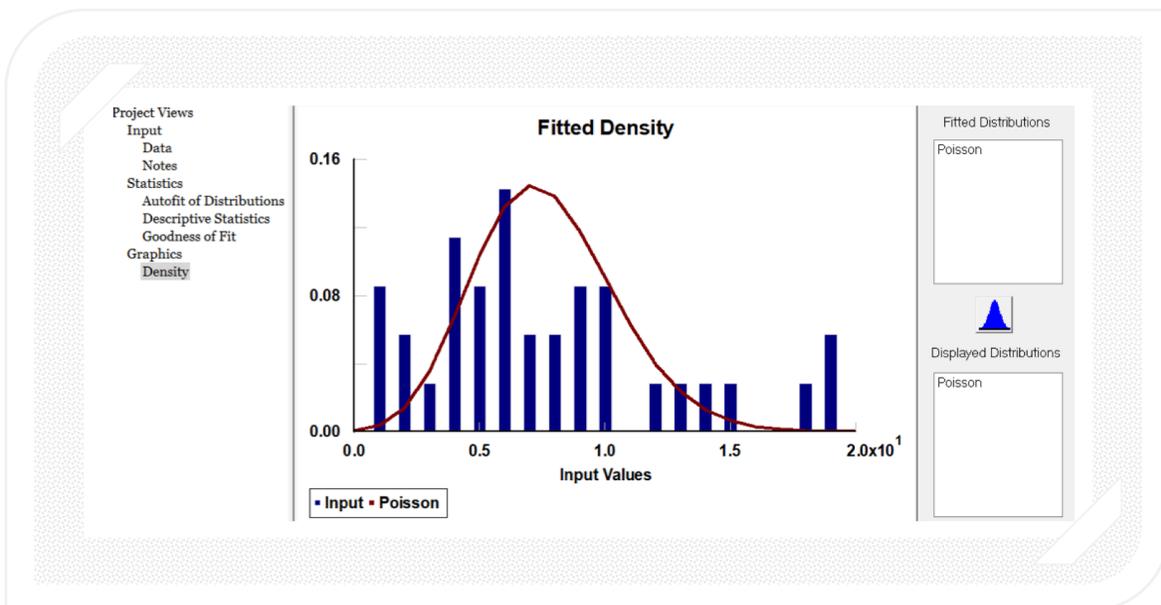


Ilustración 78 Prueba de bondad de ajuste\_Línea B\_Torniquetes.  
Fuente: Elaboración propia con Stat::fit, (2018).



Gráfica 3 Distribución ajustada de los datos\_Línea B.  
Fuente: Elaboración propia con Stat::fit, (2018).

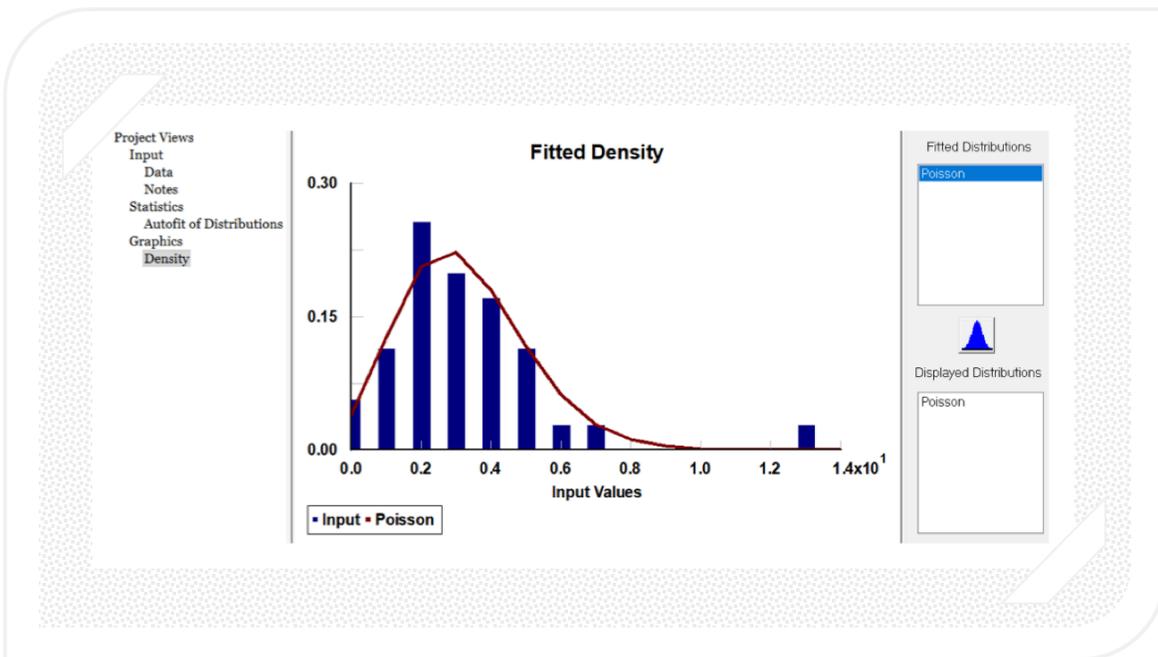
### Datos de Entrada en Estación Guerrero\_Línea 3\_Dir.Indios Verdes\_Torniquetes

Para la muestra datos recolectados en la Estación Guerrero, Línea 3 con Dirección a Indios Verdes, se obtuvieron 35 datos de entrada y al realizar la prueba de bondad de ajuste con la ayuda de Stat::Fit se obtuvo la distribución de Poisson con una

$\lambda=3.23$  (ver Ilustración 79) y en la gráfica 4 se puede apreciar la distribución ajustada de los datos para este caso.



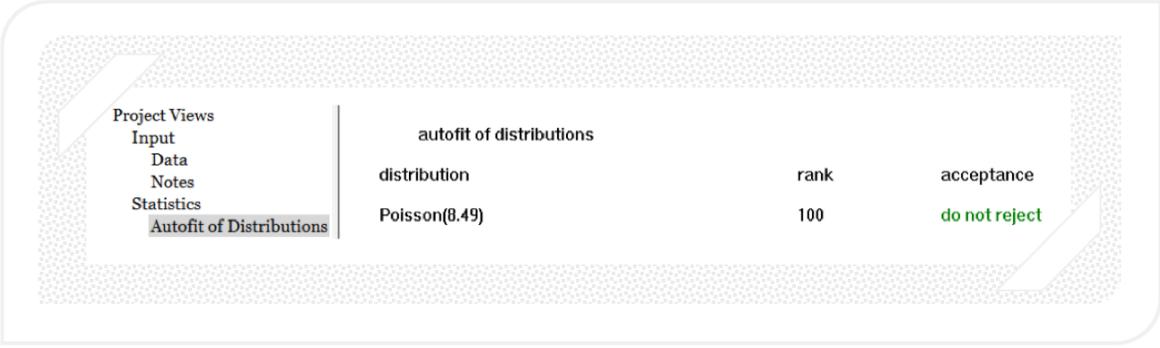
Ilustración 79 Prueba de bondad de ajuste\_Línea 3\_Dir. Indios Verdes.  
Fuente: Elaboración propia con Stat::fit, (2018).



Gráfica 4 Distribución ajustada de los datos\_Línea 3\_Dir. Indios Verdes.  
Fuente: Elaboración propia con Stat::fit, (2018).

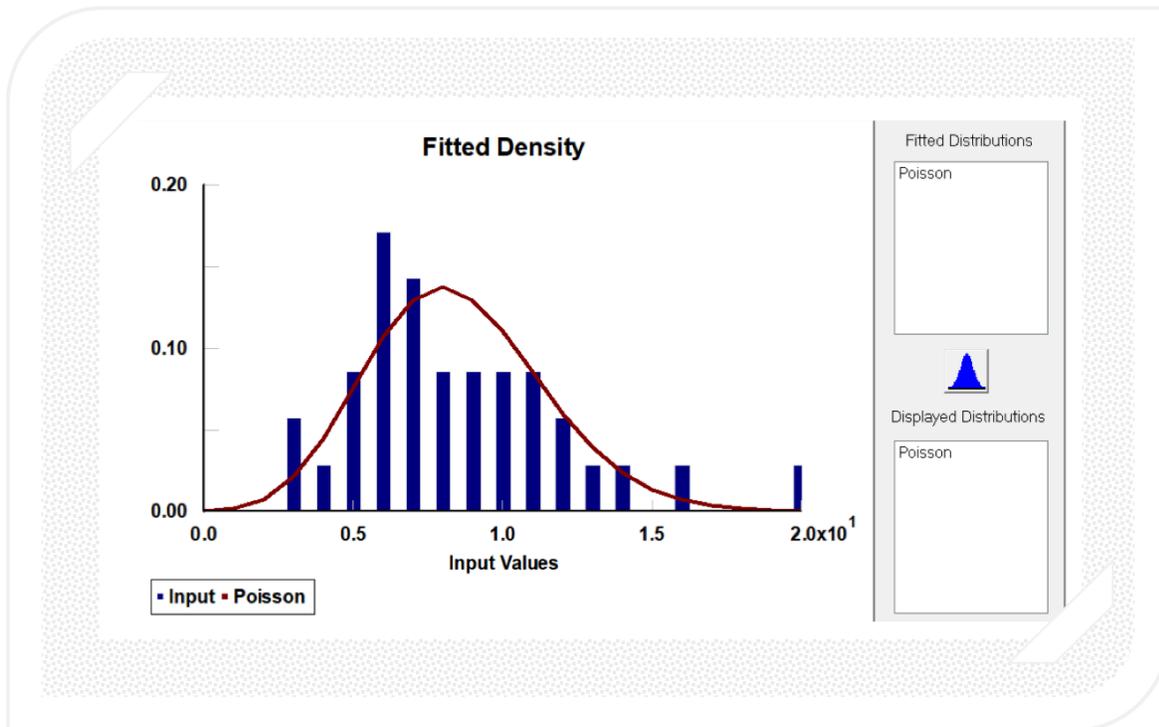
## Datos de Entrada en Estación Guerrero\_ Línea 3\_Dir. Universidad\_Torniquetes

Los datos que se obtuvieron en la Estación Guerrero, Línea 3 con Dirección a Universidad en la zona de torniquetes, con un total de 35 datos también fueron sometidos a una prueba de bondad de ajuste para obtener el tipo de distribución al cual se ajustan, resultando Poisson con una  $\lambda=8.49$  (ver Ilustración 80) y la gráfica 5 muestra la distribución ajustada de los datos.



autofit of distributions		
distribution	rank	acceptance
Poisson(8.49)	100	do not reject

Ilustración 80 Prueba de bondad de ajuste\_ Línea 3\_Dir. Universidad.  
Fuente: Elaboración propia con Stat::fit, (2018).



Gráfica 5 Distribución ajustada de los datos\_Línea 3\_Dir. Universidad.  
Fuente: Elaboración propia con Stat::fit, (2018).

#### IV. Enfoque Potenciales de Modelación

Para esta etapa se ha utilizado el enfoque Modelación Basada en Agentes (MBA) para caracterizar a los usuarios, representando la velocidad (m/s), volumen (m), tasa de llegada de los usuarios y de los trenes.

##### 3.1.3. Etapa 3. Simulación del Modelo (SIMO)

La Simulación del Modelo tiene como precedente la visita a la estación, donde cada ocasión que se visitó a la estación fue útil para la recolección de datos del comportamiento del sistema que se estudia.

Como parte de los datos, se obtuvo el diseño y dimensión a escala de la estación Guerrero (línea 3 y línea B), así como, la cantidad de escales y el tipo de escaleras, vitrinas de exhibición, ventiladores, negocios, extintores, barandales y rejas que limitan los carriles, zona de torniquetes y mobiliario dentro de la estación.

El plano de la estación a escala se construyó sobre el área de trabajo del Software AnyLogic, para reproducir la ambientación se utilizaron las librerías “Pedestrian” “Rail” que se encuentran disponibles en el software en su versión Learning.

Dentro de la librería “Pedestrian” existen 2 subgrupos de elementos (ver Ilustración 81), uno es el “Space Markup” de ellos sirve para la modelar el sistema a estudiar, los objetos se pueden ver en la vista 2D o 3D según las propiedades y configuración de cada elemento; el otro subgrupo llamado “Blocks” sirve para darle vida a la simulación a través de la configuración lógica que se indicará como debe comportarse el sistema.

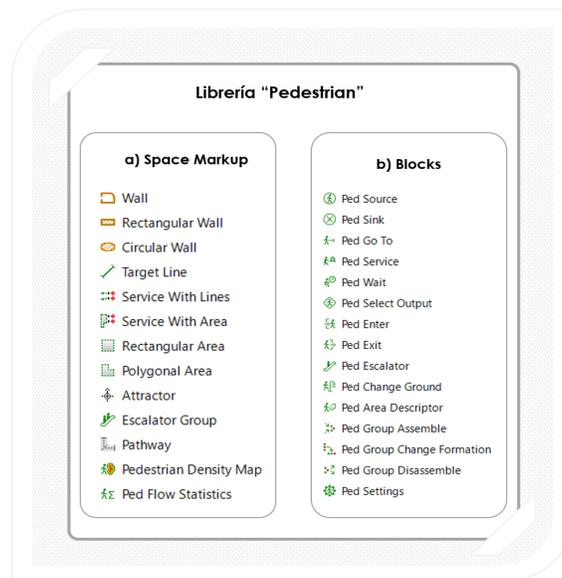


Ilustración 81 Librería “Predestrian” de Anylogic™. a) SpaceMarkup, b) Blocks

Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

## a) Space Markup

*Rectangular Wall* y *Circular Wall*, se utilizaron para representar las paredes que delimitan la estación, los muros que representan que se encuentra dentro de la estación, bloques, los locales comerciales dentro de la estación, una caseta de vigilancia en el Andén Dirección universidad y para crear un conjunto de escalos que representan a escaleras no mecánicas, la vista de los objetos se puede apreciar en 2D y 3D.

*Target Line*, *Rectangular Area* y *Polygonal Area*, las líneas se utilizaron en las entradas y salidas de la estación ya sea por torniquetes o en el área de andén. Los elementos de área fueron utilizados en la zona de escaleras donde se configuró la inclinación con la que suben o bajan los usuarios, también se utilizaron en los andenes de la Línea 3 para el área de ascenso y descenso del tren; debido al propósito con el que fueron utilizados solo se pueden ver en la vista 2D.

*Attractor*, este elemento ayuda a favorecer para que los usuarios lleguen a alguna área específica, se utilizó en la zona de andenes de la línea 3. Por su función de atracción hacia algunas áreas, la configuración de vista está definida en 2D.

*Escalator Group*, es la representación de las escaleras mecánicas, 1 fue colocada en el área que corresponden a la línea 3 y 4 más fueron colocadas en el área de la línea B. Se pueden apreciar en la vista 2D y 3D.

*Pathway*, funcionan para que los agentes sigan una ruta y con la dirección predeterminada. Este elemento fue aprovechado principalmente para los carriles que están definidos para realizar la transferencia de una línea a otra, su vista está configurada en 2D.

*Pedestrian Density Map*, El mapa de calor ayuda a apreciar la densidad de flujo a través de una escala de colores, donde el color frío (azul) representa una baja densidad de agentes y el rojo advierte una congestión de usuarios. La vista de esta herramienta solo está disponible en 2D.

Algunos objetos en 3D como extintores, ventiladores, torniquetes y vallas se obtuvieron de 3D Data Warehouse – Sketchup.

## b) Blocks

*Ped Source, Ped Go y To Ped Sink*, Son los elementos principales para dar lógica a la simulación ya que con estos se puede determinar la generación, hacia donde y como dirigir el movimiento, así como la salida de la simulación de los agentes.

*Ped Wait*, Se utiliza en los caos en los que los usuarios requieren realizar una espera antes de continuar con otro movimiento o salida de la simulación.

*Ped Exit y Ped Enter*, Estos elementos en conjunto funcionan para retirar extraer a los agentes de algún punto del de a simulación y colocarlos en otro punto. Estos fueron utilizados para la zona de escaleras de la Línea 3, cuándo utilizan los pasillos que pasan por debajo de las vías para realizar un cambio de dirección.

*Ped Change Ground y Ped Area Descriptor*, A diferencia de las escaleras eléctricas, las escaleras convencionales requieren un armado y configuración de acuerdo con los requisitos necesarios para que los agentes cambien de un piso a otro y se configure su velocidad en el área de escaleras.

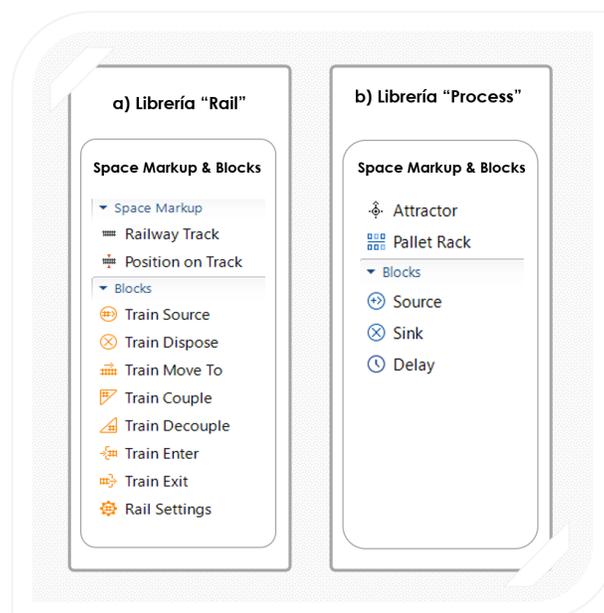


Ilustración 82 Librerías "Rail" y "Process".  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

## **Librería “Rail”**

Al igual que en la librería “Pedestrian” la librería Rail cuenta con 2 subgrupos (ver Ilustración 82, inciso a) que son “Sapce Markup” y “Blocks”

*Railway Track*, Este elemento permite dibujar la vía del tren, se colocaron 2 elemento de este tipo para representar la vía del tren que va a dirección Indios Verdes y otro para la vía del tren que va a Dirección Universidad, con cista en 2D y 3D.

*Position on Track* Fue utilizado para determinar los puntos exactos en los que el tren entra, el tren se detiene para el ascenso y descenso y el tren sale.

## **Blocks**

Train Source, Train Move To y Train Dispose, Han sido utilizados para configurar la entrada, la llegada, parada en la estación y la salida de los trenes.

Anylogic™ es un Software desarrollado para la simulación de procesos, agentes y dinámica de sistemas, tiene una interfaz amigable lo que permite un manejo del software sea muy intuitivo y con ayuda para la construcción de los modelos de simulación.

Para completar la configuración de agentes como lo son usuarios y tres, fue necesario utilizar la librería “Process” (ver Ilustración 82, inciso b), los elementos utilizados fueron los siguientes:

Delay, se utilizó para marcar un tiempo de espera entre un proceso y otro. En el caso de los Usuarios se utilizó para el tiempo en que tardan en recorrer los pasillos que pasan debajo de las vías en la Línea 3. También se utilizó en la lógica de trenes para configurar el tiempo que los trenes necesitan para el descenso y ascenso de pasajeros en la zona del andén.

Sink, fue utilizado para eliminar los trenes de la simulación una vez que salen de la estación.

Con los elementos de la sección de Space Markup de las librerías “Pedestrian y Rail” se elaboró el plano a escala (ver Ilustración 83) y la caracterización de la estación Guerrero, considerando la conexión entre la línea 3 y B, tomando en cuenta las dimensiones reales y la infraestructura que separa los pasillos y escaleras de conexión. Así como la dirección de los flujos que se ha establecido para el horario más conflictivo para la estación.

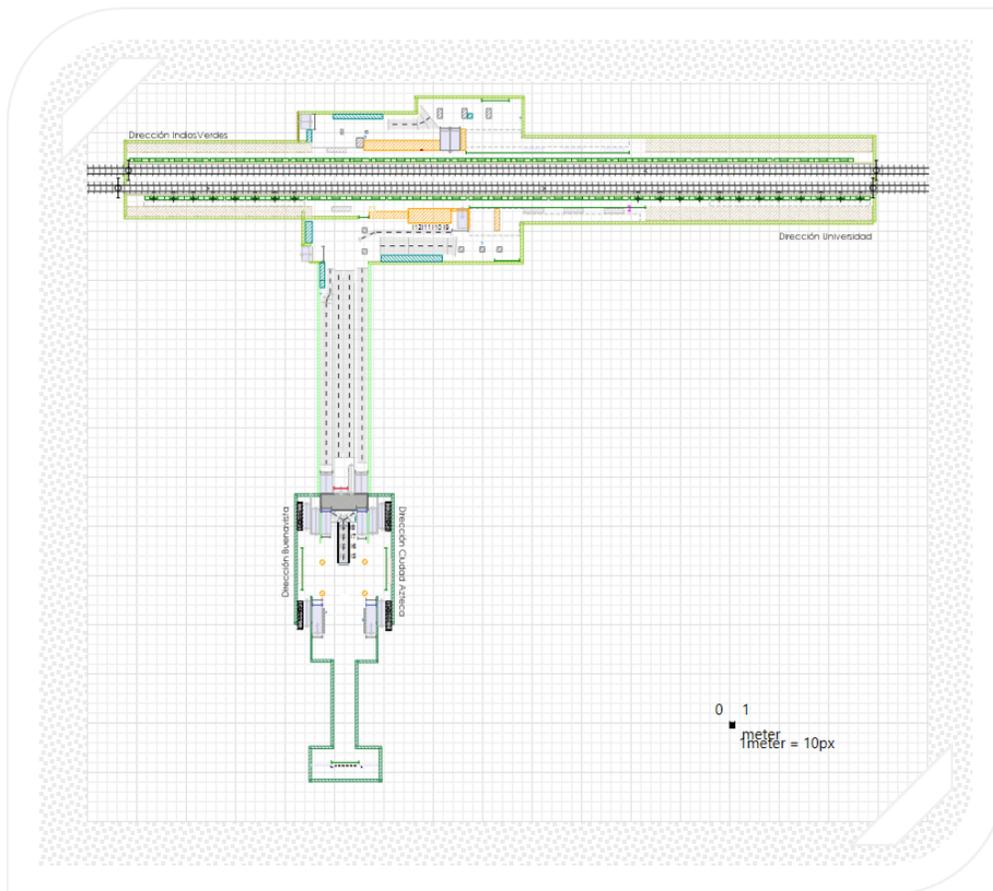


Ilustración 83 Plano de la estación Guerrero  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

De acuerdo a lo señalado anteriormente, para recrear el comportamiento del sistema, se requiere elaborar el comportamiento lógico que se utilizará dentro del plano previamente diseñado; y con la ayuda de los elementos del “Blocks” de las librerías “Pedestrian” y “Rail” es como se obtiene el diseño de la lógica de los agentes unos para replicar el comportamiento de los Usuarios del STC dentro de la Estación Guerrero (ver Figura 84) y otro más para representar la frecuencia de los trenes que llegan a la Estación Guerrero - Línea 3 (ver Figura 85).



Ilustración 84 Lógica de la estación Guerrero.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

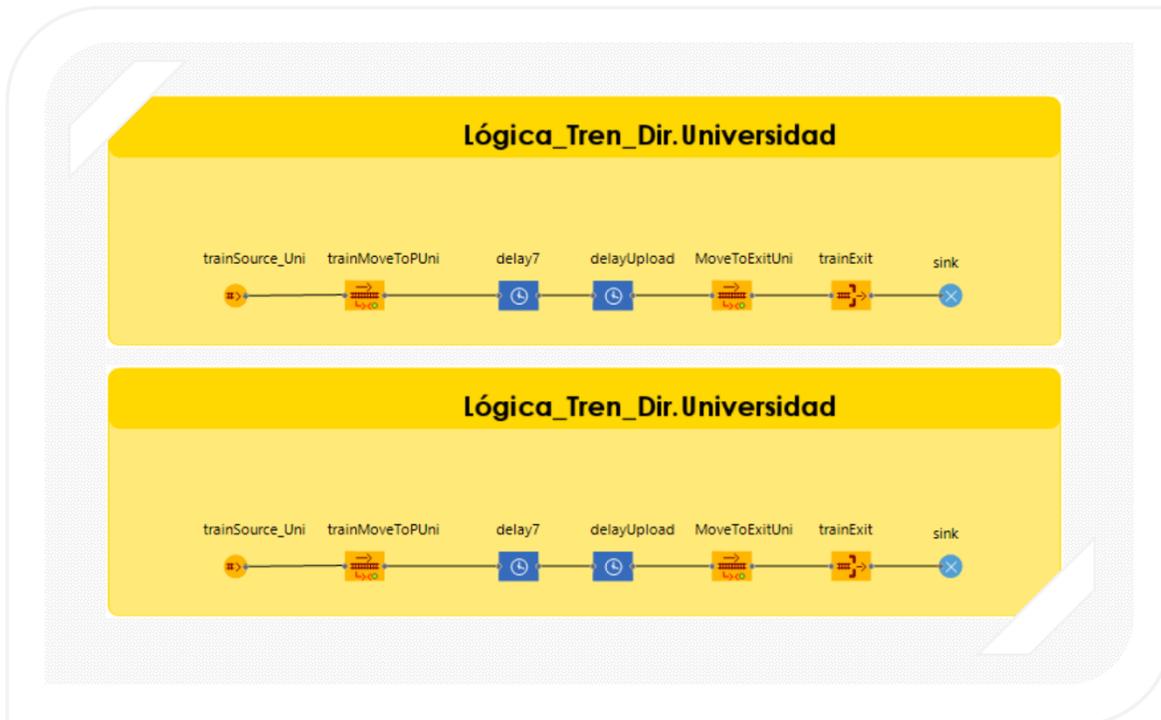


Ilustración 85 Lógica de trenes.  
 Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

Una de las bondades del software Anylogic™, es que permite una animación en 3D como se señaló anteriormente. Adicional a las configuraciones en cada uno de los elementos para que puedan mostrarse en vista 3D, es necesario agregar el elemento de Vista 3D para activar la vista General del plano en ese formato. Al momento de reproducir el modelo de simulación nos permite apreciar desde la lógica, la vista 2D, y la vista 3D como se puede apreciar en las siguientes imágenes, tenemos la vista de la entrada de la Línea B, la zona central y escaleras de la Línea B (ver Figura 86), los pasillos de transferencia que conecta la Línea B y la Línea 3 (ver Figura 87), y una vista de la Línea 3 donde se pueden apreciar el flujo de los usuarios, los Trenes en la zona de andenes (ver Figura 88).



Ilustración 86 Estación Guerrero, entrada por torniquetes. Vista 3D.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).



Ilustración 87 Zono de transferencia de Línea B a Línea 3. Vista 3D  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).



Ilustración 88 Estación Guerrero, Línea 3. Vista 3D  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

### 3.1.4. Etapa 4. Análisis del Modelo de Simulación (AMSI).

En esta última etapa de la metodología MoSASCoM, comprobaremos la verificación del modelo, la validación del modelo y por último se presentarán tres escenarios alternos para su análisis.

#### 3.1.4.1. La verificación del modelo de simulación

La verificación, consiste en comprobar que el modelo de simulación que fue implementado en computadora a través del software (Anylogic™, en este caso), se encuentra libre de errores y que la elaboración del flujograma se ha elaborado de forma correcta (ver Ilustración 89).



Ilustración 89 Verificación del modelo de simulación.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

#### 3.1.4.2. La validación del modelo de simulación

Para llevar a cabo la validación del modelo de simulación, el cual implica un proceso para determinar si el modelo conceptual puede ser sustituido por el sistema real a los fines de la experimentación. Se utilizó la técnica de validación basada en el raciocinio humano (González P. et al., 2018).

A través de las reuniones con el personal del STC, se ha mostrado el modelo de simulación implementado ha sido aprobado para continuar con las siguientes fases del proyecto. Adicional a lo anterior el proyecto se sometió al *Quinto Premio de Innovación Tecnológica “Ing. Juan Manuel Ramírez Caraza”*, en la categoría de proyectos por desarrollar, donde se obtuvo el visto bueno y la aprobación para continuar hasta la conclusión del proyecto (ver Ilustración 90), y la presentación la propuesta de solución.

**GANADORES**  
**QUINTO PREMIO**  
 A LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA  
**“ING. JUAN MANUEL RAMÍREZ CARAZA”**  
 Para el desarrollo de Proyectos con Aplicación al Metro de la Ciudad de México 2018.

**PROYECTOS A DESARROLLAR**

No.	Proyecto	Participante(s)
3	MODELO DE SIMULACIÓN PARA DISMINUIR LA CONGESTIÓN DE USUARIOS EN LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA DEL STC METRO: EL CASO DE LA ESTACIÓN GUERRERO	AVILA CALLEJAS LAURA PATRICIA HUERTA BARRIENTOS AIDA

Ilustración 90 Evidencia de validación del modelo de simulación  
 Fuente: STC (2018)

### 3.1.4.3. Construcción de escenarios alternos.

Con el propósito de conocer el efecto que pueda surgir de alguna modificación con a las rutas que actualmente están destinadas para dirigir el flujo de usuarios en la Estación Guerrero en el horario de 06:00 a 10:00 horas, y también considerando los puntos de mayor congestión en la estación en ambas líneas, se genero 3 escenarios, que a continuación se presentan.

#### **Escenario alterno 1**

El primer escenario que se propone al igual que el escenario actual, y cuando llegan a la línea 3 convergen en un carril lo suficientemente ancho para recibir el flujo de ambos (esto significa que se conserva la única pero amplia entrada al andén Universidad). Como diferencia del modelo original, se propone una división posteriormente se divide en 3 caminos alternos para distribuir el flujo a lo largo del andén.

- ***Escaleras de conexión a pasillos de transferencia.***

Se elimina la rampa que conecta con los pasillos de transferencia centrales.

- ***Pasillo de pasillo de transferencia.***

Se conserva el uso de los carriles centrales (2)

- ***Línea 3.***

cuando llegan a la línea 3 convergen en un espacio lo suficientemente amplio para recibir el flujo de ambos carriles (esto significa que se conserva la única pero amplia entrada al andén Universidad).

Se elimina el contra flujo (para los que salen de las escaleras), se propone que sea solo para ir de dirección Universidad a dirección Indios Verdes

- **Andén con dirección a Universidad.**

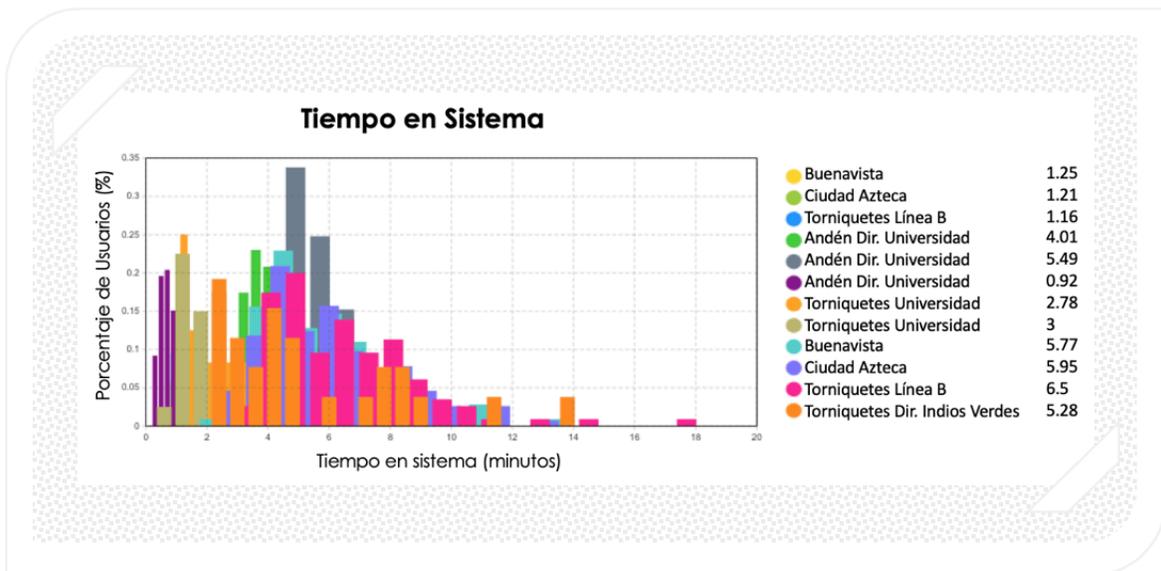
Los resultados del tiempo en la estación Guerrero se muestran a continuación.

Para quienes salen del andén de universidad y se dirigen a la Línea B se les asigna un carril a la izquierda para que puedan tomar el primer carril disponible y con esto se reduce de 2 a 1 cruce que hacían con los usuarios que van en contra flujo.

Para este ejercicio, los resultados son favorables ya que el tiempo en sistema de la mayoría de los usuarios estaría en un rango de 1 y 6.5 minutos aproximadamente.

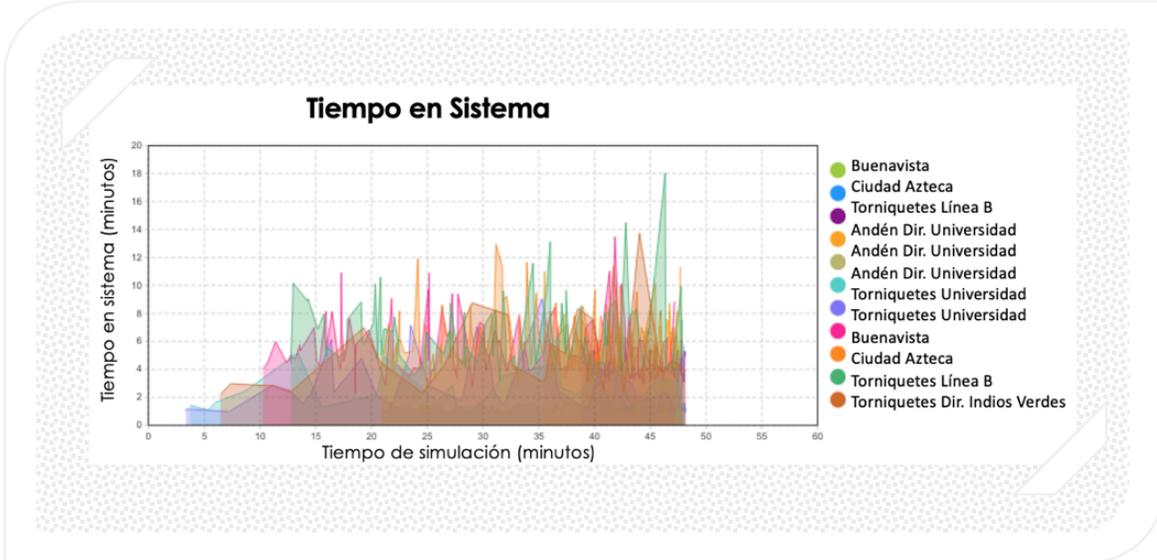
El tiempo que máximo esperado que un usuario puede transitar en la estación, sin distinguir su origen y destino es de 18 minutos aprox. (ver Gráfica 6), sin embargo, la mayoría de los usuarios utilizarán la estación de 4 a 8 minutos. (ver Gráfica 7).

Como es de esperarse ante una alta demanda de los usuarios que van de línea B a línea 3, habrá una alta concentración de usuarios en la zona del andén y de los pasillos de transferencia (ver Ilustración 91)



Gráfica 6 Histograma: Tiempo en sistema\_Escenario 1

Fuente: Anylogic™, (2019).



Gráfica 7 Tiempo en Sistema\_Escenario 1  
 Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

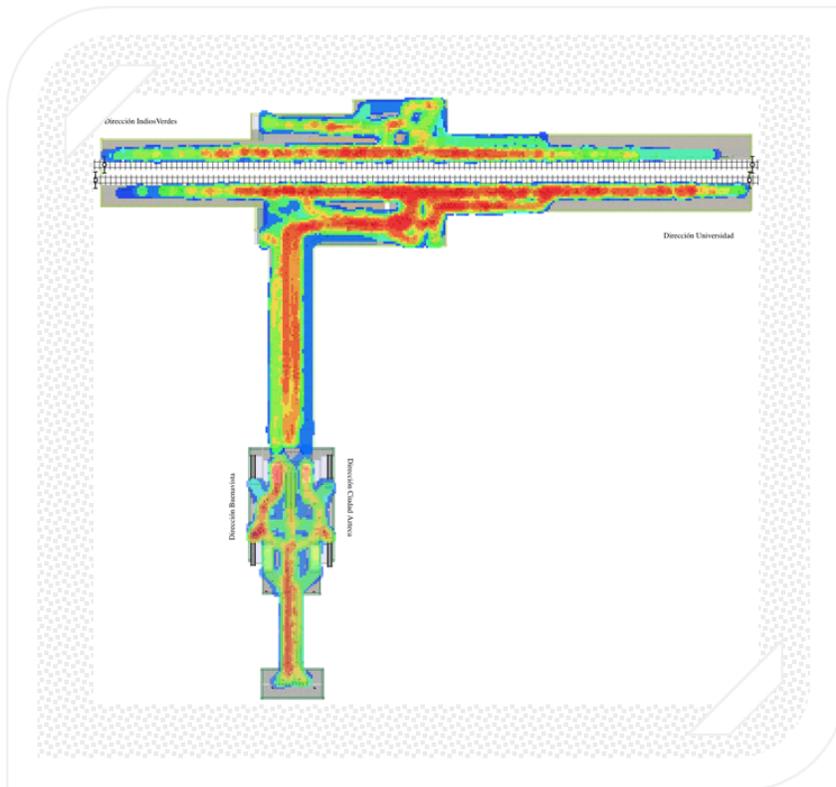


Ilustración 91 Mapa de Calor y Vista 2 D\_Escenario 1.  
 Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

## **Escenario alternativo 2**

Tomando en cuenta las modificaciones que se implementaron en el escenario anterior, se ha realizado algunos cambios más significativos con el propósito de disminuir los cuellos de botella durante la transferencia,

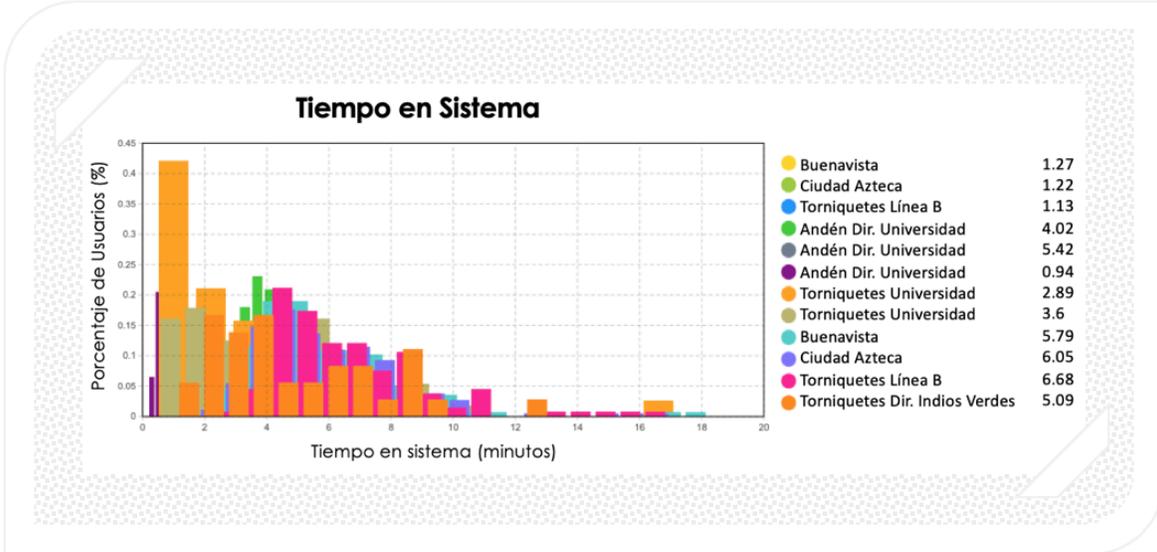
- ***Escaleras de conexión a pasillos de transferencia.***

Las 2 escaleras que se utilizan para ascender de la línea B ( y llegar a los pasillos de transferencia centrales, se unen en un puente (de forma rectangular) con una salida, el flujo se puede ver como una “y” (dos entradas y 1 salida), este flujo provoca un cuello de botella y son como son la forma de las escaleras que produce un cuello de botella en el flujo.

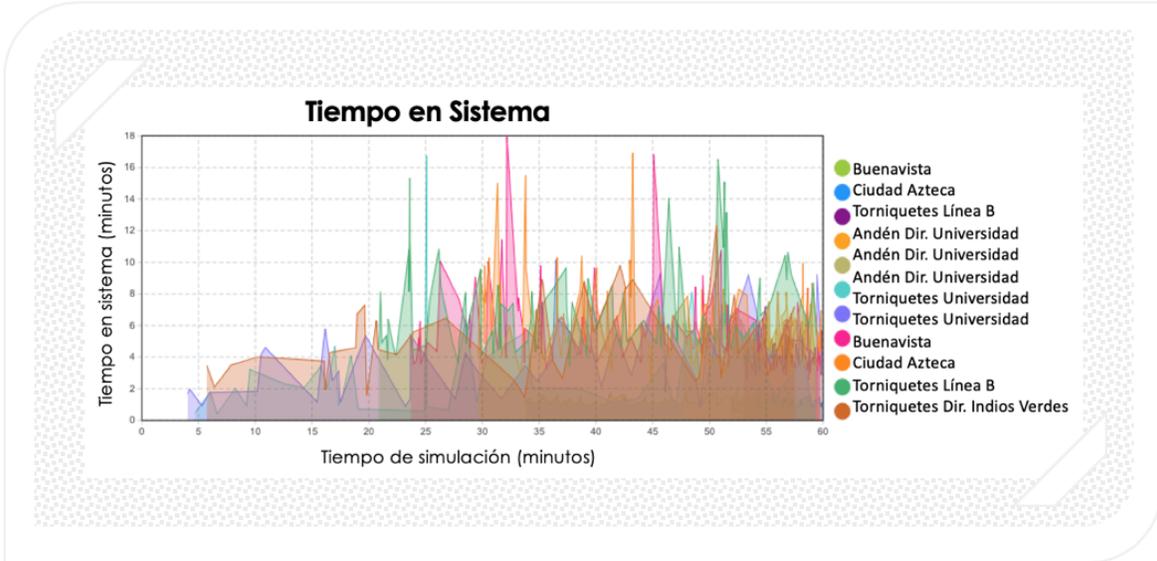
- ***Línea 3.***

Se han removido algunos establecimientos y una librería que se encuentran en la Línea 3 (después de los pasillos de transferencia y antes de llegar al andén con dirección a Universidad) que reducen el espacio para transito libre de los usuarios, además de la obstrucción temporal de quienes se detienen a comprar.

En este segundo escenario, el tiempo que los usuarios transitan dentro de la estación puede ir de 1 a 6.68 minutos aproximadamente (ver Gráfica 8) aunque para algunos destinos se ve ligeramente disminuido el tiempo en la estación respecto al escenario alternativo 1, sin embargo, se presentan más eventos donde los usuarios se desplazan dentro la estación hasta por 18 minutos y el tiempo de la mayoría de los usuarios en la estación tiende de 4 a 10 minutos (dos minutos más que en el escenario anterior (ver Gráfica 9), aunque se alinearon las entradas del puente que conecta la Línea B con los pasillos de transferencia, el tamaño de la salida de puente es menor a la capacidad de salida por lo que los usuarios podrán llegar más rápido y caminar en el puente pero se generará una congestión antes en la entrada de los pasillos de transferencia centrales. (ver Ilustración 92).



Gráfica 8 Histograma\_Tiempo en Sistema\_Escenario 2  
 Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).



Gráfica 9 Tiempo en Sistema\_Escenario 2  
 Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

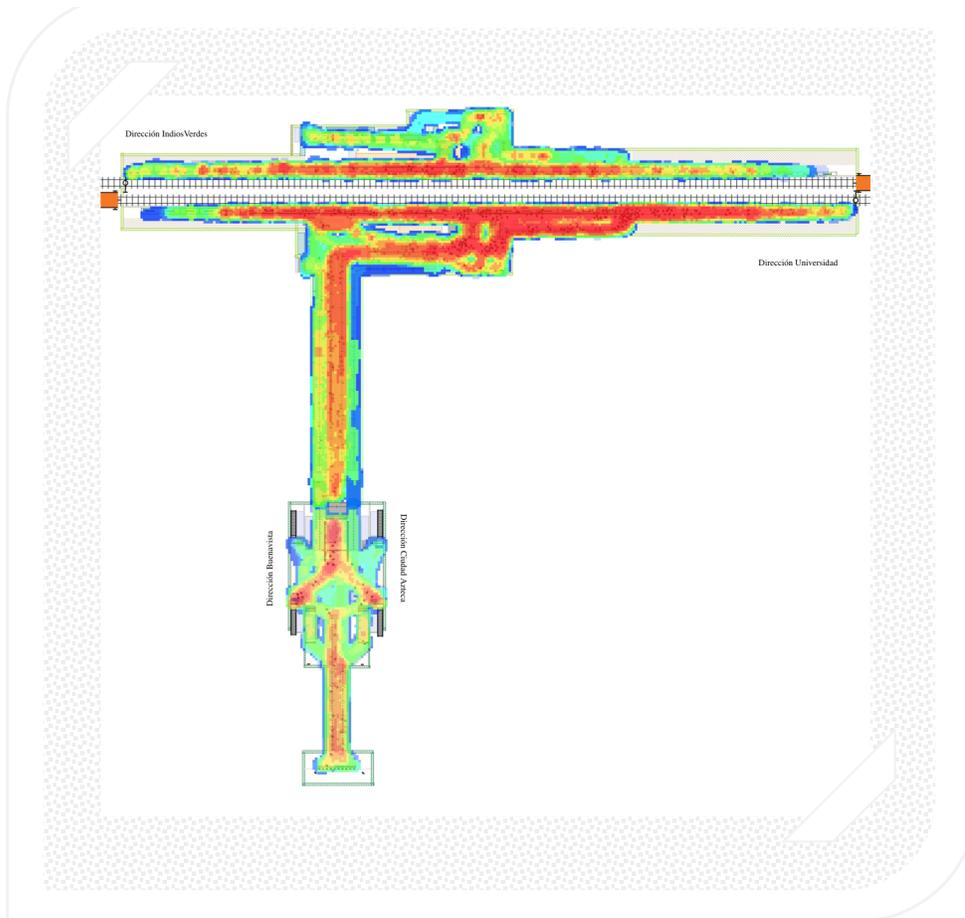


Ilustración 92 Mapa de calor y Vista 2D\_Escenario 2.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

### Escenario alternativo 3

Por último, ha propuesto ampliar el número de carriles para el flujo de usuario que van de Línea B a Línea 3, también se consideró incrementar a 2 los accesos hacia el andén con dirección a universidad.

- ***Escaleras de conexión a pasillos de transferencia.***

Se conservan en 2 entradas y una salida con el flujo en forma de “y”.

- ***Pasillos de transferencia.***

Se conservan los 2 que actualmente están asignado y de los 2 carriles asignado para ir de la línea 3 a la Línea B se asigna 1 para las usuarias mujeres y para personas con discapacidad

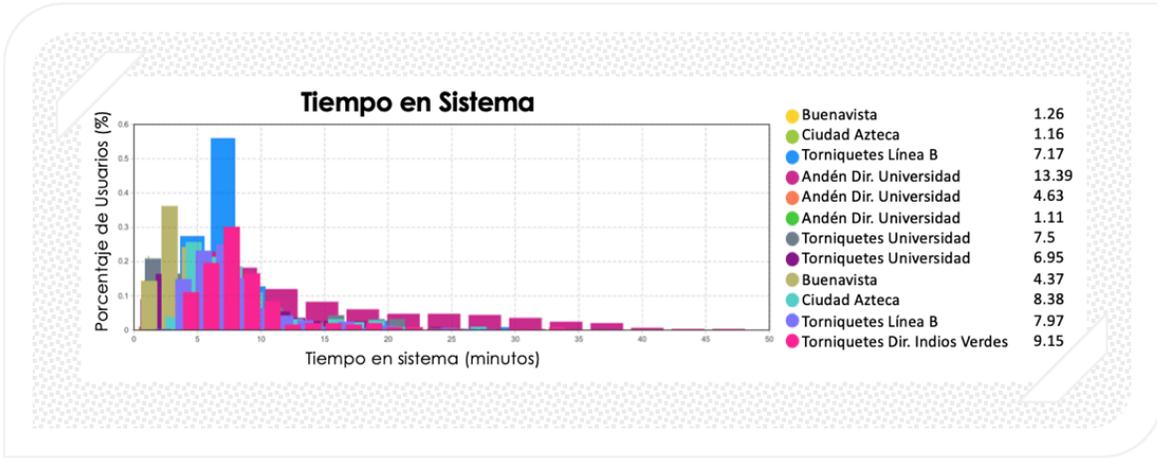
- ***Línea 3.***

2 entradas, Se conserva la entrada original (extremo derecho) y se abre una nueva entrada de lado izquierdo, para facilitar la distribución a lo largo del andén.

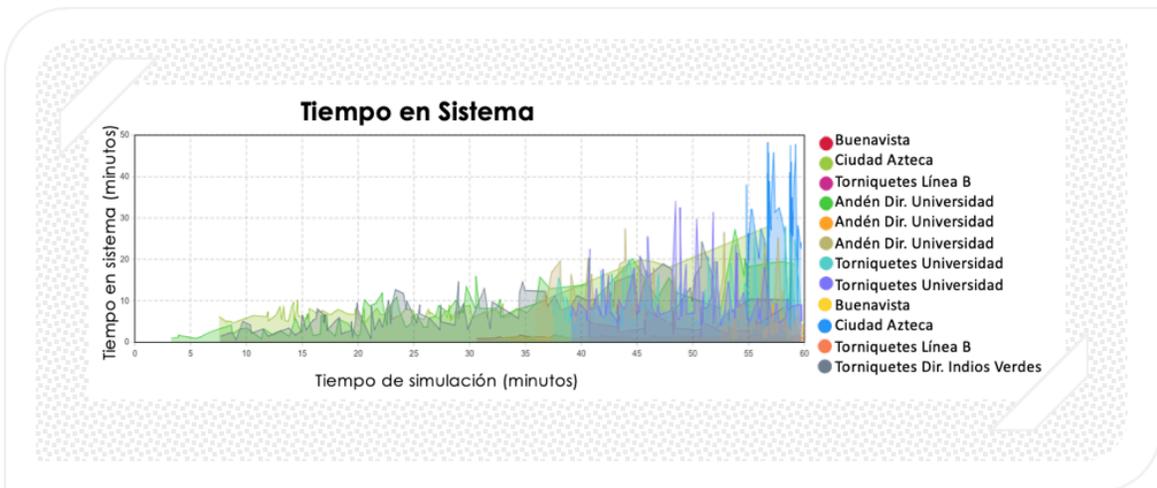
- ***Andén con dirección a Universidad.***

Con os accesos de entrada y salida del andén, se tiene como propósito una distribución más uniforme a lo largo del andén, cuidando la guía y pasillo especial para las mujeres y las personas con discapacidad para facilitar su acceso a los primeros 3 vagones que el STC ha confinado para ellos.

En este último ejercicio se obtienen resultados desfavorable tomando como base los dos escenarios alternos anteriores, aunque se amplió el espacio destinado para realizar la transferencia y la entrada al andén el tiempo de los usuarios se incrementó notablemente llegando hasta los 48 minutos (ver Gráfica 10), y la mayoría de los usuarios permanece en la estación en periodo de 10 a 20 minutos y (ver Gráfica11), las colisiones entre los usuarios que entran y salen de andén generan un congestión mayor dentro y fuera del andén con Dirección a Universidad. (ver lustración 95).



Gráfica 10 Histograma\_Tiempo en Sistema\_Escenario 3.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).



Gráfica 11 Tiempo en Sistema\_Escenario 3.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

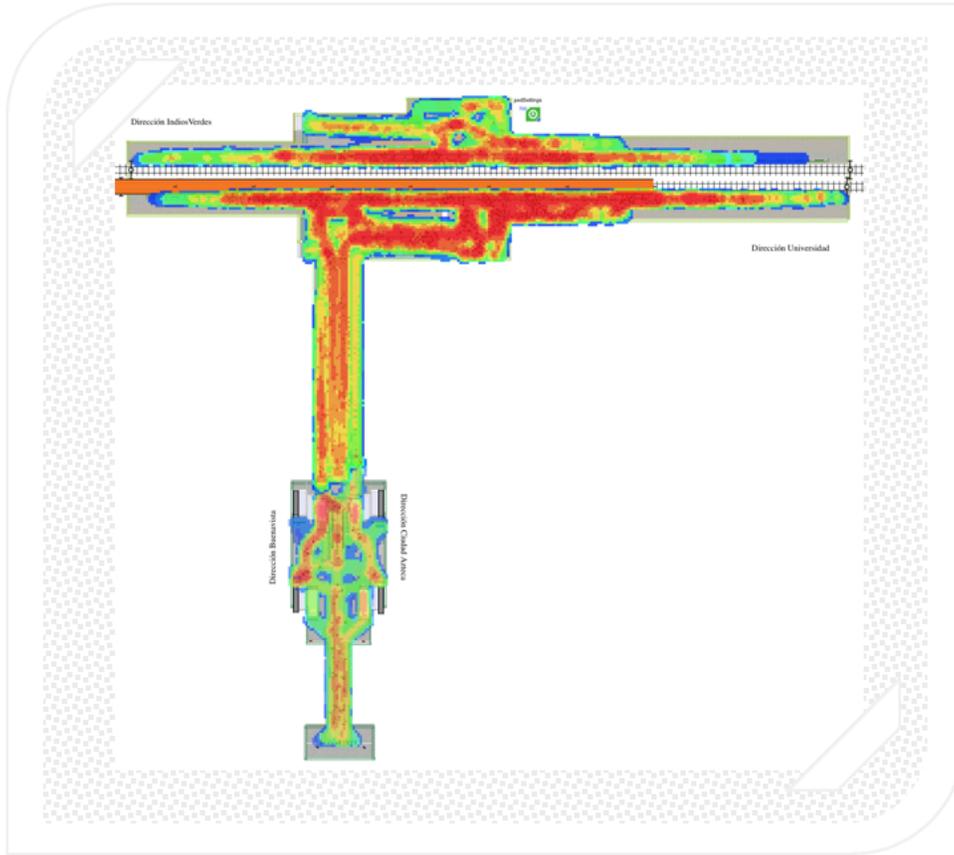


Ilustración 93 Mapa de Calor y Vista 2 D\_Escenario 3.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

Los modelos antes presentados, considera todas la entradas y salidas posibles de la estación Guerrero (Línea B y Línea 3), Es vulnerable y los tiempos puede incrementar ante eventos, como la frecuencia de llegada de trenes, la demanda total de usuarios a la estación o incidentes propios y ajenos al STC o lo que puedan causar los usuarios. El ejercicio se corre sobre una muestra de 60 minutos, tiempo límite de simulación en la versión Learning de Anylogic™.

## Capítulo 4 La Propuesta de Solución

En este último que capítulo que integra esta tesis, se presenta la propuesta de solución que ha surgido de una serie de pruebas realizadas a través del modelo de simulación implementado en Anylogic™.

Naturalmente debemos de comprender que la congestión en el transporte público se refiere a los fenómenos causados por la alta densidad de pasajeros y / o vehículos, lo que resulta en una disminución del rendimiento del servicio. (Cats O., West J. and Jonas E., (2016), sin embargo, es posible realizar un entendimiento y análisis del sistema, para cambiar aquello que ya no es funcional para la demanda para el cual fue planeado.

Implementar un modelo de simulación para comprender el comportamiento de un sistema, resulta favorecedor y práctico para elaborar escenarios y explorar diferentes configuraciones sin entorpecer el sistema real, y realizar pruebas del desempeño del sistema para identificar posibles soluciones que permitan mejorar la calidad del servicio, realizando ajustes

Como hemos podido observar en el capítulo 2, la estación Guerrero actualmente presenta una congestión en diversos puntos principalmente en escaleras que conectan de línea B a línea 3, en la línea 3 antes de ingresar al andén con dirección Universidad y en el centro del andén dirección Universidad.

Por lo anterior se han presentado 3 escenarios alternos, sin embargo, en el escenario alternativo 1 se implementaron algunos cambios menores respecto al original (como eliminar la rampa que se encuentra en el puente sobrepuesto sobre las escaleras que conectan con los pasillos centrales de transferencia), y ha resultado significativo disminuyendo al menos 2 puntos de congestión (escaleras que conectan de línea B a línea 3 y en la línea 3 antes de ingresar al andén con dirección

Universidad) y se refleja en un tiempo estándar de permanencia de los usuarios dentro de la estación.

Para los casos donde se registra una congestión dentro de la estación los expertos sugieren que es necesario implementar acciones relacionadas con la desviación de la multitud y el control de acceso (Boulet X., et al., (2017), aunado a lo anterior es importante considerar una disminución de *cruces múltiples*, ya que favorece la fluidez del tránsito y es aún más significativo cuando donde se disminuye el espacio (llamados comúnmente como “ *cuellos de botella*”) por el cual se puede transitar (ver Ilustración 94).

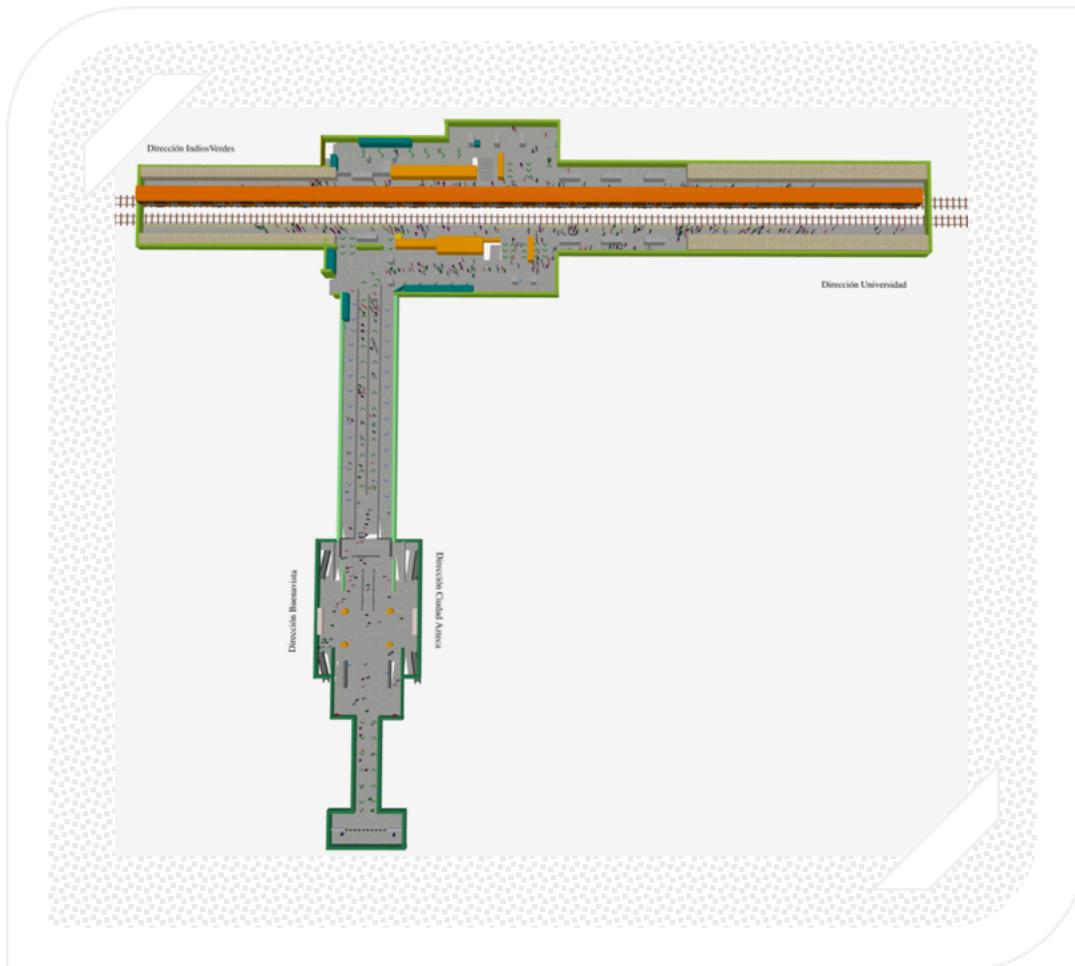


Ilustración 94 Estación Guerrero\_Escenario 1. Vista 3D.  
Fuente: Elaboración propia con Anylogic™, (2019).

Complementando el punto anterior, se sugiere reforzar el señalamiento para que sea más visible y constante desde cada línea de la estación Guerrero (B o 3), tomando especial atención en los puntos donde el usuario tiene más de una alternativa para hacer un cambio de dirección.

Aumentar la seguridad en los Andén, es otra de las sugerencias que acompañan la propuesta de solución, ya que ante una mejora del flujo de los usuarios y una mejora en el tiempo de transferencia de una línea a otra, se verá reflejado con una congestión en el andén de acuerdo con lo obtenido en la simulación, por lo que se sugiere implementar mejoras que favorezcan la seguridad de los usuarios hasta que pueda abordar el siguiente tren con disponibilidad. Otro de los retos que conlleva al área del andén es la delimitación del espacio para el descenso, el ascenso, la espera del tren, entrada y salida del andén. Es conseguir un comportamiento ordenado si se orienta al usuario con la ayuda de la señalización y de ser necesario reforzar con altavoces o personal que ayude a la orientación y cumplimiento de la buena práctica.

Por último, se sugiere reforzar las guías visuales para que los usuarios circulen sin detenciones o confusiones que puedan generar colisiones entre usuarios y/o congestión por un entorpecimiento del flujo.

## Conclusiones

El sistema de transporte ferroviario, ha sido un factor importante en la historia por sus múltiples beneficios y utilidad para el desarrollo Económico-Social. Para la Ciudad de México, el STC es uno de los transportes locales indispensables para los habitantes de la ZMVM para que se trasladen a trabajar, estudiar, o simplemente realizar actividades de ocio.

La congestión en el transporte ferroviario es un fenómeno muy común y nos es un problema exclusivo del STC que tenemos en la Ciudad de México. Los casos de estudio se dan principalmente en países del medio oriente donde se encuentran algunas de la ciudad con mayor sobrepoblación y los servicios de transporte se ven entorpecidos.

Es necesario una habilidad de observación y de pensamiento sistémico para integrar los componentes más relevantes, así como, las cualidades que pueden influir en el comportamiento del sistema, para que sean integrados. La simulación alternativa que favorece el entendimiento del comportamiento del sistema y mitiga los altos costos, impactos y riesgo que puede implicar realizar pruebas de cambios en la configuración del sistema real.

Finalmente podemos concluir que el objetivo que dirigió este proyecto se ha concretado exitosamente por que como se ha mostrado en el capítulo 3 se ha desarrollado un modelo de simulación que contribuye al entendimiento de la dinámica del flujo de pasajeros en la Estación Guerrero del STC.

## Referencias

1. ACETA. (2014). ¿Qué es un hub? . 04 - noviembre - 2014, de ACETA. Recuperado de: <http://www.aceta.es/estudio.php?id=93>
2. Akça Z. (2018) Comparative analysis with a new hub connectivity measure considering revenue and passenger demand, *Journal of Air Transport Management*, Volume 67, Pages 34-45, <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.11.002>.
3. Banks J. (1998). *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. DOI:10.1002/9780470172445
4. Banks J. et al., (2006). *Discrete-Event System Simulation*, (4a ed.) U.S.A: Prentice-Hall.
5. Borshchev A. (2013) *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod with AnyLogic 6*. AnyLogic North America.
6. Boulet X., Zargayouna M., Leurent F., Kabalan B., Ksontini F. (2017) A Dynamic Multiagent Simulation of Mobility in a Train Station. *Transportation Research Procedia*. Volume 27.2017. Pages 744-751. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.100>.
7. Caprara A., Kroon L., Monaci M, Peeters M. , Toth P., (2007). Chapter 3 Passenger Railway Optimization, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, Elsevier, Volume 14, Pages 129-187, [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14003-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14003-7).
8. Cats O., West J., Eliasson J. (2016) A dynamic stochastic model for evaluating congestion and crowding effects in transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*. Volume 89. Pages 43-57. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.04.001>.
9. Chen X., Li H., Miao J., Jiang S., Jiang X. (2017) A multiagent-based model for pedestrian simulation in subway stations. *Simulation Modelling Practice and Theory*. Volume 71. Pages 134-148. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.12.001>.

10. Chung C. (2004) Simulation Modeling Handbook, A practical approach. Recuperado de: [http://read.pudn.com/downloads219/ebook/1028987/Simulation\\_Modeling\\_Handbook.pdf](http://read.pudn.com/downloads219/ebook/1028987/Simulation_Modeling_Handbook.pdf)
11. de Barros A., Somasundaraswaran A., (2017) Wirasinghe. Evaluation of level of service for transfer passengers at airports. *Journal of Air Transport Management*. Volume 13, Issue 5. Pages 293-298. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2007.04.004>.
12. De Cea, J., & Fernández, E. (1993). Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model. *Transportation Science*, 27(2), p.p.133-147. Recuperado de: <http://www.jstor.org/stable/25768580>
13. Feng J., Li X., Mao B., Xu Q. and Bai Y. (2017). Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: Train and passenger flows, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Volume 474. Pages 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.085>.
14. Fonseca J., van der Hurk E., Roberti R. and Larsen A., (2018), A heuristic for transfer synchronization through integrated timetabling and vehicle scheduling, *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 109, Pages 128-149, <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.01.012>.
15. Fonseca P., Casas I., Casanovas J., Ferran X., (2014). Passenger flow simulation in a hub airport: An application to the Barcelona International Airport, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 44, Pages 78-94, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.03.008>.
16. Freling R., Lentink R. and Kroon L. and Huisman D. (2002) Shunting of Passenger Train Units in a Railway Station (September 2002 9.). ERIM Report Series Reference No. ERS-2002-74-LIS. Recuperado de: <https://ssrn.com/abstract=371017>
17. García-Valdecasas Medina, J. (2011). La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales. *Reis. Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, (136), 91-109. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99722480004>

18. Gilbert N. (2007) Agent-based models. The Centre for Resarch in Social Simulation. University of Surrey. Recuperado de: <https://laboratorioespacial.crim.unam.mx/albano/lecturas/gilbert.pdf>
19. González – Hernández P., Huerta Barrientos A., Flores de la Mota, I. (2018). Optimisation and simulation of an e-bike manufacturing system: the case of a small assembly factory. *Int. J. Service and Computing Oriented Manufacturing*, 3 (2/3), 151-170.
20. Grigoryev I: (2016) Anylogic 7 in Three Days. Ilya Grigoryev
21. Guo Z., Zhao J., Whong C., Mishra P., Wyman L.. (2017) Redesigning subway map to mitigate bottleneck congestion: An experiment in Washington DC using Mechanical Turk. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Volume 106. Pages 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.09.017>.
22. Hall, A.D. & Fagen, R.E. (1956). Definition of system. *General Systems*, yearbook of the Society for General Systems Research (SGSR – now ISSS).
23. Hodiament F., Jünger S., Leidl R., Maier B.O., Schildmann E. and Bausewein C. (2019) Understanding complexity - The palliative care situation as a complex adaptive system. *BMC Health Services Research*, 19 (1), art. no. 157, Recuperado de: <https://bmchealthservres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12913-019-3961-0>.
24. Holland, J.H. (2006) Studyng Complex Adaptative Systems. *Jrl Syst Sci & Complex*.19: 1. <https://doi.org/10.1007/s11424-006-0001-z>
25. Hossein Karimi, (2018) The capacitated hub covering location-routing problem for simultaneous pickup and delivery systems, *Computers & Industrial Engineering*, Volume 116, Pages 47-58, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.020>.
26. Huerta-Barrientos. (2016). *Introducción a la modelación y simulación de sistemas complejos*. Primera Edición. México

27. INEGI (2007) "Encuesta de Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2007". Recuperado de: <http://data.semovi.cdmx.gob.mx/work/sites/stv/docs/EOD2007.pdf>
28. INEGI (2017) "Encuesta de Origen-Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD) 2017". Recuperado de: [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodem/OrigenDest2018\\_02.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodem/OrigenDest2018_02.pdf)
29. Jiang Z., Hsu Ch., Zhang D., Zou X. (2016) Evaluating rail transit timetable using big passengers' data, *Journal of Computer and System Sciences*. Volume 82, Issue 1, Part B. Pages 144-155. <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2015.08.004>.
30. Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill.
31. Leurent F, Xie X. (2017) On passenger repositioning along station platform during train waiting. *Transportation Research Procedia*. Volume 27. Pages 688-695. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.123>.
32. Li W., Zhou J., (2013) The Optimize Management of Passenger Organization in Transfer Station based on Dynamic Passenger Flow Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Volume 96. Pages 1322-1328. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042813022763>
33. Li W., Zhu W. (2016) A dynamic simulation model of passenger flow distribution on schedule-based rail transit networks with train delays. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. Volume 3, Issue 4. Pages 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.09.009>.
34. Lin Ch., Lee S., (2018). Hub network design problem with profit optimization for time-definite LTL freight transportation, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 114, Pages 104-120, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.03.007>.
35. Lin M, Zhang A., (2016). Hub congestion pricing: Discriminatory passenger charges, *Economics of Transportation*, Volume 5, Pages 37-48, <https://doi.org/10.1016/j.ecotra.2016.02.001>.

36. Lipovich G., (2009) La calidad de los hubs de américa latina. (S/A). (S/F) Principales aeropuertos en México. Recuperado de: <http://www.ciltec.com.mx/es/infraestructura-logistica/aeropuertos>
37. Liu S., Yao E., Cheng X., Zhang Y., (2017) Evaluating the impact of new lines on entrance/exit passenger flow of adjacent existing stations in urban rail transit system, *Transportation Research Procedia*, Volume 25, Pages 2625-2638, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.316>.
38. Liu X., Li L., Liu X, Zhang T., Rong X., Yang L., Xiong D., (2018) Field investigation on characteristics of passenger flow in a Chinese hub airport terminal, *Building and Environment*, Volume 133, Pages 51-61, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.009>.
39. Malandri C., Fonzzone A, Cats O., (2018). Recovery time and propagation effects of passenger transport disruptions, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 505, Pages 7-17, <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.03.028>.
40. Najda C., (2003). *Low Cost Carriers and Low Fares: Competition and Concentration in the U.S. Airline Industry*. Department of Economics, Stanford University.
41. Naumov V., Samchuk G., (2017) Class Library for Simulations of Passenger Transfer Nodes as Elements of the Public Transport System, *Procedia Engineering*, Volume 187, Pages 77-81, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.352>.
42. Nedeliaková E., Sekulová J., Nedeliak I., L'och M., (2014). Methodics of Identification Level of Service Quality in Railway Transport, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 110, Pages 320-329, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.876>.
43. Pan H., Li J., Shen Q. and Shi C. (2017) What determines rail transit passenger volume? Implications for transit-oriented development planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Volume 57. Pages 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.016>.

44. Pineda C., Schwarz D., Godoy E. (2016) Comparison of passengers' behavior and aggregate demand levels on a subway system using origin-destination surveys and smartcard data. *Research in Transportation Economics*. Volume 59. p.p. 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.07.026>.
45. Rasoulkhani K. and Mostafavi A. (2018). Resilience as an emergent property of human infrastructure dynamics: A multi-agent simulation model for characterizing regime shifts and tipping point behaviors in infrastructure systems. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207674>
46. Rico O. (2002) Estrategias de actuación comercial para las terminales con baja utilización en la nueva estructura aeroportuaria mexicana. Recuperado de: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt212.pdf>
47. Rodrigue, J-P et al. (2017) *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, <https://transportgeography.org>.
48. Schmidt J. and Taylor R.(1970).*Simulation and Analysis of Industrial Systems*, Homewood, Illinois: Irwin, *Simulation & Games*, 1(4), 440 -448. <https://doi.org/10.1177/104687817000100408>
49. Semchugova E., Zyryanov V., Negrov N., Nikitina A., (2017). Models of Estimation of Application of Passenger Service Quality Parameters, *Transportation Research Procedia*, Volume 20, Pages 584-590, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.01.094>.
50. Starmans M., Verhoeff L., van den Heuvel J.. (2014) Passenger Transfer Chain Analysis for Reallocation of Heritage Space at Amsterdam Central Station. *Transportation Research Procedia*. Volume 2. Pages 651-659. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146514001446>
51. Takebayashi M., (2018) Managing airport charges under the multiple hub network with high speed rail: Considering capacity and gateway function, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 112, Pages 108-123, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.01.011>.

52. Talen S. (2016). A new trend in air travel? Exploratory Research into self-help hubbing and its consequences. Universidad Tecnológica de Delft.
53. The Editors of Encyclopedia Britannica. British Railways. Rescatado de: <https://www.britannica.com/topic/British-Railways#ref114144>
54. Tianyu Zhang, Dewei Li, Yu Qiao. (2018) Comprehensive optimization of urban rail transit timetable by minimizing total travel times under time-dependent passenger demand and congested conditions. Applied Mathematical Modelling. Volume 58. Pages 421-446. ISSN 0307-904X. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.02.013>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X18300830>)
55. Taha H. (1995). Investigación de Operaciones. Alfa Omega
56. Truyols S. & Alcubilla F. (2012). Economía del mercado aeronáutico. En Transporte aéreo e ingeniería aeroportuaria. Madrid, España: Delta publicaciones.
57. Universidad Politécnica de Valencia. (2013). Hub-and-Spoke. 28 junio 2013, de Universidad Politécnica de Valencia Sitio web: <http://ingenieriaaeroportuaria.blogs.upv.es/2013/06/28/hub-and-spoke/#more-1265>
58. Yang J., (2016) Safety Risk Analysis and Countermeasures Study on Regular Mass Passenger Flow of China's Urban Subway, Procedia Engineering, Volume 135, Pages 175-179, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.104>.
59. Yang X., Dong H., Yao X. (2017) Passenger distribution modelling at the subway platform based on ant colony optimization algorithm. Simulation Modelling Practice and Theory. Volume 77. Pages 228-244. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.005>.
60. Yao X., Zhao P., Qiao K., Li W. (2013) Modeling on Dynamic Passenger Flow Distribution in Urban Mass Transit Network. In: Zhang Z., Zhang R., Zhang J. (eds) LISS 2012. Springer, Berlin, Heidelberg.
61. Young S. &, Wells A. (1992). The airport system. Airport Planning & Management (500). United States of America: Mc Graw Hill.

62. Zhang T., et al. (2018) Comprehensive optimization of urban rail transit timetable by minimizing total travel times under time-dependent passenger demand and congested conditions. *Applied Mathematical Modelling*. Volume pages 421-446. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2018.02.013>.
63. Zhu Y, Hu Ch., Xu D., Tang J. (2014) Research on Optimization for Passenger Streamline of Hubs, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Volume 138. Pages 776-782. ISSN 1877-0428."
64. Zhu Y., Koutsopoulos H., Wilson N., (2017). Inferring Left Behind Passengers in Congested Metro Systems from Automated Data, *Transportation Research Procedia*, Volume 23, Pages 362-379, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.021>.