

## MATEMÁTICAS PARA MEJORAR LA OPERACIÓN DEL METRO

# En hora pico

Al estudiar el tren subterráneo desde distintos enfoques y por medio de ecuaciones, podrían solucionarse los problemas de saturación y demora que a diario afectan a los usuarios. Por Iliana Fuentes López

Es de madrugada y suenan los despertadores de los más de 20 millones de personas que habitan la Zona Metropolitana del Valle de México. El Sol apenas comienza a iluminar los hogares de este territorio: las 16 delegaciones del Distrito Federal, 59 municipios del Estado de México y uno de Hidalgo. Los metropolitanos se estiran, abren los ojos y se preparan para asistir a una jornada más de escuela o trabajo. La preocupación no será terminar de despabilarse, sino llegar a tiempo e ir lo menos incómodo posible en un recorrido cuya duración depende del destino y el transporte. Por eso, desde que salen de casa, los individuos determinan la movilidad urbana.

La última Encuesta Origen-Destino (de 2007) destaca que en la ZMVM de los 22 millones de viajes en un día hábil, 58.4% sucede en el D.F. y 41.3% en el Estado de México. De estos viajes, 14.8 millones (67.5%) se realizan en transporte público; la mayoría de viajeros pasan de ser peatones a pasajeros en una odisea que tiene su pico entre las 6:00 y las 9:00. Aunque los microbuses son los más ocupados, el Sistema de Transporte

Colectivo Metro es de los medios predilectos cuando se ha ingresado al Distrito Federal. Ha funcionado desde 1969, tiene 12 líneas (195 estaciones), traslada a más de 1,608 millones de personas al año y es de los más importantes por su tamaño (201,388 km).

Pero adentrarse en los pasillos subterráneos de esta red citadina significa enfrentarse a otro tipo de contratiempos: rebasar personas entre caminatas masivas, protegerse de empujones ineludibles, confrontar demoras de los trenes, cuellos de botella, presión en las puertas, paradas inexplicables a medio túnel o desorganización en caso de emergencias. Es un tipo de congestión que aparentemente no podría expresarse en otros términos que no sean quejas de los usuarios. Sin embargo, hay una forma de traducir esos problemas en un lenguaje científico para darles soluciones metódicas: a través de las matemáticas.

## Próxima estación: Iztapalapa

Hace cinco años los ingenieros del Metro querían poner máquinas expendedoras de boletos en todo el sistema. Así, solicitaron la asesoría del Departamento de Matemáticas

de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I) para saber cuántas colocar y en dónde. Aunque el proyecto no pudo realizarse debido a cuestiones de presupuesto, el encuentro fortuito entre estas dos instituciones no fue en vano. Sirvió para que la comunicación entre ingenieros y matemáticos empezara a fluir, y plantear la problemática del Metro.

"Ellos no nos hablaban de ecuaciones o términos especializados; nos decían problemas comunes", comenta en entrevista el doctor Joaquín Delgado Fernández, jefe del citado departamento de la UAM. "Pero al conversar, nosotros empezamos a escuchar y entender lo que ellos querían. Tratamos de limpiar toda esa maraña de información y explicar –en lenguaje técnico– cuáles eran sus contradicciones." Esas charlas sirvieron para que en 2010 naciera otro proyecto: 'Desarrollo de modelos matemáticos para mejorar la operación del Metro'. El doctor Delgado fue el encargado de coordinarlo, junto con sus colegas del área de Análisis Numérico y de Modelación Matemática, y estudiantes de posgrado.

La misión se enfocó en estudiar el movimiento de pasajeros y la dinámica del Metro por medio de modelos matemáticos, los cuales son un modo de representar una situación real a partir de ecuaciones. Se eligen las variables necesarias –por ejemplo, número de estaciones– y se eliminan las que no se relacionan con lo que se quiere estudiar. De esta manera se simplifica el problema y se diseñan soluciones.

Los modelos que resultaron fueron introducidos en programas informáticos para hacer simulaciones de distintos escenarios y ofrecer una herramienta que ayude a planear eficientemente el despacho de trenes y mejorar medidas de contingencia. Para ello los investigadores trabajaron con cuatro subproyectos. Como si se tratara de una vista panorámica, pueden ser contemplados en varias miradas: desde un enfoque macroscópico (el sistema completo de transporte), uno intermedio (algunas líneas del Metro), hasta uno microscópico (los peatones de una sola estación). »



**PASAJEROS A GRANEL.** A lo largo del día alrededor de cuatro millones de personas ocupan el Metro, generando 'horas pico' en la mañana (6:00 a 9:00) y en la tarde (de 15:00 a 21:00).



## « Libre cierre de puertas

Diariamente poco más de cuatro millones de personas utilizan el Metro, las mismas que, en un convoy de nueve vagones, chocan unas con otras para disputar alguno de los 360 asientos disponibles, o uno de los 1,170 rincones para ir de pie. Lejos del espacio para el que este transporte fue diseñado, es común ver que el volumen esté atiborrado hasta el último milímetro.

Una de las razones de esta proximidad es que los pasajeros no toman un tren que sale en un horario establecido –como sucede al tomar un avión–, sino el primero que pase. Y si los vagones no tienen suficiente espacio, se busca el modo de entrar 'casi a fuerza' para poder llegar a tiempo.

"Los usuarios no miden la calidad del servicio con base en la puntualidad, sino en la reducción del tiempo de espera en los andenes antes de abordar el tren y el tiempo que éste se detiene entre los trayectos de estaciones", explica en un artículo la doctora Patricia Saavedra Barrera, encargada del primer subproyecto, centrado en crear un microsimulador que modele el movimiento de pasajeros y la circulación de trenes de las líneas 1, 2 y 3, pues éstas soportan casi el 50% de la carga de usuarios.

La idea de esta investigación surgió después de que los científicos visitaron el Puesto Central de Control del Metro, el cerebro que regula el funcionamiento de todo el sistema. Es ahí donde se vigila la distancia entre trenes para evitar colisiones. Los matemáticos descubrieron que las 12 líneas del Metro son maniobradas individualmente; no están sincronizadas, por tanto no se sabe qué efecto puede tener el retraso de una línea sobre otras. En este caso el simulador representa cómo interactúan las rutas elegidas en sus estaciones de correspondencia.

La metodología elegida se llama "simulación por eventos discretos", la cual, en palabras del doctor Delgado, "es como tomar fotografías en ciertos instantes del tiempo". Una de las aportaciones a este modelo es que los investigadores consideran no sólo la satisfacción de los pasajeros y el cupo, sino también el gasto de recursos (como energía eléctrica), que depende del número de viajes. Por ello, entre las variables tomadas en cuenta está el momento en que sale un tren, cuántos recorridos hace y la cantidad de pasajeros que recoge, los que se quedan en el andén y aquellos que transbordan.

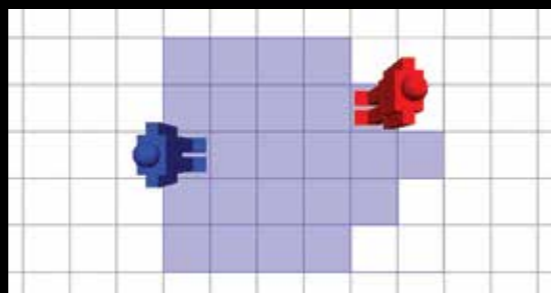


## Con permiso, por favor

Uno de los modelos matemáticos para estudiar el comportamiento de los pasajeros del Metro fue el de 'fuerzas sociales', el cual demuestra la existencia de estímulos externos que los motivan a moverse. Debido a que las personas se sienten incómodas al caminar cerca de otra persona, su objetivo es evitar esa molestia al acelerar, frenar o cambiar la dirección de su paso. Algunas de las características de los peatones en el transporte, cuando no hay pánico, son las siguientes:

- Revisan inconscientemente su entorno para evitar obstrucciones.
- Durante el encuentro entre dos personas, ambas tienden a mover sutilmente los hombros, cabeza o mirada para indicar al otro qué dirección tomará para no chocar.
- Eligen la ruta más rápida a su destino, sin considerar si ésta es la más óptima.
- Siempre buscan minimizar su esfuerzo para llegar a su destino.
- Se mantienen alejados de los muros y obstáculos.

Fuente: "Estudio de modelos para tráfico peatonal y su aplicación a pasillos en diferentes escenarios", tesis de Jorge D. González Arostico, 2011



El microsimulador se encuentra en proceso de ajustes, sin embargo con los datos necesarios servirá para plantear y manejar situaciones en condiciones normales y de demora: vías mojadas a causa de la lluvia, averías, accidentes o cuando alguien jala una palanca de emergencia por error o negligencia.

## Transbordo al Valle de México

La segunda investigación estuvo a cargo del doctor Héctor Juárez y su equipo,

### Sabías que...

Los trenes del Metro del D.F. recorren su ruta al menos un millón 157,490 veces al año.



quienes estimaron cómo se transporta la gente en toda la red de tránsito de la Zona Metropolitana del Valle de México; es decir, en tren ligero, tranvía, metrobús, trolebús, autobús, colectivo, suburbano, taxi, Metro y Metro férreo. La intención fue observar cómo impacta el movimiento de pasajeros de toda la metrópoli sobre el flujo de usuarios del Metro, pues un conflicto local –como una manifestación– se propaga y afecta de manera global. Influyen mucho los rumbos que eligen las personas ante cambios de sentido de ejes viales, introducción de nuevas líneas o crecimiento de la infraestructura urbana.

Los investigadores emplearon modelos matemáticos llamados "de asignación de tránsito", en los que valoraron la frecuencia de salida de cada tipo de servicio, las

trayectorias de los viajeros y las estrategias que toman para llegar a su destino en el menor tiempo posible. Toda esa información se ocupó para hacer una macrosimulación en el software empleado por los ingenieros del Metro, el programa canadiense Emme 3. Por ello, los académicos tuvieron que entender primero con qué modelos funcionaba éste. Así notaron un problema: en los parámetros asignados por los ingenieros no estaba considerada la congestión de gente en horas pico ni la capacidad límite de los distintos vehículos. No podían obtener resultados razonables si no se incluía, por ejemplo, el conflicto que tienen los usuarios al no poder abordar el primer tren que pase, porque ése y otros más llegan saturados.

"Conforme el tránsito se congestiona, los niveles de comodidad disminuyen y los tiempos de espera aumentan." Con base en principios como éste los matemáticos diseñaron entonces una ecuación en que se incorporó la saturación de personas, la capacidad y los factores de incomodidad y demora. De este modo, se hizo la simulación con resultados que predecían mejor el comportamiento de los pasajeros. Los funcionarios de transporte podrán evaluar y mejorar sus políticas de operación, anticipar acciones e incluso evaluar efectos de contaminación en el ambiente.

"Ningún modelo te puede reproducir la realidad de manera exacta, pero sí ofrecen aproximaciones; muestran tendencias. La información que proporcionó el Metro para estos proyectos es, incluso, vieja: de 2007. Evidentemente la demanda de usuarios de ese año a la fecha ha cambiado. El sistema de transporte no es estático, es dinámico", comenta el doctor Juárez. "Lo que los ingenieros hacían estaba totalmente fuera de la realidad. Ahora ellos usarán esto de la mejor forma." En los datos de 2007 la nueva línea 12 todavía no estaba considerada, sin embargo la referencia ayudó a que los científicos se percataran de por qué era necesaria su construcción. "Nos dimos cuenta de que la mayor demanda venía de oriente a poniente sobre la línea 1, y luego de norte a sur. Había una sobresaturación en el transporte sureño; es decir, la demanda no estaba satisfecha, lo que justifica el levantamiento de la línea 12." Esto y otros resultados de la simulación fueron comparados con lo que se observa todos los días en el Metro; las coincidencias fueron relevantes.

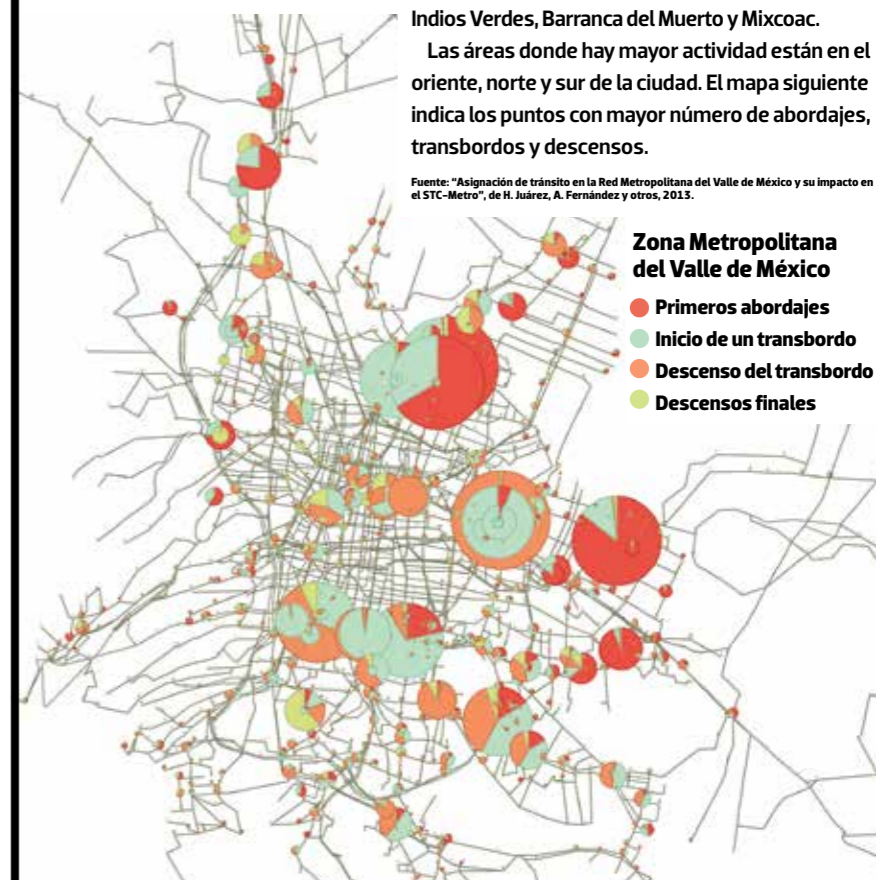
## ¿Baja en la siguiente?

La decisión óptima de un pasajero puede ser afectada por las decisiones de otros", concluyeron los matemáticos de la UAM Iztapalapa en el proyecto que simuló el tránsito de peatones en la Zona Metropolitana del Valle de México. Al obtener una medida aproximada de la congestión de pasajeros y el límite de capacidad del Metro, encontraron que las líneas que más se saturan son las que dan servicio a zonas de alta demanda, bajos recursos y con pocas opciones de transporte, como el área de Texcoco, Nezahualcóyotl, Ecatepec y Valle de Aragón. La línea A (La Paz–Pantitlán) es la que más se congestiona en la hora pico de la mañana (de 6:00 a 9:00). Le siguen las estaciones

Indios Verdes, Barranca del Muerto y Mixcoac.

Las áreas donde hay mayor actividad están en el oriente, norte y sur de la ciudad. El mapa siguiente indica los puntos con mayor número de abordajes, transbordos y descensos.

Fuente: "Asignación de tránsito en la Red Metropolitana del Valle de México y su impacto en el STC-Metro", de H. Juárez, A. Fernández y otros, 2013.



### Zona Metropolitana del Valle de México

- Primeros abordajes
- Inicio de un transbordo
- Descenso del transbordo
- Descensos finales

## Correspondencia Guerrero

Analizar al Metro en un nivel microscópico requirió un *close up* a la red, pues el propósito del tercer subproyecto es simular el tráfico peatonal únicamente de la estación Guerrero (enlaza la línea 3 con la B). Este enfoque tiene una utilidad diferente: cambiar el diseño de los pasillos y evitar 'cuellos de botella' en escaleras, puertas, esquinas y corredores para que el movimiento de los peatones sea más confortable.

La responsable de este trabajo es la doctora María Luisa Sandoval, quien junto con su equipo estudió previamente el software Simwalk para realizar en él la modelación. El programa representa distintos ambientes

mediante gráficos (figuras geométricas, mapas y actualmente elementos 3D en forma de humanos); se eligió éste porque es compatible con el tipo de archivo de los planos de las estaciones del Metro.

"Descubrimos que Simwalk está basado en un modelo llamado 'de fuerzas sociales', que significa pensar en cada peatón como si fuera una partícula. Lo que se mide son las fuerzas de atracción o repulsión entre esas partículas (evitan la pared o se alejan de otras personas)", explica la especialista. No obstante, también se echó mano de 'modelos de autómatas celulares', en los que el movimiento de cada viajero es estudiado en una cuadrícula virtual. »





## Debajo del reloj

**D**os científicos del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México realizaron un estudio sobre las demoras del transporte público. Hicieron una simulación para proponer un

sistema que determine un tiempo máximo de espera de los vehículos (tren, autobús, etcétera) en sus estaciones, según el número de pasajeros. Tras simular varios contextos, propusieron recomendaciones que podrían ocuparse en el Metro:

Fuente: "Why Does Public Transport Not Arrive On Time? The Pervasiveness of Equal Headway Instability", de Gershenson y Pineda, 2009

Recomendaciones	
Para pasajeros	Para ingenieros
Si un vehículo llega saturado, no abordarlo, pues es probable que el siguiente esté menos atestado.	No tiene sentido añadir más vehículos si éstos no están regulados.
Permitir salir antes de entrar para no retrasar el sistema. Esperar otro vehículo es usualmente más rápido que intentar subirse a uno lleno.	Diseñar métodos para regular la salida del transporte (horario de arribo y tiempo de espera en el andén).
Dentro de un vehículo saturado, alejarse de las puertas. Dejar libre la entrada acelera el viaje.	Educar a los pasajeros con campañas; explicar el por qué de las demoras.

## Para evaluar la eficiencia del Metro las ecuaciones incluyeron la incomodidad y el tiempo de espera de los pasajeros.

« Con estos métodos se reprodujeron los patrones de las caminatas. Se ha observado, por ejemplo, que en pasillos donde se transita en dos direcciones, siempre hay un individuo que abre camino entre el tumulto y otros comienzan a seguirlo, así forman hileras y gastan menos energía. Un comportamiento similar se ve en las puertas de los trenes. Cuando se genera mucha presión, porque unos quieren entrar y otros salir, alguien logra pasar y todos van tras él, como el llamado 'efecto borrego'.

Los científicos estudiaron esos fenómenos, seleccionaron parámetros (velocidad,

densidad y flujo de pasajeros) y reprodujeron un escenario en horas pico en la estación Guerrero. "Actualmente hay una política de cerrar un andén en horas de alta demanda. Los encargados ponen una valla intuitivamente. Cuando el andén está al 70% lo cierran. Dejan que la gente suba a los vagones y luego abren otra vez", explica la doctora Sandoval. "La idea es valorar qué normas pueden implementarse de modo que se pueda organizar el flujo de peatones." Después de este trabajo se ha planteado la posibilidad de colocar vallas en círculos, como las filas de los bancos, para

que los peatones caminen más antes de llegar al andén y de esta forma evitar que se sature. Con la misma simulación el diseño de la infraestructura puede modificarse: "Si hay picos en las esquinas de los pasillos, se pueden achatar para que el flujo sea más rápido. También sirve poner una planta, porque hace que la gente se autoorganice."

### Deje bajar antes de subir

Aunque el último subproyecto todavía está en proceso de planeación, su finalidad es saber si las cámaras de vigilancia pueden ser usadas para observar la densidad de peatones y generar datos. Los investigadores lo han logrado, no obstante que los videos proporcionados estaban tomados en condiciones desfavorables (las cámaras se movían o la imagen no era nítida). Se necesitan alternativas para poder hacer cálculos, como usar otro tipo de cámaras y colocarlas en un lugar adecuado.

Con lo obtenido en estos proyectos los científicos de la UAM notaron que los ingenieros del Metro hasta ahora han operado el transporte de manera totalmente empírica. Los modelos matemáticos, que fueron todo un reto para los investigadores, son ahora una herramienta disponible para tomar decisiones sistemáticas. Los funcionarios del tren colectivo ya han usado las simulaciones, sin embargo el modo en que se resuelvan los embrollos estará determinado por sus propias resoluciones y, sobre todo, la cultura de los pasajeros. En tanto, los científicos continúan con sus aportaciones, pues el conocimiento obtenido les permitió identificar nuevas líneas de investigación. **M**



## Todo bajo control

**U**n ejemplo exitoso de la simulación matemática para mejorar la operación del transporte de pasajeros es la que se llevó a cabo antes, durante y después de los Juegos Olímpicos de Beijing, China, en 2008. Desde que la ciudad fue elegida como sede, se realizaron estudios para estimar la densidad de pasajeros, mo-

dificar la infraestructura y crear planes de evacuación en caso de emergencia.

Respecto al Metro de esa ciudad, se crearon medidas para asegurar el flujo del tránsito: horarios específicos de trenes y construcción de seis nuevas líneas (82 estaciones). Además, para tomar decisiones se hicieron simulaciones de cada evento olímpico.

El aeropuerto y las políticas de automóviles también fueron modificadas, de manera que Beijing tuvo control de los nueve millones de espectadores y 10,000 atletas de 205 países. Luego, las autoridades aprovecharon los análisis para reducir la contaminación atmosférica.

Fuente: [ieeexplore.ieee.org](http://ieeexplore.ieee.org), [ascellibrary.org](http://ascellibrary.org)

Se agradece a los doctores Joaquín Delgado Fernández, Héctor Juárez y María Luisa Sandoval, de la UAM-I, por su asesoría y apoyo. Fuentes: [Contactos](http://Contactos), núm. 90, oct.-dic. 2013; [metro.df.gob.mx](http://metro.df.gob.mx); [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx); [sites.uplisa.ipn.mx](http://sites.uplisa.ipn.mx)

FOTOS: GETTY IMAGES; EFE/ ZUMA PRESS; OMNIDOME30