



# Tráfico vehicular





# *en zonas urbanas*

**ANGÉLICA LOZANO, VICENTE TORRES Y JUAN PABLO ANTÚN**





Muchas ciudades se enfrentan a serios problemas de transporte urbano debido al número creciente de vehículos en circulación. Tan sólo en la Zona Metropolitana del Valle de México, integrada por el Distrito Federal y 28 municipios del Estado de México, la flota vehicular registrada en el año 2000 según el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) era de 3 511 371, y se estima que rebasará 4 300 000 vehículos en el 2006.

Como las ciudades han llegado a ser los principales centros de las actividades económicas, la población tiende a desplazarse a éstas. Tal concentración de personas requiere transporte no sólo para ellas mismas, sino también para los productos que consumen o producen.

Desgraciadamente, el transporte puede generar diversos impactos ambientales adversos, tales como congestión vehicular, contaminación del aire, ruido e invasión de la tranquilidad en ciertas áreas; además, la congestión vehicular puede incrementar el riesgo de accidentes viales.

La contaminación ambiental en áreas urbanas es uno de los problemas más importantes que enfrenta la población mundial, y en ese asunto el tráfico vehicular juega un papel primordial, ya que es la principal fuente de emisiones contaminantes en áreas urbanas. De acuerdo con el Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México 1998, un importante porcentaje del total de las emisiones en la Zona Metropolitana es generado por fuentes móviles, es decir vehículos automotores (tabla 1).

#### Modelos de tráfico vehicular

El flujo vehicular producido en un momento y lugar determinados es el resultado de una serie de decisiones individuales de los usuarios de la red vial. Cada usuario decide cómo y cuándo recorrer lo que considera la mejor ruta para llegar a su destino. Su decisión puede basarse en criterios tales como costo, tiempo, seguridad y comodidad. El usuario debe decidir qué ruta recorrer y qué modos de transporte utilizar (automóvil, transporte público, etcétera), decisión que depende, entre otras cosas, de la congestión en los arcos o vialidades de la ruta.

El tiempo de recorrido en cualquier ruta, desde un cierto origen a un cierto destino, es una función del flujo y de la congestión totales. Por lo tanto, no es fácil determinar la ruta más corta en tiempo en una red.

Se ha intentado representar el tráfico vehicular de acuerdo con la teoría hidrodinámica, mediante modelos de aproximaciones de fluidos de primer y segundo orden, pero hasta ahora dichos modelos sólo han permitido representar situaciones muy simples del comportamiento del flujo vehicular.

Emisiones	PM <sub>10</sub>	SO	CO	NOx	HC
Fuentes móviles	36%	21%	98%	80%	40%

Tabla 1 | Porcentajes de emisiones por fuentes móviles



También han sido desarrollados algunos modelos de simulación para representar el movimiento del flujo vehicular a nivel microscópico, es decir para áreas pequeñas. Pero estos modelos requieren gran cantidad de información para representar cada detalle de la infraestructura vial y de la demanda de transporte: ciclos de semáforos, número de vehículos por tipo, características de conducción, etcétera; información que frecuentemente no está disponible. También se han utilizado modelos de simulación para representar carreteras, donde el comportamiento del flujo vehicular es más simple que en las áreas urbanas.

Un enfoque que ha permitido una buena representación del tráfico es el de los modelos de asignación de equilibrio. Estos modelos pueden ser utilizados para representar el comportamiento macroscópico del tráfico de grandes zonas urbanas o ciudades enteras. Mediante estos modelos es posible estimar el flujo vehicular en una red donde existe cierta demanda de viajes y los efectos de la congestión hacen que los tiempos de viaje en los arcos dependan del flujo. El flujo estimado puede servir tanto para describir el tráfico como para predecir o recomendar un patrón de flujo vehicular en una red.

Los modelos de asignación de equilibrio pueden ser de dos tipos: equilibrio del usuario u optimización del sistema: el modelo de equilibrio del usuario se basa en el primer principio de Wardrop, que afirma: "Los tiempos de viaje en todas las rutas realmente utilizadas son menores o iguales que los que requeriría un usuario en cual-

quier ruta no utilizada". Lo cual significa que las rutas utilizadas son las más cortas en tiempo bajo las condiciones de tráfico prevalecientes. Este modelo asume que cada usuario busca minimizar su tiempo de viaje y asigna usuarios a sus rutas hasta encontrar un flujo de equilibrio, el cual se logra cuando la asignación de flujos a los arcos es tal que cada usuario asignado a la red no puede cambiar su ruta sin incrementar su costo de viaje. El modelo de optimización del sistema tiene como objetivo la minimización del tiempo total de viaje en el sistema. Este modelo obtiene una asignación de flujo que minimiza el tiempo total de viaje en toda la red. En esta asignación, ningún usuario puede cambiar de ruta sin incrementar el tiempo total de viaje del sistema, aunque sí puede disminuir su propio tiempo de viaje. Por lo tanto, si con base en este modelo se asigna una ruta a cada usuario y éste la respeta, la congestión se minimiza.

El modelo de equilibrio del usuario es determinista, así que supone que cada usuario tiene información perfecta sobre sus rutas y la congestión de la red. Una representación más realista del tráfico se obtiene mediante el modelo estocástico de equilibrio del usuario, el cual asume que los usuarios no poseen información perfecta de la red y que perciben de forma distinta los inconvenientes y atributos de la misma. El equilibrio se alcanza cuando ningún usuario cree que su tiempo de viaje puede ser mejorado mediante un cambio en su ruta.

El problema de asignación dinámica del tráfico se ha abordado con diversos enfoques de simulación, teoría del



**A**firman que los esquimales no tienen nombre genérico para designar el hielo, tienen varias palabras (he olvidado el número exacto, pero creo que son muchas, alrededor de una docena) que designan específicamente los diversos aspectos que cobra el agua entre su estado líquido y sus diversos grados de congelación.

Es difícil, por cierto, encontrar un ejemplo equivalente en francés; tal vez los esquimales sólo tengan una palabra para designar el espacio que separa los iglúes, mientras nosotros tenemos por lo menos siete en nuestras ciudades (calle, avenida, bulevar, plaza, paseo, callejón, callejuela) y los ingleses por lo menos veinte (street, avenue, crescent, place, road, row, lane, mews, gardens, terrace, yard, square, circus, grove, court, greens, houses, gate, ground, way, drive, walk), pero nosotros tenemos no obstante un nombre ("arteria", por ejemplo) que los engloba a todos. Asimismo, si hablamos a un repostero de la cocción del azúcar, nos responderá con razón que no puede comprendernos si no precisamos el grado de cocción requerido (ahumado, cascado, apisonado, etcétera) pero el concepto "cocción del azúcar" estará para él bien establecido.

GEORGES PEREC

Un universo de asfalto

control óptimo y optimización. Estos modelos consideran que los usuarios minimizan sus tiempos de viaje actualizando continuamente sus rutas elegidas de acuerdo con las condiciones del tráfico. El problema es especialmente importante para los Sistemas avanzados de información sobre el viajero (ATIS, *Advanced Traveler Information System*), los cuales requieren información para recomendar rutas de acuerdo con el tiempo de viaje futuro en los arcos que serán incluidos en las rutas. Su objetivo es mejorar el comportamiento del tráfico, reduciendo la congestión al proporcionar condiciones de tráfico uniforme. En estos sistemas existe un controlador central que recomienda las rutas a los usuarios en tiempo real, lo cual satisface objetivos individuales o del sistema medio de equilibrio del usuario o modelo de optimización del sistema y considera, en tiempo real, variaciones inesperadas en las condiciones de la red.

Otra tecnología recientemente incorporada al análisis de las redes de flujo es la de los sistemas de información geográfica para transporte. La representación y el análisis de las redes de transporte ha mejorado con el desarrollo de estos sistemas, pues además de permitir una representación topológica de la red, con ellos se puede hacer una representación geográfica de la misma. Y lo más importante es que los análisis de redes pueden ser combinados con análisis espaciales, tradicionales en los sistemas de información geográfica, los cuales consideren características del territorio tales como uso de suelo, crecimiento de la mancha urbana y datos de atributos demo-



gráficos o socioeconómicos. Así, surge la posibilidad de crear escenarios de tipo hipotético para cambios en la infraestructura vial o en la demanda.

#### Información escasa y no confiable

Los modelos de asignación de tráfico necesitan como entrada una matriz origen-destino e información de aforos vehiculares, entre otras cosas.

Los renglones y columnas de la matriz origen-destino representan, respectivamente, las zonas de origen y destino, y cada una de sus celdas contiene el número de viajes realizados de una zona origen a una zona destino en un periodo de tiempo. Los aforos vehiculares son los conteos de los vehículos que pasan por determinados arcos de la red.

Aunque toda ciudad debería contar con esta información, en muchas no existe o no es confiable. Por ejemplo, en la Zona Metropolitana existe una matriz origen-destino que data de hace casi 10 años y no hay un programa permanente para la obtención de aforos vehiculares. Si bien se cuenta con datos de aforos del 2000, muy pocos corresponden con los datos de los municipios del Estado de México y varios puntos de aforos presentan algunas inconsistencias ya que su obtención fue manual.

Es claro que se requiere una matriz origen-destino obtenida por encuestas convencionales, pero recolectar esta información es costoso y tardado. Para propósitos de corto plazo puede utilizarse una estimación de la matriz

origen-destino, pero una planeación seria a largo plazo requiere una matriz origen-destino real.

#### Emisiones provocadas por la congestión vehicular

Desde los años setenta diversos modelos matemáticos con distinto tipo de complejidad han sido usados para estimar niveles de contaminación así como variaciones temporales y espaciales tanto del escenario que representa la situación actual como de escenarios propuestos. Dichos modelos de dispersión requieren información sobre contaminantes, tráfico vehicular y datos meteorológicos.

Al menos en cuanto a modelos de dispersión de emisiones en la Zona Metropolitana, se ha hecho bastante investigación en el marco del proyecto Programa integrado de contaminación del aire urbano, regional y global, encabezado por Mario Molina.

Estos modelos realizan cálculos hipotéticos de las emisiones generadas por fuentes móviles considerando una mezcla de vehículos con una velocidad promedio para toda una zona. Dichos cálculos podrían ser afinados si se tuviera más información sobre las velocidades de los vehículos, ya que muchos de ellos producen diferentes emisiones bajo diferentes velocidades.

Puesto que es posible hacer este tipo de estimaciones de flujos vehiculares y velocidades promedio para cada arco de la red en un periodo dado mediante modelos de asignación de tráfico, entonces se pueden deducir de manera igualmente hipotética las emisiones producidas por

Un cambio en los sentidos de circulación puede producir un mejoramiento en la circulación vehicular. Esto se debe a que un cambio de los sentidos puede generar una distribución del tráfico entre las vialidades disponibles de acuerdo con sus capacidades. La presencia de más oferta vial no conlleva necesariamente el mejoramiento de la circulación e inclusive puede llegar a ser contraproducente. Para una red muy congestionada, frecuentemente la distribución del tráfico entre sus vialidades puede tener buenos efectos en la congestión general de la red y es fácil de implementar.

En los últimos años, para las congestiones locales en la ciudad de México se han implementado las llamadas "soluciones a nivel", las cuales se basan en el concepto de distribución del tráfico. En dichas obras se han utilizado distintos conceptos básicos de la distribución del tráfico vehicular, siendo la "vuelta inglesa" la más reconocida por los usuarios.

La vuelta inglesa basa su creación en el concepto de "vuelta adelantada" y de "nodo de circulación continua", donde los vehículos que desean girar hacia la izquierda lo realizan antes de llegar al nodo y no en el mismo. De esta manera se garantiza que el nodo siempre se encuentre movilizándolo el flujo vehicular en ambas direcciones, sin tener que detener por completo el flujo en alguna dirección para dar paso al de la otra. La vuelta inglesa permite la realización de varios movimientos simultáneos sin detener por completo el movimiento en alguna dirección.

En la figura de arriba se muestra un nodo tradicional y en la de abajo un cruceo de circulación continua, donde se tienen, entre otros elementos, múltiples vueltas inglesas.



Ejemplo básico de cruceo sin distribución de tráfico.



Cruceo de circulación continua, con múltiples vueltas inglesas.

### Vuelta inglesa



vehículos automotores en cada arco de la red para un determinado periodo de tiempo. Esta información puede ser muy útil para alimentar los modelos de dispersión de emisiones.

#### La paradoja de Braess

El mejoramiento en una red de transporte mediante la adición de una vialidad nueva o el incremento de la capacidad de una vialidad existente se ha visto como la solución al problema del tráfico vehicular. Aparentemente, el mejoramiento de la red implica el mejoramiento del flujo en la misma, sin embargo esto puede no ocurrir. Más aún, el mejoramiento en una red de transporte puede producir un incremento en el total de emisiones generadas. Esto se resume en la famosa paradoja de Braess, la cual afirma: "El hecho de agregar una nueva vialidad a una red de transporte puede no mejorar la operación del sistema, en el sentido de la reducción del tiempo total de viaje en el sistema".

Los modelos de equilibrio del usuario asumen que los usuarios intentan minimizar su propio tiempo de viaje sin considerar los efectos de sus decisiones en otros usuarios. Bajo este supuesto, puede ocurrir que el tiempo total de viaje en el sistema se incremente con la expansión de la red; ya que aún cuando algunos usuarios se benefician utilizando la nueva vialidad, éstos pueden contribuir a incrementar la congestión para otros usuarios.

El siguiente es un ejemplo de la paradoja de Braess: suponga que existen dos rutas,  $r_1$  y  $r_2$ , para ir de un cierto

origen a un cierto destino que no comparten arcos. Estas rutas tienen tiempos de recorrido iguales, por lo cual la mitad de los usuarios utiliza la ruta  $r_1$  y la otra mitad la ruta  $r_2$ . Suponga ahora que se agrega una nueva vialidad que va de la ruta  $r_1$  a la ruta  $r_2$ . Para hacer uso de esta nueva vialidad más usuarios tendrían que pasar por la primera parte de  $r_1$  y por la segunda parte de  $r_2$ ; y dependiendo de las capacidades de los arcos en estas secciones de las rutas, éstos podrían llegar a congestionarse hasta el punto de producir colas. Es decir que se podrían formar colas en las entradas y salidas de la nueva vialidad.

Otro ejemplo es el siguiente: suponga que existe una intersección en la que es posible decidir entre dos rutas,  $r_1$  y  $r_2$ , con el mismo tiempo o costo de viaje para ir a un mismo destino y la ruta más corta en distancia,  $r_2$ , tiene un cuello de botella que produce una cola. Suponga que para mejorar el sistema alguien decide mejorar el nivel de servicio en el cuello de botella. Esto produciría un incremento del flujo en esa ruta, por lo que se podría formar una cola más larga hacia el origen, bloqueándolo y reduciendo la entrada de flujo a  $r_2$ . Así, el usuario tendría que elegir entre una ruta más larga o esperar un rato más en la cola para entrar a la ruta más corta; si la cola se ha prolongado más allá de la intersección y el usuario ha esperado ya en ella, cuando llegue a la intersección seguramente optará por atravesar el cuello de botella.

Si se lleva el tráfico vehicular a la teoría de juegos, el equilibrio del usuario corresponde al equilibrio de Nash. En la teoría de juegos un conjunto de estrategias de juego





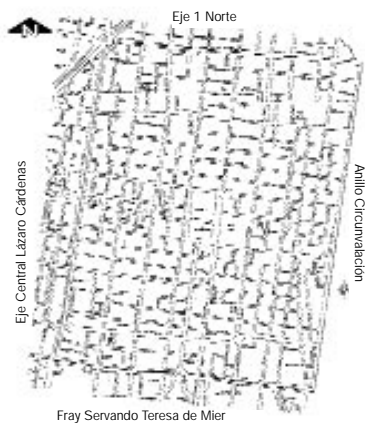


Figura 1 Zona de estudio

Éste es un ejemplo de las estimaciones de flujo y congestión vehiculares, hecho mediante técnicas de asignación de tráfico, que muestran el potencial para simular escenarios de tipo hipotético. La zona de estudio es el Centro histórico de la ciudad de México (figura 1). A partir de una imagen del satélite Hindú IRS, cartografía procedente del INEGI y trabajo de campo, se creó la red vial de la zona, la cual se muestra en la figura 2.

La red vial está formada por 433 nodos y 709 arcos georreferenciados. Cada arco tiene asociados los siguientes atributos: identificador, longitud, nombre, número de carriles, tipo de vialidad, sentido de circulación, capacidad (facultad para acomodar un flujo de vehículos), velocidad (promedio y en flujo libre) y tiempo de recorrido.

En la figura 3 se presentan las vialidades según su tipo; que pueden ser principales,

secundarias, locales y peatonales. En la figura 4 se muestran los sentidos de circulación de las vialidades, donde una flecha indica una vialidad de un solo sentido y una línea marca una vialidad de dos sentidos. Las avenidas Eje Central, Eje 1 Norte y Anillo Circunvalación se representan mediante líneas debido a que tienen un carril en contraflujo para el transporte público de pasajeros.

Los volúmenes o aforos vehiculares se tomaron del registro de aforo más reciente que existe, obtenido por el Programa Universitarios de Estudios sobre la Ciudad a solicitud de la Secretaría de Transporte y Vialidad del Gobierno del Distrito Federal. Este registro fue obtenido de las 6:00 hrs a las 22:00 hrs del 18 de Noviembre de 1998, e incluyó 49 estaciones en el Centro histórico, de las cuales 38 entran en la zona de estudio (figura 5).



Figura 2 Trazo de red vial

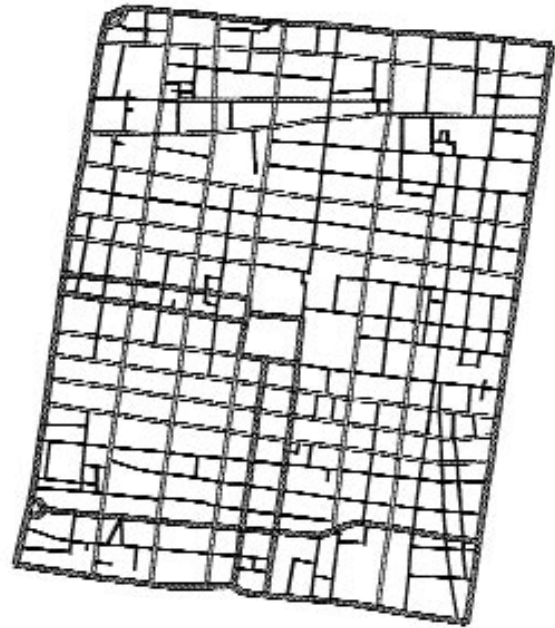


Figura 3 Vialidades según su tipo



Figura 4 Sentidos de circulación

uniforme desde las ocho de la mañana hasta el final del día; y aunque cada estación presenta una hora pico, el periodo en que se presenta varía mucho entre cada una de ellas. Por lo tanto, se pueden considerar dos situaciones: la hora pico y los “conteos máximos” registrados en cada una de las estaciones (independientemente de la hora). Aquí se aborda solamente la situación que considera los conteos máximos, por ser la más desfavorable para el tráfico vehicular.

En cuanto a la capacidad de las vialidades se consideran dos situaciones: capacidad construida y capacidad real, es decir, la primera menos la capacidad reducida por obstrucciones físicas tales como vehículos estacionados y vendedores ambulantes.

En las figuras 6 y 7 se muestran, respectivamente, el número de carriles construidos y el número de carriles realmente disponibles para la circulación vehicular. El ancho de



Figura 5 Estaciones de aforo

los arcos representa el número de carriles. En la figura 7 se observa la enorme disminución de la capacidad de la red, especialmente en la zona noroeste, debida sobretodo al comercio informal.

El estudio de aforos realizado en 1998 revela que la distribución del flujo vehicular en la zona de estudio es distinta a la que comúnmente se presenta en una zona urbana. No se puede decir que hayan una o dos horas pico, sino un pico más o menos



Figura 6 redigitalización de la capacidadT\_AB  
 0 a 399  
 400 a 699  
 700 a 1999  
 2000 a 3499  
 3500 a 7999  
 8000 a 10000  
 otros  
 redigitalización carrilesT\_AB  
 7.5 3.75 1.875  
 0 200 400 600  
 Metros



Figura 7 redigitalización de la capacidadP\_AB  
 0 a 399  
 400 a 699  
 700 a 1999  
 2000 a 3499  
 3500 a 7999  
 8000 a 10000  
 otros  
 redigitalización carrilesP\_AB  
 7.5 3.75 1.875  
 0 200 400 600  
 Metros



redigitalización Max\_voc:2  
 0.0000 a 3116  
 0.3116 a 0.5200  
 0.5200 a 0.6020  
 0.6020 a 0.9100  
 0.9100 a 1.1400  
 1.1400 a 1.9800  
 1.9800 a 10.0000

redigitalización tot\_Flow  
 0 1 2 3  
 10000 5000 2500  
 Metros

Figura 8 Flujo estimado para el escenario actual



redigitalización Max\_voc  
 0.0000 a 3116  
 0.3116 a 0.5200  
 0.5200 a 0.6020  
 0.6020 a 0.9100  
 0.9100 a 1.1400  
 1.1400 a 1.9800  
 1.9800 a 10.0000

redigitalización TOT\_Flow  
 0 1 2 3  
 10000 5000 2500  
 Metros

Figura 9 Flujo estimado con cambios en el sentido de circulación

La eliminación de los obstáculos físicos de las vialidades podría mejorar la circulación vehicular en el Centro histórico, sin embargo esta medida podría ser difícil de llevar a la práctica debido a cuestiones políticas, económicas o sociales, por lo cual se opta por considerar otro escenario con más posibilidades de ser llevado a la práctica.

Se definen dos escenarios, el actual, que considera los conteos máximos y la capacidad real, y el escenario con cambios en los sentidos de circulación. Las figuras 8 y 9 presentan el flujo estimado y la congestión para estos escenarios. Los arcos se muestran más anchos mientras más flujo vehicular los atraviesa y más oscuros cuanto mayor congestión experimentan. Comparando los escenarios se observa que el escenario con cambios en los sentidos de circulación presenta menos congestión en muchos ar-

cos o calles y es evidentemente mejor que el escenario actual. Sin embargo, como las emisiones dependen de la velocidad del vehículo, podría ser que un escenario donde haya mayores velocidades tuviera mayores emisiones de ciertos tipos. Por tanto se estiman también las emisiones para ambos escenarios.

La estimación de las emisiones producidas por la congestión, se presenta en la ta-

bla 1. La cantidad de emisiones es expresada en toneladas producidas en la hora de máxima demanda. Como se observa en esta tabla, un cambio en los sentidos de circulación en el Centro histórico podría disminuir en 33% las emisiones de HC y CO producidas por vehículos automotores.

Cabe hacer notar que las estimaciones podrían afinarse si se contara con más y mejor información.


Escenarios	HC (Ton/HMD)	CO (Ton/HMD)	NOx (Ton/HMD)
Actual	0.5784	6.0101	0.1645
Cambio en el sentido de circulación	0.3873	4.0232	0.1372
Reducción	33%	33%	16.6%

Tabla 1 Emisiones estimadas para los dos escenarios



es llamado “fuertemente Pareto óptimo” si cualquier cambio hecho por un solo jugador causa que algún otro jugador tenga una disminución en su ganancia. Entonces la paradoja de Braess se puede equiparar a lo que el equilibrio de Nash requiere para no ser fuertemente Pareto óptimo.

En realidad la paradoja de Braess no es realmente una paradoja, sino una situación en contra de la intuición. La explicación es la diferencia entre equilibrio y optimización.

La paradoja de Braess se presenta solamente en ciertos valores de los parámetros de congestión y de demanda de transporte. Por lo tanto, cualquier política encaminada al diseño de la red vial y a la reducción de emisiones generadas por vehículos automotores no debe dejarse llevar por la intuición, sino que debe hacer análisis que tomen en cuenta diversos elementos de la red y de la demanda: topología de la red, costos-tiempos y estructura de la demanda de viajes. 



Angélica Lozano, Vicente Torres y Juan Pablo Antún  
Instituto de Ingeniería,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la DGAPA en el marco del Proyecto PAPIIT IN117001; y al CONACYT en el marco del Proyecto CONACYT-J34083-A; así como al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Daganzo, C. F. 1995. “Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow”, en *Transportation Reviews*, núm. 29B, pp. 277-286.

Daganzo, C. F. 1998. “Queue spillovers in transportation networks with choices”, en *Transportation Science*, núm. 32, pp. 3-11.

Hagstrom, J. N. y R. A. Abrams. 2001. “Characterizing Braess’s Paradox for Traffic Networks”, en *Proceedings of IEEE 2001 Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 837-842.

Cuaderno Estadístico de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México edición 2001. INEGI, México.

Estadísticas del Medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2001. INEGI, México.

Jayakrishnan, R., H. S. Mahmassani y T. Y. Hu. 1994. “An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks”, en *Transportation Reviews*, núm. 2C, pp. 129-147.

Khare, M. y S. Sharma. 2002. *Modelling urban vehicle emissions*. Wit Press.

Lozano, A., F. Granados, J. P. Antún y G. Storchi. 2001. “Main Freight Transport Corridors in a Urban Network with Scarce Information”, *The Proceedings of xxxii Annual Conference of the Operational Research Society of Italy*. Cagliari, Italia. Septiembre 4-7, 2001.

Nagurney, A. 2000. “Congested urban transportation networks and emission paradoxes”, en *Transportation Reviews*, núm. 5D, pp. 145-151.

Pas, E. y S. Principio. 1997. “Braess Paradox: some new insights”, en *Transportation Reviews*, núm. B31, pp. 265-276.

*Accesibilidad, movilidad y áreas peatonales en la regeneración del Centro Histórico de la Ciudad de México*. Programa Universitario de Estudios para la Ciudad, México, 1998.

Sheffi, Y. 1985. *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, Nueva Jersey.

Torres, V. 2002. *Simulación Macroscópica del Tráfico Vehicular en el Centro Histórico de la Ciudad de México*, por medio de un Sistema de Información Geográfica. Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, dirigida por Angélica Lozano. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Yang, H. y M. G. H. Bell. 1998. “Models and algorithms for road network design: a review and some new developments”, en *Transportation Reviews*, núm. 18, pp. 257-278.

#### IMÁGENES

Eric Jervaise, México, *Panorámicas del siglo XXI*, 2002.