

MEDIDAS FLEXIBLES DE GESTIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN ZONAS URBANAS: HACIA LA SISTEMATIZACIÓN DE PLANES INTEGRALES DE MOVILIDAD*

Oscar Sánchez

Resumen

Hoy en día las medidas flexibles para la gestión de desplazamientos están tomando más importancia debido a sus ventajas en cuanto a la regulación de los desplazamientos y a su bajo costo de puesta en marcha. Sin embargo, la elección de estas medidas con base en su pertinencia y su integración en una política de transporte es aún una de las asignaturas pendientes en el proceso de modelación de sistemas de transporte, la evaluación de proyectos y la toma de decisiones. Este artículo tiene como objetivo aportar algunos elementos de modelación utilizando un enfoque de análisis que corresponde a la naturaleza del fenómeno de transporte. El documento está compuesto de dos partes. La primera se enfoca a los aspectos teóricos que fundamentan la simulación basada en un enfoque dinámico. La segunda es más aplicada y presenta de forma más detallada los trabajos de simulación que se llevaron a cabo, así como los principales hallazgos durante la aplicación de las medidas flexibles de desplazamientos.

Introducción

Tradicionalmente, el análisis de los sistemas de transporte urbano se ha basado en un enfoque de

modelación *estático* el cual admite que, tanto el total de desplazamientos, como los niveles de servicio de las infraestructuras permanecen constantes durante un intervalo de tiempo determinado (comúnmente una hora o un periodo de punta). Este enfoque simplificado de modelación trajo consigo el desarrollo de métodos, algoritmos (e.g. los trabajos precursores de Beckmann et al, 1956 o Sheffi, 1985) y programas comerciales (e.g. emme2, TransCad, Etraus, Davisum, etcétera) que permiten hallar el estado de equilibrio de una red, y sobre la base de éste proponer alternativas para la resolución del problema esencial del transporte urbano: dada una red de transporte de capacidad limitada (oferta) y los niveles de movilidad de la población (demanda) hallar la asignación óptima de los desplazamientos, de manera tal que los costes de transporte sean los más eficientes (mínimos) en el supuesto de que la elección de itinerarios (asignación) está implícitamente ligada al nivel de desempeño de la infraestructura.

Las herramientas de simulación basadas en este enfoque eran por lo tanto, suficientes para la planeación de la red de transporte (trazado, dimensionamiento de las infraestructuras, elección de

31

Departamento de Posgrado. Facultad de Ingeniería.
Universidad Autónoma del Estado de México
Toluca, Estado de México. México
*Premio UDUAL en Ciencia y Tecnología 2004.

alternativas, etcétera) puesto que *a priori* los patrones de movilidad de los usuarios se mantenían constantes y con ello el funcionamiento de la red de transporte era estable. La correspondencia entre la hipótesis del modelo y la realidad simulada era en consecuencia coherente. En efecto, los centros urbanos comenzaban a estructurarse como polos de actividades y los recursos financieros eran suficientes para que la entidad pública construyera infraestructura. Bajo este contexto surge la tradición de resolver los problemas de movilidad y congestión vehicular con el aumento de capacidad de las infraestructuras. Es decir, la construcción de nuevas vialidades, modernización o ampliación de las infraestructuras viales existentes.

32

Hoy en día el paradigma anterior pierde validez debido a diferentes factores que han cambiado drásticamente las características de la movilidad: los desplazamientos motorizados no han dejado de aumentar, los efectos perversos de la política de incremento de capacidad de las infraestructuras que sólo ha llevado a inducir más demanda, la sobreoferta de la industria automotriz que ha masificado el uso del coche, lo limitado de los recursos para la financiación de nuevas infraestructuras y la densidad urbana tan alta. Por esta razón la posibilidad de continuar el tratamiento de los problemas de transporte desde el punto de vista de la oferta ya no es viable.

En este sentido, fue necesario desarrollar un enfoque alternativo que contemplara no sólo la oferta (infraestructuras) sino también la gestión de la demanda. Durante los 90 emergieron una serie de políticas de transportes que se orientaron en esa dirección. Sin embargo, aunque los planteamientos teóricos para analizar este tipo de políticas fueron desarrollados durante la década de los 70 (e.g. Vickrey, 1969), pocas herramientas operacionales de ayuda a la toma de decisión (modelos de simulación) vieron el día. Por ello, la evaluación de las políticas innovadoras en materia de gestión de desplazamientos no pudo ser analizada de la manera más coherente. En efecto, el fenómeno

de la congestión se caracteriza por su variabilidad: las condiciones de circulación no son las mismas durante el día, ni durante los días de la semana, ni durante los meses de año. Esto se debe, tanto a la variación del desempeño de las infraestructuras con el nivel de demanda (en una relación que no es lineal), como al comportamiento de los usuarios cuyo carácter no es fijo, sino que más bien se adapta a las condiciones de circulación (cambio de horas de desplazamiento, de itinerario de recorrido, de modo de transporte, etcétera). La consideración de estos componentes temporales en el tratamiento del fenómeno de la congestión propició el desarrollo de un enfoque alternativo denominado *dinámico* (Ran y Boyce, 1994) que es teóricamente apropiado para analizar los efectos de las políticas de gestión de desplazamientos (De Palma *et al*, 1997).

Si bien los enfoques mencionados son distintos (en filosofía, modelación, algoritmos, etcétera), comparten la función de herramienta de ayuda a la toma de decisiones en la planeación. ¿Cuál de ellos es el más pertinente?; ¿bajo qué circunstancias?; ¿en qué medida son fiables?, son tan sólo algunos de los cuestionamientos que las autoridades gestoras del transporte pueden plantearse y que raramente son respondidos en la literatura de la ciencia de los transportes. El proyecto realizado para la UDUAL planteaba aportar elementos de respuesta a estas interrogantes para el contexto latinoamericano. En este artículo se delinean los resultados del estudio para el caso de las medidas flexibles para la gestión de desplazamientos. Para ello, primeramente, se aportan conceptos y elementos que justifican el empleo del enfoque dinámico en la planeación de los sistemas de transporte (sección 1) describiendo la metodología de la puesta en marcha (sección 2), las características de la herramienta de simulación utilizada en el análisis (sección 3) y finalmente los resultados e implicaciones de un estudio comparativo entre los resultados del enfoque estático y dinámico.

1. La necesidad de herramientas de modelación de sistemas de transporte

Las formas de gestión de los desplazamientos son múltiples y van desde la más clásica (aumento de la capacidad de las infraestructuras) hasta las más perfeccionadas (transmisión en tiempo real de información a los usuarios). Desde el punto de vista tecnológico se tiene una gran variedad de alternativas. Sin embargo, su empleo es complejo y con frecuencia son temas de debate. En este sentido, pareciera que los medios de acción son más accesibles que las formas óptimas de empleo de estos medios.

Los operadores de los sistemas de transporte son llevados con frecuencia a pronunciarse sobre la pertinencia de los proyectos, la modernización de infraestructuras o sobre el efecto de una serie de medidas para mejorar la circulación. En ambos casos, requieren de la disponibilidad de herramientas de evaluación pertinentes y eficientes. En efecto, las respuestas a los cuestionamientos más debatibles sólo pueden hallarse en las evaluaciones cuantitativas que se apoyan en modelos, los cuales deberían guardar cierto nivel de accesibilidad. Algunos de los objetivos de los proyectos o de las medidas a crear son: reducir los embotellamientos, reducir la emisión de contaminantes, el mejoramiento de los índices de desempeño de las redes de transporte actuales, la extensión de las redes, las reducción de la movilidad en automóvil, el mejoramiento de la accesibilidad y la movilidad de los usuarios, el mejoramiento de la intermodalidad, etcétera. En la mayoría de los casos se requerirá, tarde o temprano, la evaluación de los efectos inducidos por estas medidas y, por lo tanto, el empleo de modelos de planeación. La mayoría de las empresas de consultoría en transporte disponen en la actualidad de herramientas informáticas que permiten poner en marcha el modelo clásico de cuatro etapas para la planeación de los transportes. Estos modelos describen los fenómenos ligados a la generación y distribución de viajes, a la elección

modal y a la elección de itinerarios (asignación) de forma aproximada pero desprecia un aspecto esencial de los embotellamientos: la componente temporal.

1.1. Las herramientas de "primera generación"

En 1956, Beckmann, McGuire y Winston propondrán métodos de cálculo de equilibrios estáticos de tráfico, basándose en herramientas de programación matemática. Wardrop define dos principios de equilibrio; el primer principio corresponde a un programa de optimización individual: cada usuario utiliza el itinerario que le aporte el costo generalizado más bajo (por ejemplo, el tiempo de recorrido) para un par origen-destino (par OD). El segundo se basa en el óptimo social: la distribución de los usuarios entre los itinerarios que llevan al mismo destino se hace de tal forma, que el costo social generalizado (para todo el sistema) sea el mínimo. Estos dos equilibrios son raramente equivalentes.

La gran mayoría de herramientas de simulación en el contexto urbano describen un equilibrio estático entre la oferta (la cual representa las características físicas de la red) y la demanda (la cual representa el comportamiento y las características de los usuarios). Las herramientas actuales (llamadas de "primera generación"), tales como emme2, trips, polydrome, Transcad o Davisum, no toman en cuenta la evolución de la congestión con respecto a la hora del día. Esto implica que las condiciones de circulación permanecen constantes durante el periodo de estudio (generalmente el periodo de punta de la mañana o de la tarde). Esta hipótesis es demasiado simplificadora en un ámbito urbano. En efecto, las horas de punta se conforman por medio de una fase creciente de la intensidad de tráfico, un valle y una fase decreciente. La forma de emplear un modelo estático es, por ejemplo, la siguiente: para estudiar los desplazamientos domicilio-trabajo de una ciudad, el planificador escoge un periodo de estudio que corresponde a una hora punta (digamos de 7h30 a 8h30). Estima entonces, tanto el total de desplazamientos que se efectúan en este periodo, como su distribución espacial

(matriz origen destino). La red de transporte se representa por medio de arcos y nodos. Los tiempos de recorrido ligados al uso de un arco son representados por medio de funciones volumen-demora que toman en cuenta el número de usuarios que utilizan el arco en cuestión. El papel del modelo consiste en seguida a afectar esta matriz OD a la red, determinando cómo se distribuyen los usuarios por los arcos. Este cálculo se efectúa basándose en hipótesis de comportamiento del usuario (¿cómo elige el itinerario?) con ayuda de un programa informático. En este caso, la hipótesis mencionada es la del primer principio de Wardrop: se supone que los usuarios eligen el camino que minimiza su costo generalizado. En el enfoque estático, esto implica que la congestión permanece constante durante el periodo analizado, ya que no se tienen en cuenta las fluctuaciones de tráfico a cada instante. Los tiempos de recorrido en las vialidades dependen únicamente del total de usuarios que hayan tomado una ruta determinada para este periodo. Es decir, no dependen de la repartición temporal de estos trayectos durante el periodo considerado.

34

1.2. Las herramientas de "segunda generación"

Los modelos llamados "dinámicos" intentan dar cuenta de la evolución de las condiciones de circulación en el tiempo, por medio de una modelación que permita representar los fenómenos responsables de la congestión: flujo vehicular, rebases, intersecciones, etcétera. En estos modelos, el tiempo de recorrido necesario para utilizar un arco de la red depende de la hora en la cual ha sido utilizado.

De forma general, los modelos dinámicos permiten describir la evolución temporal de uso de un sistema de transporte. El horizonte temporal de estos modelos puede extenderse en algunas horas (modelos "intra-días") o sobre varios días (modelos "inter-días"), principalmente para tomar en cuenta la formación de hábitos de transporte consecutivos a una modificación de la oferta o de la demanda (por ejemplo el cierre de

ejes viales para el mantenimiento, modifica temporalmente la elección de itinerario del automovilista). Los modelos inter-días son menos utilizados que los intra-días. En lo subsecuente se mencionarán herramientas que modelan el transporte individual, ya que las herramientas dinámicas para los transportes en común aún están en desarrollo (ver por ejemplo Mekkaoui, 2004).

En resumen, la evolución de la congestión y de los hábitos de los usuarios en las horas del día, en los días y en los años, no es explícitamente tomada en cuenta en los modelos actuales. La modelación de estos aspectos dinámicos de la circulación, pareciera útil para afinar los estudios de la congestión y comprender mejor los sistemas urbanos. Ese tipo de modelación resulta más pertinente para evaluar el impacto de medidas innovadoras como son los sistemas de información (embarcado o en ruta), el teletrabajo, la aparición de nuevos modos de desplazamientos (coche eléctrico, coche compartido) o las medidas flexibles tales como: cambios de dirección de circulación, peatonalización, creación de parques de disuasión, etcétera.

2. Motivaciones de la modelación dinámica

2.1 Comprensión de la congestión

Nuestra experiencia nos enseña que las condiciones de circulación varían según la hora del día: el tiempo necesario para completar un viaje cotidiano domicilio-trabajo, varía según la hora en que se inicie nuestro viaje. De forma análoga, la probabilidad de disponer de un lugar en el transporte público no es el mismo a las 6 que a las 8 de la mañana.

Estos ejemplos muestran que en las situaciones en las que los sistemas de transporte se saturan, no se puede suponer que la *congestión* de dicho sistema sea constante durante periodos largos de tiempo. En este sentido, la congestión puede definirse como "el fenómeno de saturación que se produce una vez que varios individuos desean aprovechar, durante un mismo periodo de tiempo, una prestación de un servicio que sólo

está disponible en cantidades limitadas". Como puede constatar en esta definición tan simple, se perfila la dimensión temporal "al mismo tiempo". La modelación dinámica está motivada, por lo tanto, por la comprensión de los fenómenos de congestión, que con frecuencia son, por naturaleza, dinámicos y también por el hecho de que la congestión de los sistemas de transporte es indeseable, a diversos modelos, por el colectivo: eficiencia económica, social o ambiental.

2.2. Sistemas de información a los usuarios

Además de la motivación científica, una motivación más tecnológica alimenta actualmente el interés por los modelos dinámicos: se trata de la introducción de los sistemas de información a los usuarios. En particular, los nuevos sistemas, como los tableros a mensajes variables y los ordenadores de información embarcada, informan a los automovilistas sobre las condiciones de circulación del sistema que utilizan, lo que les permite ajustar sus decisiones durante el recorrido. Estos sistemas están teniendo un éxito creciente, gracias principalmente a los desarrollos tecnológicos realizados en telemática carretera.

Estos nuevos sistemas de información, al igual que sus ancestros como la radio, tienen como objetivo prevenir y aminorar la congestión "no recurrente", es decir la congestión que no se repite día tras día, sino que más bien se debe a accidentes de naturaleza variada (accidentes, trabajos de mantenimiento en la red, condiciones meteorológicas, acontecimientos deportivos, manifestaciones, etcétera). Se estima que en las zonas urbanas cerca del 50% de la congestión es de naturaleza no recurrente, de ahí la importancia de reducirla, para las autoridades encargadas de regular el tránsito. Los sistemas de información son potencialmente útiles fuera del régimen estacionario, bajo condiciones de tráfico perturbado. La reacción de los usuarios a esta información depende intrínsecamente del tiempo. Es decir, según el momento en el cual la información es recibida (después/durante/antes del trayecto), el usua-

rio va a adaptar sus hábitos de transporte especialmente (eligiendo otro itinerario) o temporalmente (partiendo más temprano o más tarde de su hora habitual). Dada la naturaleza de estos fenómenos, se comprende fácilmente la pertinencia de emplear un modelo dinámico para estimar la evolución de la congestión durante el día y para administrar los sistemas de información.

A pesar de que cada vez aparecen más sistemas de información en la ciudad o en la zona conurbada (tableros de mensajes variables indicando los embotellamientos o accidentes, la disponibilidad de lugares de estacionamiento), no existen actualmente más que algunas herramientas que permiten prever *a priori* el impacto inducido sobre la circulación por el uso de estos sistemas. En otras palabras, el gestor de las redes sabe cuánto costará un sistema, pero difícilmente puede cuantificar su beneficio futuro. Por otra parte, algunas preguntas quedan abiertas en cuanto a la forma de explotar estos sistemas: ¿Cómo debe informarse a los usuarios para absorber eficientemente la congestión?, ¿qué tipo de información se requiere suministrar?, ¿la información actual (instantánea) del estado de la red o la información predictiva (de guía), sobre las condiciones de circulación posteriores?, ¿la información debe depender del número de personas que tienen acceso al sistema, para evitar el fenómeno de saturación de los itinerarios propuestos?, estas preguntas implican precisamente el campo de investigación de los modelos dinámicos. El lector puede consultar en Arnott (1998a) o Emmerink (1999) una discusión teórica del papel de la información sobre el nivel de congestión.

2.3. Nuevas medidas de planeación

Finalmente, una última motivación en favor de los modelos dinámicos proviene de la naturaleza de las medidas de transporte actualmente impulsadas en la mayor parte de las zonas urbanas. Las municipalidades se implican cada vez menos en los grandes proyectos de infraestructura por razones de orden financiero, ecológico

o social; éstas se orientan más hacia una mejora de la gestión de las infraestructuras existentes y de la demanda, hacia un refinamiento de las políticas de transporte con el objeto de aminorar la congestión por otros medios diferentes a la extensión de la capacidad del sistema (aumento del número de carriles o de las características geométricas de la vialidad). En la medida de lo posible, favorecerán la aplicación de medidas "ligeras", reversibles o flexibles que no necesitan de grandes inversiones. La regulación de los semáforos en ondas verdes, la tarificación de los servicios (modo de transporte, estacionamiento, carreteras) son tan sólo algunos ejemplos de estas medidas.

Entre estas medidas, una clase prometedora de políticas de transporte consiste en administrar mejor la demanda de desplazamientos en el tiempo. Es decir, repartir mejor los desplazamientos en el tiempo para disminuir el nivel de congestión en las horas pico más saturadas. Existen diferentes métodos incitativos, tales como la extensión de los horarios flexibles (en las empresas), horarios desfasados (entre empresas de sectores diferentes) y aún más el teletrabajo. La aplicación de los intervalos horarios para la circulación de los vehículos pesados en la ciudad, es un ejemplo similar.

Por otra parte está la elección de modo e itinerario, estas medidas modifican también la elección de la hora de partida de los usuarios, de ahí la pertinencia de un modelo dinámico para evaluar su aplicación. En resumen, el estudio dinámico de sistemas de transporte aporta un marco espacial y temporal para modelar la elección de los usuarios en cuanto a: (a) la elección de la localización o ubicación de las familias, (b) la elección del modo de transporte, (c) la elección del itinerario, (d) la elección de la repartición horario de las actividades, (e) la elección de la hora de inicio de un viaje. Así, los modelos dinámicos aportan al planeador: (a) una mejor comprensión de los fenómenos de la congestión, (b) un marco adecuado para el análisis de los sistemas de información (medidas contra la congestión no recurrente), (c) la posibilidad de evaluar las medidas

que intervienen en la repartición temporal de actividades (medidas contra la congestión recurrente) y la implantación de nuevos modos de desplazamiento.

3. Metodología de la modelación dinámica

De lo estático a lo dinámico

Antes de introducirse en la clasificación de los métodos existentes de planeación, conviene definir el término de modelo dinámico. De forma general, se trata de modelos alimentados (ver Ortúzar y Sánchez, 2004), que toman en cuenta explícitamente la formación de la congestión en el curso del día. Se distinguen cinco tipos de modelos que traducen la progresión teórica que permite extender el modelo estático hacia el modelo dinámico más completo: (a) los modelos casi-estáticos, (b) los modelos de afectación dinámica, (c) los modelos de elección de la hora de partida con congestión endógena o exógena, (d) los modelos dinámicos con régimen estacionario, (e) los modelos "completamente" dinámicos.

Los modelos casi-estáticos

Reagrupan diferentes enfoques que reducen el problema de la congestión, suponiendo que el periodo estudiado (e.g. el periodo punto de la mañana) es una sucesión de periodos más pequeños (e.g. tramos horarios) donde la congestión puede ser considerada como una constante. Todo el marco de optimización estática puede por lo tanto aplicarse a estos sub-periodos. Aunque el uso de este método sea extremadamente simple (sólo se requiere de una matriz O-D para cada tramo y aplicar un modelo estático). Sufre de severas lagunas metodológicas, debido a que es necesario asociar las matrices O-D de los periodos adyacentes. Además, las fronteras de estos periodos son arbitrarios y nada permite determinar si un usuario no va a desear pasar de un periodo al otro, es decir de modificar su hora de partida, más que cambiar de itinerario. Por otra parte, la interpretación de resultados puede tornarse delica-

da, ¿cómo explicar un tiempo de recorrido calculado, que sea superior a la del sub-periodo mismo? Otras técnicas mezclan los enfoques dinámicos y estáticos como el software SATURN que calcula un equilibrio estático, pero que opera una simulación dinámica de las intersecciones para calibrar las capacidades y las penalizaciones de los giros.

Los modelos de afectación dinámica

Son ciertamente los más populares y los mejores conocidos, cuando se habla de "dinámico" (ver por ejemplo en Algiers et al, 1997 el inventario del proyecto europeo "Smartest"). Estos modelos consideran que la demanda de desplazamientos es exógena y variable en el tiempo, y permiten determinar cuáles van a ser los itinerarios de los usuarios. Se trata más bien de modelación de la elección de itinerarios y de comportamientos de los conductores. Un buen número de estos modelos son usados bajo la forma de simuladores numéricos, que tienen en cuenta fenómenos relativamente finos y relativos a la oferta: detalles de la vialidad y de los vehículos. Estos modelos son particularmente apreciados para la evaluación de medidas de transporte "tácticas" (e.g. ordenamientos viales locales, sistemas de información, etcétera). Por el contrario, la noción de equilibrio está ausente en la mayor parte de ellos: como las matrices O-D son exógenas, es necesario conocer (y coleccionar), para cada intervalo de tiempo (e.g. cada cinco minutos), la demanda de desplazamientos de O a D para toda la red. Esto representa una masa considerable (y con frecuencia irreal) de datos, lo que explica la búsqueda de métodos sofisticados que permitan extrapolar esta demanda dinámica a partir de conteos, principalmente. La demanda no es elástica, lo que vuelve a estos modelos inadecuados para la planificación y también para el análisis de medidas "estratégicas" o de gran escala.

Los modelos de elección de la hora de partida

Consisten en despreciar completamente el aspecto en red de la oferta. El estudio se reduce a un par O-D

conectado por un solo arco y se concentra sobre la elección de la hora de partida (del domicilio al trabajo en general). El modelo del economista W. Vickrey (premio Nobel de economía 2000) es de los más conocidos entre ellos, y en el cual supone que los usuarios realizan un balance entre el retraso (o el adelanto) al llegar a su destino y la congestión que se soporta. En términos generales, se supone que los usuarios eligen entre dos soluciones: (a) partir a una hora tal que su trayecto estará despejado pero con una demora (positiva o negativa) importante sobre su hora ideal de llegada o (b) partir en un momento óptimo con respecto a la hora de llegada pero al precio de un trayecto congestionado. El modelo de Vickrey prevé en casos intermedios (de manera continua) y provee, como resultado, la tasa de salida al origen en el curso del día, así como la congestión sobre el eje único (fila de espera determinista). La congestión es, en consecuencia, endógena al modelo. Este modelo, bastante simplificador en términos de descripción de la oferta, permite toda una serie de análisis económicos y de extensiones (tarificación, heterogeneidad, horarios flexibles y desfasados, etcétera). Una vía adicional parece no haber sido explorada: aquella que consiste en conservar la especificación de la demanda, introducida por Vickrey, y suponer que el tiempo de recorrido del origen al destino de referencia es una función exógena del curso del tiempo. En THEMATTR 2003 se demuestra que este enfoque permite introducir la variabilidad de la congestión y su característica estocástica (no recurrente) y estudiar las horas de salida de los usuarios, principalmente en función de: (a) su aversión al riesgo, (b) su equipo de información disponible.

El modelo dinámico con régimen "estable" o "estacionario"

Es otro enfoque innovador explorado recientemente y consiste en describir la congestión de forma fidedigna en términos de dinámica de la congestión: se sustituye una capacidad física de las curvas clásicas flujo-veloci-

dad de los modelos estáticos. De Palma y Nesterov (1997) han demostrado que, partiendo de hipótesis mínimas en la descripción de los arcos (tiempos de recorrido sin congestión y capacidad dinámica), y suponiendo que el estado de toda la red es estacionario en el tiempo, se puede describir un equilibrio de Wardrop estacionario, provisto de propiedades similares al equilibrio estático clásico.

Modelo dinámico "completo"

El modelo que engloba explícitamente todas las elecciones del usuario: elección del modo, elección de la hora de partida y del itinerario. Esto implica una descripción desagregada de la oferta (red) y una descripción explícita de la componente temporal, donde el tiempo figura como una variable continua. Actualmente no existe un funcionamiento realista de este tipo de modelo. La complejidad es, en efecto tal, que se trata de modelos experimentales que son con frecuencia, restrictivos en términos de recursos de cálculo. Se estima que estos modelos permitirían la evaluación, a gran escala, de medidas de transporte que afectan directamente la evolución temporal de la congestión, como son los sistemas de información. La herramienta empleada en las simulaciones, METROPOLIS, constituye un ensayo en esta dirección. En los siguientes párrafos emplearemos generalmente "dinámico" para hacer referencia al modelo dinámico "completo".

3.1. Tres enfoques de modelación

Los métodos de análisis dinámico de la congestión de los transportes son relativamente recientes, puesto que el agregado de la dimensión temporal vuelve los modelos más complejos. Tomando por ejemplo la modelación de un sistema de información "pre-viaje", es decir que informan al usuario antes de que abandone su domicilio. Siguiendo el contenido del mensaje que lo informa de los incidentes ocurridos en la red, el usuario va a tomar eventualmente la decisión de utilizar el transporte público, más que el coche particular

(por ejemplo en el caso de condiciones meteorológicas adversas). Alternativamente, preferirá adelantar su hora de inicio del viaje (e.g. en el caso de accidentes que lo obliguen a utilizar la ruta más larga, o también podría modificar su destino, para tener una probabilidad más alta de tener acceso a un estacionamiento). Se puede ver que para modelar las elecciones de transporte de los usuarios en un marco dinámico, no se les puede tratar secuencialmente como en el modelo clásico a cuatro etapas. La dificultad de modelación reside en la complejidad de las interacciones posibles. En este sentido existen tres diferentes enfoques de modelación:

Enfoque analítico

El método *analítico* consiste en formular matemáticamente el modelo que describe las elecciones de transporte. En general, las elecciones consideradas corresponden a la elección dinámica del itinerario (con posibilidad de cambiar de itinerario durante el trayecto) y eventualmente la elección de la hora de partida. Una segunda parte del método consiste en proponer un *algoritmo* que permite calcular numéricamente la solución del problema. Estas técnicas tienen sus fundamentos en la teoría de grafos, la investigación de operaciones y los métodos de optimización. Se trata de modelos de afectación dinámica y requieren en general, la estimación de matrices origen-destino dinámicas (es decir, la demanda considerada para cada paso de tiempo y la definición de relaciones velocidad-densidad que describan la congestión en los arcos). Estos métodos son muy útiles a nivel de la investigación y de la comprensión de la congestión. No obstante, los cálculos siguen siendo complejos aun cuando se trata de redes muy simples y no permiten tratar redes de tamaño real. Hay que remarcar que estos modelos se vuelven particularmente útiles para describir y analizar casos muy simples por los investigadores, los fenómenos complejos ligados a la congestión.

Enfoque experimental

El método experimental se basa en observaciones del sistema de transporte y de sus usuarios: el desempeño de la red se mide por medio de conteos, y la demanda se estudia gracias a encuestas orientadas a los usuarios. Los métodos econométricos permiten estimar las elasticidades de la demanda desde el punto de vista de diferentes modos de transporte. Esto permite evaluar la flexibilidad de los usuarios para modificar su hora de partida o su itinerario y de aislar las restricciones que van a condicionar la eficiencia de la información transmitida (ver la teoría sobre la demanda y los estudios de preferencias reveladas y declaradas). Este tipo de información permite, a partir de la observación de las condiciones actuales, de predecir el impacto potencial de la introducción de los sistemas de información. Estos métodos tratan sobre todo de aislar tipologías de comportamiento (que son determinantes en la forma en la que será percibida y empleada la información) más que de preveer cuantitativamente el estado dinámico de la congestión de la red. Se trata de aislar, experimentalmente, las "leyes" de comportamiento que rigen las diversas decisiones del sistema "completamente" dinámico.

Enfoque por simulación

Finalmente, el método por *simulación* (e.g. Ortúzar y Sánchez, 2004) puede ser visto como un método híbrido que toma del método analítico el aspecto cuantitativo y del método experimental el aspecto desagregado y de comportamiento. En efecto, el principio de este tercer método consiste en simular, con computadora, el tráfico de los usuarios en la red: en el punto donde el método analítico se torna pesado y muy complejo, se aportan simplificaciones instadas por la observación experimental. Los usuarios son simulados individualmente (o agrupados en pequeños paquetes) y la simulación consiste en calcular sus elecciones de transporte sobre la base de submodelos teóricos confirmados. Por ejemplo, se simulará la elección modal, empleando un mo-

delo logit (e.g. Ortúzar, 2002): cada individuo tendrá una cierta probabilidad de elegir el automóvil más que el transporte público. Para los que hayan elegido el automóvil se podrá enseguida simular la manera de conducir (rebases, cambios de carril, etcétera) gracias a modelos finos de tráfico (microscópicos). Aunque no haya una formulación matemática completa del método, los diferentes módulos (elección modal, elección de la hora de partida, elección del itinerario, etcétera) interactúan por medio de heurísticas inspiradas en las observaciones experimentales. Por ejemplo, se supone que la elección modal precede la elección del itinerario o que la elección del itinerario se limita a un número restringido de caminos, mientras que el método analítico explorará todos los caminos posibles.

En resumen, la simulación permite estudiar sistemas realistas como los que se hallan en la práctica, combinando los aspectos predictivo y de comportamiento de otros dos métodos, aclarando que se paga el precio de un rigor matemático menor y empleando hipótesis de comportamiento más o menos justificables. En consecuencia, se utilizan más los métodos analíticos cuando se busca estudiar la congestión de forma *universal* y poner en evidencia conceptos cualitativos propios a la dinámica de las redes. En sentido opuesto, nos apoyamos en evidencias experimentales cuando se busca entender, *localmente*, los hábitos de transporte de un sitio, de una región o de una ciudad. Finalmente, la simulación se apoya en el conocimiento local y sobre su capacidad de predicción para permitir al planeador de analizar los escenarios de transporte con suficiente detalle. Cualquiera que sea el método utilizado, las fases últimas del proceso de análisis son el ajuste (calibración) y la validación: la confrontación de los resultados con la realidad actual o la comparación de las situaciones predichas y realizadas.

3.2. Nivel de detalle

Se distinguen diferentes niveles de detalle en los modelos: según la fineza de la descripción de las redes, se-

gún la complejidad del modelo de congestión y según la desagregación de la demanda, se hablará de niveles macroscópicos, microscópico o un nivel intermedio.

Nivel Macroscópico

Los aspectos de red (utilizando una red muy esquemática) son despreciados, para concentrarse en la dinámica del sistema y el equilibrio económico entre la oferta y la demanda, o bien, se utiliza una red simple pero con leyes de congestión agregadas (e.g. ecuaciones diferenciales para los flujos de tránsito). La demanda es igualmente agregada por paquetes de usuarios sin características propias. Los métodos analíticos y experimentales forman parte de este nivel. Notemos que ciertos de ellos pueden tomar en cuenta varias "clases" de usuarios (e.g. usuarios informados y no informados, ver Ran and Boyce, 1994).

Nivel Microscópico

La descripción de la congestión y de los usuarios es muy detallada, se pueden describir los vehículos a partir de su velocidad, aceleración; clases de vehículos según sus características físicas, clases de usuarios según su comportamiento de conducción, entre otras. Todos los datos entran en juego en modelos de congestión sofisticados que pueden simular el flujo de los vehículos tomando en cuenta los rebases, la distancia entre los vehículos, la ocupación de los carriles, los semáforos. Éste es el nivel de detalle de los microsimuladores. En general, los costos de cálculo no permiten tratar redes densas en tiempos razonables. Desde este punto de vista, se prestan muy poco para la planeación a nivel global de una ciudad y a la estimación de indicadores económicos. Por el contrario, se adaptan muy bien al estudio de medidas tácticas, locales por medio de subsistemas (e.g. gestión de las arterias principales o las vías rápidas, la estimación de la capacidad de rotondas, la gestión de las fases de un semáforo, la reducción del ancho de la vialidad, etcétera).

Nivel Mesoscópico

Es el nivel intermedio de simulación que integra una descripción fina de la red urbana en un enfoque dinámico con usuarios simulados individualmente, pero con un nivel menos fino que el microscópico para los modelos de congestión. En este sentido, la congestión es modelada por relaciones velocidad-densidad preestablecidas.

4. Descripción de la herramienta de simulación

METROPOLIS puede considerarse como un simulador mesoscópico que permite calcular el estado dinámico de la congestión de una red vial urbana de tamaño real. La originalidad de esta herramienta es su capacidad para simular rápidamente la dinámica de la congestión de redes a gran escala. Es decir, sólo se requieren algunos datos adicionales en comparación con los modelos estáticos. Este punto es importante, ya que generalmente existe una estimación de matrices origen-destino en la mayoría de las ciudades importantes. Este simulador permite estudiar tanto la dinámica "intra-días" como la "inter-días". Su concepción integra los sistemas de información y el análisis de situaciones de equilibrio (congestión recurrente) o de desequilibrio (congestión no recurrente). Las cuatro subsecciones siguientes presentan la modelación relativa a la elección de la hora de partida, la función de tiempos de recorrido, la elección de ruta y el proceso iterativo de simulaciones preliminares.

4.1 La elección de la hora de partida

La modelación de la hora de partida se basa en el principio introducido inicialmente por Vickrey (1969). Este principio admite que cada persona, cuando se desplaza dispone de una hora de llegada visada o deseada t^* . Si esta persona llega a su destino a una hora t_a precedente a t^* entonces soporta un costo por haber llegado antes de esa hora (adelantado). En el caso contrario, experimenta un costo por su llegada después de la hora

(retrasado). Estos costos influyen en la elección de la hora de partida del viajero.

Sean N usuarios los que se desplazan entre un origen (O) y un destino (D) comunicados por una sola ruta. La elección estudiada es la de la hora de partida. Sea $tt(t_d)$ el tiempo de recorrido de un usuario del sistema de transporte que sale de O al instante t_d . La hora de llegada de este usuario es $t_d + tt(t_d)$. Todos los usuarios desean llegar a la misma hora t^* .

El intervalo de llegada antes de la hora de partida es $t_d + tt(t_d) < t^*$ mientras que el intervalo de llegada después de la hora (retraso) vale $t_d + tt(t_d) > t^*$. Los usuarios eligen su hora de partida de forma tal que minimicen una combinación de costos, debido a los tiempos de recorrido y al intervalo de tiempo de llegada. Esta elección resulta del balanceo entre una llegada en t^* con congestión máxima o una llegada adelantada (o en retraso) con un nivel de congestión más baja, o en su caso inexistente. La función de costo, $C(t_d)$, está compuesta de penalizaciones relativas al tiempo de recorrido y a las llegadas adelantadas o atrasadas, es decir:

$$C(t_d) = \alpha \cdot \frac{1}{t_d} + \beta \cdot \max(0, t_d + tt(t_d) - t^*) + \gamma \cdot \max(0, t^* - t_d - tt(t_d)) \quad (1)$$

donde: α es el valor unitario del tiempo (valor subjetivo), β y γ representan respectivamente, los costos unitarios de una llegada adelantada o de una llegada retrasada. Según Small (1992), $\beta < \alpha < \gamma$; dicho de otra forma, el usuario prefiere llegar un minuto antes que pasar un minuto en un embotellamiento (en una fila de espera, por ejemplo), de la misma forma prefiere llegar un minuto antes que después lo que implica una llegada en retraso.

El modelo de elección de la hora de partida, que reposa sobre estas bases, permite dinamizar la matriz

O-D estática utilizada en la herramienta de simulación. La elección de la hora de partida utiliza un modelo probabilista (logit). El cual implica que la probabilidad que un usuario elija la hora de partida t_i en uno de los intervalos es:

$$P_i = \frac{e^{-\lambda C(t_i)}}{\sum_j e^{-\lambda C(t_j)}} \quad (2)$$

donde λ representa el termino de error y corresponde a variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas que siguen una ley doble exponencial de parámetro λ (e.g. Ortúzar, 2002). Este proceso, descrito por las relaciones (1), es directamente simulado por el método de Monte Carlo. La probabilidad resultante del modelo logit, se escribe de la siguiente forma:

$$P_i = \frac{e^{-\lambda C(t_i)}}{\sum_j e^{-\lambda C(t_j)}} \quad (3)$$

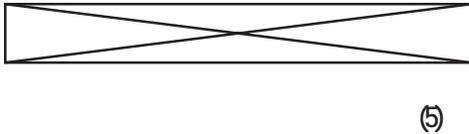
Una adaptación de este modelo permite tratar la hora de partida como una variable continua. La probabilidad de elegir la hora de partida en $[t_i, t_i + \Delta t]$ resulta:

$$P_i = \frac{e^{-\lambda C(t_i)}}{\sum_j e^{-\lambda C(t_j)}} \quad (4)$$

4.2. La función volumen-demora

El modelo de congestión dinámica más simple (e.g. Arnott et al 1998b) es decir, el de cuello de botella determinista a capacidad constante y fila de espera ver-

tical, permite definir los tiempos de recorrido, tt , en función de la hora de llegada al inicio de la fila de espera (punto A sobre la figura 1), t_A , al final del arco. El tiempo de recorrido $tt(t_A)$ está compuesto de un tiempo de viaje fijo sin congestión, tt_0 , y de un tiempo de recorrido adicional debido a la congestión (relacionado al número de usuarios presentes en el arco), $tt_v(t_A)$:

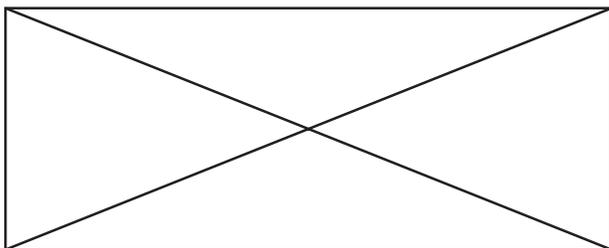


donde $Q(t_A)$ es el total de vehículos en la fila de espera y s es la capacidad del cuello de botella.

La figura siguiente representa un cuello de botella de capacidad s en el caso de una red simplificada compuesta de tres arcos (j , k y l) y dos intersecciones (I y I'). El cuello de botella se halla en el extremo derecho del arco k .

El tiempo de recorrido sin tráfico es de tt_0 sobre la parte izquierda del arco, se admite que la fila de espera $Q(t_A)$ se forma verticalmente en el punto A. Su formación se concreta en dos instantes que se definen como sigue: el instante de inicio de formación de la fila, t^c , para el cual y el instante de término de formación de la fila, t^{cc} , para la cual , donde $r(t)$ representa el flujo de llegada vehicular al cuello de botella en el instante t .

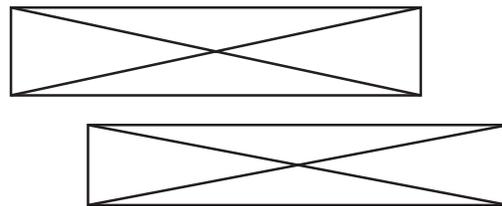
Figura 1: Red simplificada con cuello de botella



4.3. Elección de la ruta

El proceso de elección de itinerario en la herramienta de simulación es determinista (o estocástica) y se basa en una estrategia adaptativa de elección de ruta. El itinerario elegido no está definido previamente, sino más bien se define de manera secuencial debido a que el usuario elige la dirección a tomar en cada intersección. Este proceso se fundamenta en dos principios: el primero supone que la información relativa a los tiempos de recorrido, sobre cada ruta, se adquiere durante la simulación (de día en día) y que el tiempo de recorrido se obtiene con la información de dos simulaciones consecutivas. El segundo principio supone que en cada intersección, los usuarios toman el arco cuyo tiempo de recorrido esperado al instante t , , sea el mínimo.

Considerando las notaciones de la figura 1, el usuario que debe dirigirse a un destino D y que ha llegado a la intersección I , elige el arco k si:



Donde $tt_k(t)$ representa el tiempo de recorrido actual sobre el arco k , el término indica el tiempo de recorrido histórico para el trayecto de I a D realizado en $t+tt_k(t)$. Finalmente $tt_{D,k}(t)$ indica la estimación de tiempo de recorrido más corto para alcanzar D .

4.4. Procesos iterativos

El primer día (primera iteración), los usuarios toman sus decisiones en función del tiempo del camino más corto calculado para cada par O-D, suponiendo que no habrá congestión (no consideran que otros usuarios estarán presentes en la red de transporte, en este caso corresponde al tiempo sobre el camino más corto). Al final de esta primera iteración, los tiempos de

recorrido son calculados para cada par O-D, teniendo en cuenta las tasas de ocupación de los diferentes arcos. Los usuarios actualizan las estimaciones de tiempo de recorrido para el siguiente día (iteración siguiente) combinando la información del día actual con la de los tiempos de recorrido realizados en días anteriores. La simulación continúa con la nueva iteración. En consecuencia, se recalcula la ecuación que da t_k , este procedimiento implica que $t_k(t)$ es calculado durante el día actual y el valor de t_k es estimado a partir de los datos de los días (iteraciones) anteriores.

La actualización, a cada iteración, de los tiempos de recorrido históricos (o estimados) permite dar cuenta de los accidentes que pueden aparecer durante uno de los días simulados. Este proceso se denomina "proceso de aprendizaje" debido a que permite considerar las modificaciones, día a día, de los hábitos de conducta de los usuarios que pudieran ser inducidos por una modificación de la red de transporte (e.g. los trabajos de mantenimiento que reducen la capacidad de un tramo vial). Por otra parte, si las condiciones de circulación permanecen sin cambios, se puede suponer que todo el sistema alcanzará el estado estacionario. Es decir, un estado en el que los usuarios ya no pueden mejorar más su conocimiento: los tiempos de recorrido esperados son iguales a los tiempos de recorrido efectivos o realmente efectuados. El cuadro 1 indica algunos procesos de aprendizaje utilizados actualmente en la herramienta de simulación. En este cuadro, la magnitud X indica la información en cualquiera de sus condiciones (aquí el tiempo de recorrido de O a D), w designa el día considerado, los índices H y S representan los valores históricos y simulados respectivamente.

Cuadro 1: Cuatro tipos de proceso de aprendizaje están implementados en la herramienta de simulación.

Tipo	Fórmula
Exponencial	$t_k = t_{k-1} \cdot \alpha + (1 - \alpha) \cdot t_k$
Lineal	$t_k = t_{k-1} + \lambda \cdot (t_k - t_{k-1})$
Cuadrático	$t_k = t_{k-1} + \lambda \cdot (t_k - t_{k-1}) + \mu \cdot (t_k - t_{k-1})^2$
Genérico	$t_k = t_{k-1} + \lambda \cdot (t_k - t_{k-1}) + \mu \cdot (t_k - t_{k-1})^2 + \nu \cdot (t_k - t_{k-1})^3$

La regla de detenimiento está basada en la estabilización de los costos ligados a los tiempos de trayecto históricos. En los procesos de simulación se utiliza, generalmente, el proceso de tipo exponencial (con velocidad $\alpha = 0.2$). Los resultados de las simulaciones muestran que el proceso de actualización de las horas de partida llega a un régimen estacionario luego de 50 iteraciones aproximadamente.

4.5. Desempeño y coherencia de la herramienta de simulación

4.5.1. Adaptación del simulador a grandes redes

La herramienta de simulación fue concebida en un inicio para simular redes de tamaño medio. Algunas pruebas sobre las redes de las ciudades de Sioux Falls y Lausana evidenciaron el crecimiento lineal de la necesidad de recursos informáticos con el aumento del tamaño de la red. Para incrementar la eficiencia de la herramienta de simulación se tomaron medidas en las siguientes direcciones: (a) la aceleración del algoritmo de simulación, (b) una mejor gestión del volumen de información almacenado, (c) una mejor distribución de la arquitectura de seguimiento de las simulaciones.

Aceleración del algoritmo de cálculo. Es importante señalar que actualmente no existen herramientas de simulación dinámica operacionales como la empleada durante esta investigación. Existen, sin embargo,

44 algunas experiencias en redes de tamaño importante, utilizando un enfoque de microsimulación (por ejemplo la simulación de TRANSIMS en la red de Portland realizada con supercomputadoras). La herramienta de simulación requiere, partiendo de una situación "inocente" en la que los usuarios eligen su hora de partida considerando que son los únicos usuarios de la red, del orden de 50 iteraciones para alcanzar el estado estacionario. Estas iteraciones representan alrededor de 7 horas de cálculo en una computadora personal de gama alta. Con esta ilustración se entiende fácilmente la necesidad de eficientar el algoritmo de cálculo. En este sentido, se benefició la posibilidad de distribuir la arquitectura informática en diferentes máquinas dedicadas a tareas específicas: un servidor de cálculo para operar rápidamente las simulaciones y estaciones de trabajo para la codificación y el análisis de los resultados. La estructura del algoritmo se describe brevemente a continuación:

Etapas 1 : Cálculo para cada usuario de su hora de partida como una función de la información histórica disponible (simulación anterior).

Etapas 2 : Afectación dinámica, elección de itinerarios y cálculo del nivel de congestión.

Etapas 3 : Actualización de la información (tiempos de recorrido correspondientes) en base a las condiciones de circulación prevalecientes en la etapa 2.

Etapas 4 : Retorno a la etapa 1 en el caso de que la información sobre las condiciones de circulación cambie.

Puede constatarse que la etapa 2 es la más difícil a disociar debido a las interacciones entre todos los usuarios que son precisamente los generadores de la congestión. En contraparte, las etapas 1 y 3 pueden separarse en subetapas, ya que las mismas operaciones deben ser realizadas para cada usuario (cálculo individual de la hora de partida) y para cada parte de la red (obtención de la información y de los tiempos de recorrido estimados).

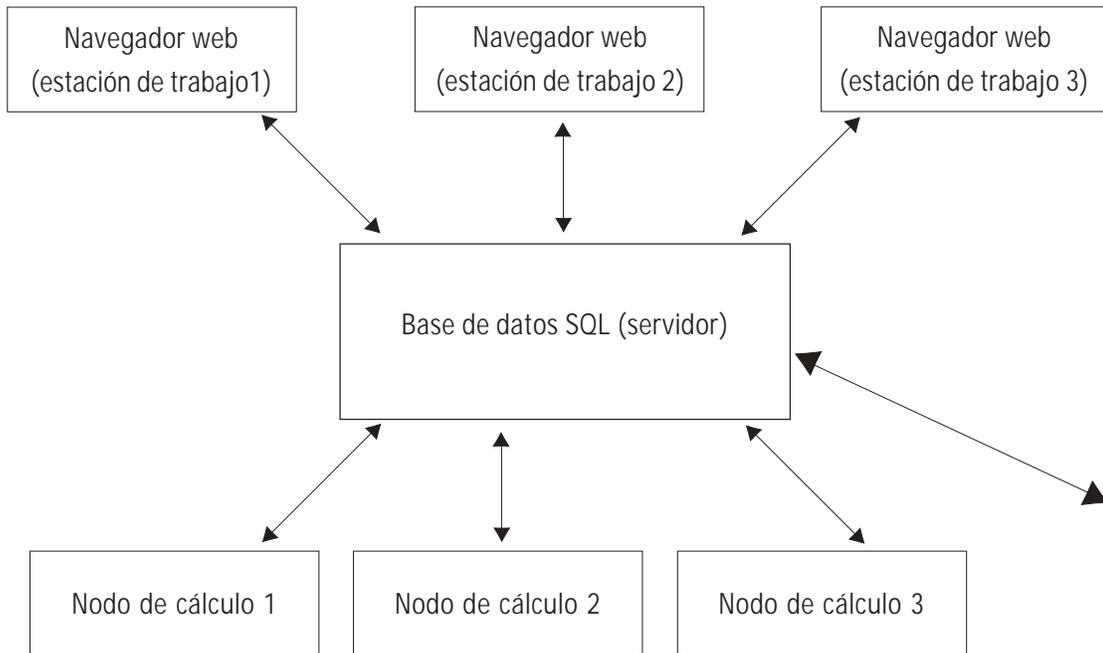
Gestión del volumen de resultados. La integración de la componente temporal en los fenómenos de

transporte presenta no solamente problemas teóricos, sino también problemas técnicos de manejo de un volumen importante de datos. Un modelo estático convencional produce como resultado, para el periodo de tiempo de análisis, el volumen de usuarios sobre cada uno de los arcos y sus respectivos tiempos de recorrido. En el caso de la herramienta de simulación empleada, se pueden definir diferentes intervalos para un periodo de análisis dado. En este sentido, la herramienta de simulación almacena flujos de entrada, de salida y tiempos de recorrido medio para cada uno de esos intervalos. Así, para un intervalo de 5 minutos y un periodo de análisis se requiere almacenar 30 veces el volumen de información requerida por un análisis estático.

Por otra parte, debido a que la caracterización de la demanda sigue un enfoque desagregado, los parámetros de cada usuario deben ser almacenados (costos unitarios de tiempo, hora de salida y de llegada) para simulaciones posteriores. Por ejemplo, en el caso de una red con un millón de usuarios (caso de la región parisina, Sanchez *et al.* 2001) y una docena de características de los usuarios se tienen alrededor de 40 Mb de datos. Este volumen de información no puede ser tratado con hojas de cálculo clásicas (Excel por ejemplo sólo permite tratar alrededor de 70,000 entradas). Por esta razón, el manejo y almacenamiento de datos se realiza con ayuda de una base de datos relacional de tipo SQL. Esta solución permite distribuir la arquitectura del sistema de simulación y separar las unidades de cálculo de las unidades de almacenamiento.

Distribución de la arquitectura y seguimiento de las simulaciones. El seguimiento de las simulaciones se realiza distribuyendo las tareas propias de la simulación en diferentes máquinas. Para ello, se utiliza una arquitectura cliente-servidor (ver figura 2) que permite a cada persona encargada del lanzamiento o seguimiento del proceso de simulación de controlarlas gracias a un navegador web clásico.

Figura 2: Arquitectura de distribución de tareas de la herramienta de simulación



45

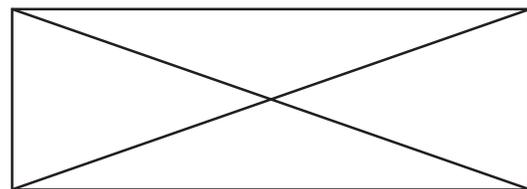
Esta adaptación requiere la puesta a punto de una aplicación de seguimiento de las simulaciones a través de web y la integración de comunicaciones con la base de datos (bd) a varios niveles (desde la bd hacia el simulador y viceversa, desde el navegador web hacia la bd y viceversa). Esta arquitectura permite también a varios operadores acceder a los recursos centralizados en la base de datos. El servidor web dirige las órdenes de simulación hacia los nodos de cálculo disponibles. Los nodos de cálculo son, típicamente, servidores de cálculo o eventualmente supercomputadoras con multiprocesadores.

4.5.2 Estacionalidad y convergencia

El equilibrio dinámico del sistema es alcanzado siguiendo el primer principio de Wardrop, es decir, una vez que ninguno de los usuarios puede modificar unilateralmente su hora de partida o su ruta con el ob-

jeto de disminuir, estrictamente hablando, su costo de desplazamiento. Sin embargo, no existe una formulación matemática de tal equilibrio en una red. En la versión actual de la herramienta de simulación se hace referencia a un estado de régimen estacionario del sistema.

En las simulaciones realizadas se utiliza un proceso de ajuste y un criterio de convergencia. El criterio STAC (criterio de agregación espacio tiempo por sus siglas en inglés) se empleó para verificar la convergencia. Este criterio toma en cuenta los cambios de día en día de los tiempos de recorrido, se define de la siguiente forma:



(6)

Donde:

 y  : son los valores históricos y simulados de tiempos de recorrido al día  sobre el arco i al periodo t ,

L : el número de arcos sobre la red,

T : el periodo simulado,

 : la importancia relativa de la congestión y

 : el tiempo de recorrido sin usuarios sobre el arco i .

46

Bajo ciertas condiciones (ver de Palma y Marchal, 1996, 1998a), el criterio STAC tiende hacia 0, una vez que el número de iteraciones (días simulados) es muy grande. La figura siguiente representa los valores de este criterio para las 100 primeras iteraciones. Debido a los comportamientos de elección estocástica de usuario, este criterio tiende hacia 0.05 (Ver ecuación (6) en la simulación indicada. La figura 3 pone de manifiesto que en las primeras iteraciones los usuarios ignoran completamente el nivel de congestión inducido por la presencia de otros usuarios en la red. Durante las primeras quince o veinte iteraciones, el sistema intenta alcanzar un estado "realista". El estado estacionario es

alcanzado a partir de una treintena de iteraciones. La observación de la proporción de las llegadas anticipadas, a la hora y las tardías presentadas en la figura 4, permiten igualmente, constatar la estacionalidad.

En efecto, se observa que: (a) En la primera iteración, los usuarios eligen su hora de partida sin considerar que otros conductores se hallarán sobre la red y que por lo tanto, habrá congestión. Por esta razón, la mayor parte de ellos llega con retraso a su destino. (b) En las iteraciones siguientes, los usuarios anticipan mejor sus tiempos de recorrido. No obstante, existen usuarios que aún llegan demasiado pronto o tarde a su destino, lo que les implica un costo de llegada anticipada o tardía elevado (Ben-Akiva *et al.* 1996). (c) Poco a poco estos efectos se compensan y la proporción de usuarios con llegada anticipada o en retraso se estabilizan, lo que se traduce en un balanceo entre el costo de llegadas anticipadas, el costo de llegadas tardías y el costo inducido por los tiempos pasados en las filas de espera formados en la red de transporte. Una vez que el sistema llega a un régimen estacionario, las anticipaciones efectuadas por los usuarios al inicio del día, coinciden con los tiempos de recorrido efectivo. En este caso, los usuarios tenderán a repetir las elecciones del itinerario y de las horas de partida día tras día.

Figura 3: Representación del criterio STAC según la iteración

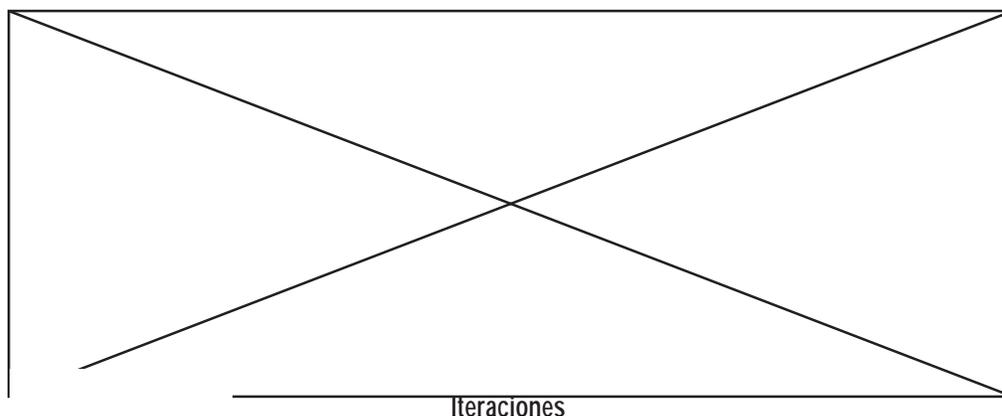
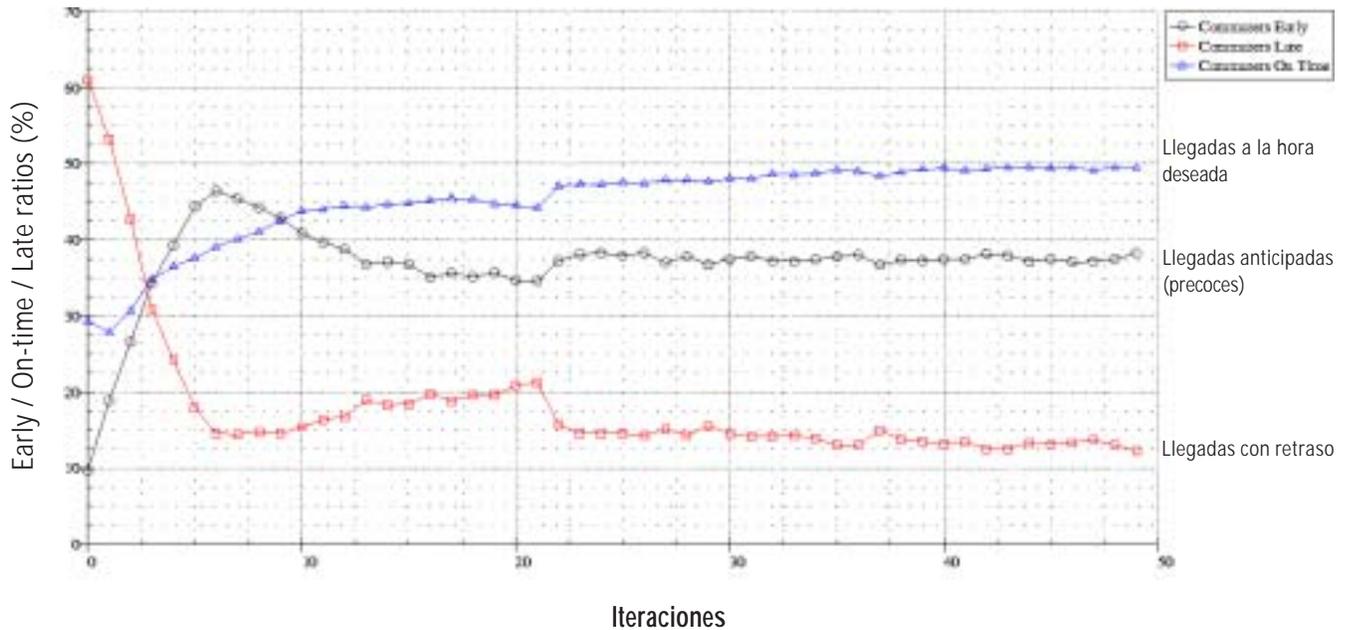


Figura 4: Proporciones de llegadas precoces, a la hora y en retraso



Arrival patterns

Los indicadores descritos permiten verificar el desempeño de la herramienta de simulación en términos de convergencia. Sin embargo, son insuficientes para analizar los resultados relativos al conjunto de la red. La sección siguiente da cuenta de algunos indicadores agregados que posteriormente fueron integrados en una batería de indicadores.

5. Evaluación de medidas flexibles con el enfoque estático y dinámico

En esta sección se desarrolla una aplicación de la herramienta de simulación descrita, haciendo énfasis en las medidas de gestión de desplazamientos y la comparación de resultados aportados por el enfoque estático y dinámico. Se introduce la componente espacial en el análisis y los resultados del enfoque dinámico son agregados con el objeto de hacerlos comparables con el

enfoque dinámico. Un análisis paramétrico de la herramienta de simulación para una serie de medidas y las dos redes prototipo empleadas puede consultarse en Sánchez, 2004.

Siguiendo el procedimiento tradicional de planeación de transportes (e.g. Ortúzar y Willumsen, 2002), se introducen las características de la oferta y la demanda (sección 4.1 y 4.2 respectivamente) y los criterios del equilibrio oferta-demanda para los enfoques estático y dinámico (sección 4.3). Posteriormente se describen los escenarios orientados hacia las medidas flexibles para la gestión de desplazamientos (sección 4.4). Finalmente se analizan los resultados obtenidos (sección 4.5) y se presentan los comentarios finales (sección 4.6).

5.1. Caracterización de la oferta

Con el objeto de representar sistemas de transporte

genéricos se construyeron dos redes prototipo que corresponden a la configuración reticular y a la circular. Los elementos de dichas redes (arcos) fueron caracterizados de manera tradicional por funciones de demora del tipo BPR (ver por ejemplo Spiess, 1990).

Zonificación

Para disponer de elementos de comparación entre las redes de transporte, los enfoques de simulación y la interpretación de los datos, se establecieron dos niveles de agregación: el tradicional representado por una centena de zonas, y un nivel superior denominado macrozonas. Estas fueron cinco, correspondiendo al centro de la ciudad, noreste, sureste, suroeste y noroeste (ver figura 5).

48

La red radial

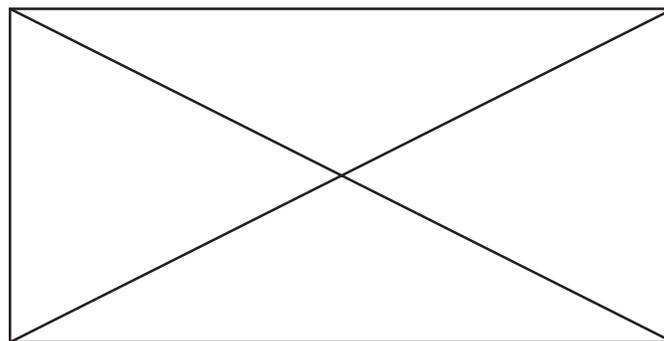
Esta configuración (ver figura 5A), representativa de las ciudades Europeas, se construyó a partir de dos ejes troncales para enseguida agregar anillos concéntricos separados a cada 500 metros; posteriormente se agregaron intersecciones viales (nodos) a medida de obtener un número análogo al de la red reticular. Así, para

un diámetro de 5 km del anillo más al exterior se obtuvieron 120 nodos, 852 arcos en una longitud de red superior a los 342 km. Cabe mencionar que la red circular es de menor dimensión en número de nodos y extensión de la red que la reticular, esto se debe a la configuración de las mismas. La longitud media de los arcos es un indicador que demuestra lo anterior (0.4 km de la red circular vs 0.42 km de la red reticular). Esta particularidad tendrá implicaciones en el momento de comparar la eficiencia de las medidas de gestión de desplazamientos.

La red reticular

Dicho prototipo (ver figura 5B), representativo de la traza de las ciudades americanas, se construyó primeramente por dos ejes troncales que dividen la ciudad en cuadrantes, posteriormente se agregaron ejes carreteros con dos sentidos de circulación, a cada 500 metros en sentido Norte-Sur y Este-Oeste, en el que cada intersección fue caracterizada por un nodo. De esta forma, para una extensión de la red de 25 km² se obtuvieron 121 nodos, 824 arcos en una longitud de red aproximadamente 354 km.

Figura 5: Redes de transporte prototipo circular (A) y reticular (B) con sus respectivas macrozonas



5.2. Caracterización de la demanda

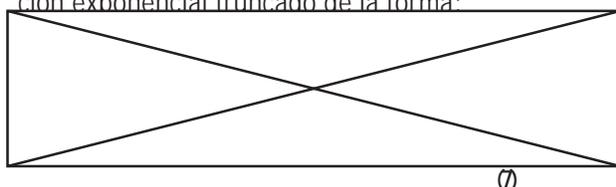
La distribución espacial de viajes se realizó considerando la existencia de un polo atractor localizado en el centro geométrico de la red (centro histórico, CBD, etcétera), dicha intensidad de atracción / emisión fue diluyéndose conforme se alcanzaba la periferia. Esta configuración es representativa de las ciudades centralizadas con relación en la calidad de los equipamientos y servicios.

Caracterización de los usuarios

Se asumió una población homogénea en cuanto a sus características socio-económicas. En el caso del modelo estático no fue necesario definir un valor de tiempo, ya que todas las evaluaciones se realizaron en términos de tiempo de recorrido. Sin embargo, debido a la naturaleza del modelo dinámico (ver sección 4.1) fue necesario definir los parámetros siguientes: valor del tiempo a = 10 MXN/hora (1 USD ~ 10 MXN), valor unitario de llegada tardía $\alpha = 25$ pesos/hora, valor unitario de llegada precoz $\beta = 8$ MXN/hora e intervalo de tiempo de llegada sin penalización $\gamma = 10$ minutos. Los valores anteriores corresponden a relaciones obtenidas empíricamente (e.g. Small, 1992; de Palma y Rochat, 1998a, 1998b; THEMA-TTR, 2003) fueron ligeramente modificadas con objeto de lograr una concentración de usuarios importante durante la hora punta. Se consideró adicionalmente una distribución uniforme de las horas deseadas de llegada. En cuanto a los motivos de desplazamiento sólo se consideraron los desplazamientos domicilio-trabajo.

Generación y distribución de viajes

Para este propósito se empleó un modelo de distribución exponencial truncado de la forma:



En la ecuación anterior, tt_{ij} : representa el tiempo de recorrido de la zona i a la zona j [minutos]; tt_p indica el tiempo de recorrido máximo a pie [minutos]; V_{ij} son los viajes realizados de la zona i a la zona j [viajes/hp]; A_j es la accesibilidad de la zona de destino j ; P_j representa la atractividad de la zona de destino j [viajes/hp], tt_{ij} es el tiempo de recorrido de la zona i a la zona j . Finalmente, m_k es indicativo de un parámetro del modelo [minutos]. La ecuación (7) permite conocer la distribución de los viajes hacia cada una de las zonas consideradas siempre y cuando el tiempo de recorrido del usuario sea superior al margen de recorrido a pie tolerable (generalmente 5 minutos). Para valorar la accesibilidad así como la atractividad, se tomaron en cuenta los servicios, equipamiento, instalaciones y zonas comerciales existentes en cada manzana. Finalmente, el parámetro m_k fue ajustado a manera de representar el tiempo máximo recorrido en vehículo para viajes urbanos. En este sentido se emplearon dos coeficientes diferentes para representar el comportamiento, tanto de los usuarios del interior de la zona de estudio (habitados a niveles de servicio alto y por lo tanto sensibles a tiempos de recorrido largo, como de los conductores residiendo al exterior (menos habituados a niveles altos de servicio y más favorables a recorrer largas distancias) de dicha zona.

Síntesis de resultados

El ajuste del modelo descrito anteriormente (cf. ecuación 6) permitió conocer la distribución del total de viajes durante la hora punta generándose, de esta manera, una matriz origen-destino de aproximadamente 8 700 elementos representativos de 151 819 viajes. El cuadro 2 da cuenta de la repartición de viajes agregados por macrozonas. Los viajes generados desde / hacia el centro de la red (CBD) fueron desagregados en dos partes siendo la más central el CBDa y alrededor de este el CBDb. Del cuadro 2 puede verificarse que más del 30% de los viajes tienen relación con el CBD

(origen o destino) mientras que el resto de las macrozonas (4) recibe/emite alrededor del 15% del total de los viajes.

Cuadro 2: Distribución espacial de viajes agregados por macrozonas

		D E S T I N O							
		MZona	CBDa	CBDb	NE	SE	SW	NW	TOTAL
		CBDa	0	2252	2812	2508	1259	2246	11077
O R I G E N									
		CBDb	3165	7636	3221	4966	3313	4946	27248
		NE	3576	6433	9750	5006	102	4014	28882
		SW	10030	9951	4996	9401	4548	439	39366
		NW	5032	6622	102	4545	9649	4087	30035
		TOTAL	3827	4136	542	204	3068	3435	15211

50

5.3. Equilibrio entre oferta y demanda

La diferencia esencial entre los enfoques de simulación estático y dinámico reside en las hipótesis de comportamiento de los usuarios. Mientras que en el modelo estático se establece que las características de movilidad individual son fijas (condiciones de circulación, origen-destino, hora de partida y periodo de desplazamiento), en el modelo dinámico se asume que el usuario hace frente en todo momento a una serie de alternativas de elección: realización del desplazamiento, hora de partida, modo de transporte, tipo de itinerario. En este sentido, la modelización de la demanda en el enfoque estático es semi-desagregada mientras que el dinámico es individual o desagregada. Como podrá verificarse más adelante el primero de los enfoques utiliza nociones casi exclusivamente físicas mientras que el segundo se basa en nociones micro-económicas.

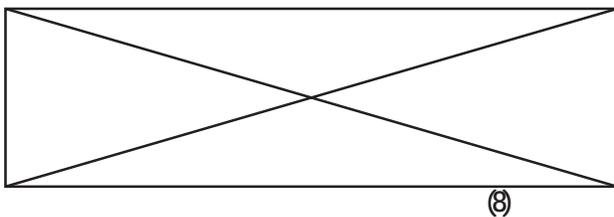
Criterio de equilibrio del enfoque estático

El principio de equilibrio de este enfoque se basa en la teoría macroscópica del tráfico y la relación fundamental (e.g. Wardrop, 1952, reformulada en Gerlough y Huber, 1975) en la que los tiempos de recorrido están ligados a la relación flujo velocidad por medio de una función de demora. Esta función es indicativa del desempeño de cada sección vial u oferta sobre base de la cual los usuarios (demanda segmentada) van definiendo su itinerario. De esta forma, el estado estacionario, o equilibrio oferta demanda, del sistema de transporte se alcanza cuando ninguno de los usuarios puede reducir sus tiempos de recorrido (primer principio de Wardrop u óptimo individual) o cuando los tiempos de recorrido son los mínimos para el conjunto de usuarios (segundo principio de Wardrop u óptimo social). Existe

una serie de variantes de los dos tipos de equilibrio mencionada así como diversos algoritmos que permiten alcanzarlos (ver Sheffi, 1985 o Miller, 1997).

Criterio de equilibrio del enfoque dinámico

El enfoque dinámico propuesto inicialmente por Vickrey (1969), se basa en un modelo de elección individual de hora de partida: los usuarios eligen entre evitar la congestión (partiendo lo suficientemente antes o después de su horario tradicional de partida) o alcanzar su destino a la hora deseada pero con un tiempo de trayecto más prolongado (tiempo transcurrido en congestión). De esta forma se tiene que, para cualquier desplazamiento, los individuos soportan un costo C (costo generalizado) que depende de la hora de partida (td), del tiempo de recorrido (tt), de la hora deseada de llegada (t^*) y de un margen de tolerancia (D) el cual supone un costo nulo, por penalización, para el usuario (cf. ecuación 8). Bajo estas premisas, se tienen tres casos en relación a la hora de llegada (ta): llegada precoz ($ta < t^*$), llegada tardía ($ta > t^*$) y llegada a la hora deseada ($ta = t^*$). Formalmente,



En las ecuaciones anteriores (a) es valor del tiempo, (\otimes) es el costo unitario asociado a la llegada precoz y (\otimes) un costo unitario inducida por una llegada tardía. Desde un punto de vista teórico (ver Vickrey, 1969) y empírico (De Palma y Marchal 1998b), los costos debido a las llegadas adelantadas o en retraso pueden llegar a representar la mitad del costo generalizado del trayecto. En este sentido, el enfoque estático no permite determinar una parte importante del costo to-

tal del trayecto (ver cuadro 4). Las implicaciones de esta subestimación son de importancia ya que esta variable es determinante en el análisis del reparto modal o en el cálculo de los beneficios inducidas por las políticas de gestión de desplazamientos (sean reversibles o irreversibles). El modelo descrito anteriormente representa la parte medular del enfoque dinámico, y se complementa por la consideración del aspecto adaptativo de los usuarios. Éste se caracteriza por una función de aprendizaje que permite llevar al sistema a un estado estacionario. En un sistema de transporte, conformado por N usuarios heterogéneos en sus preferencias de elección y en sus valores unitarios de tiempo (trayecto, llegada precoz y llegada tardía), habrá una distribución en los horarios de llegada que, aunado a la duración de cada uno de los viajes, implica que los usuarios utilicen al mismo tiempo la red de transporte ocasionando con ello problemas de congestión. En este sentido, durante los primeros días de funcionamiento del sistema, los usuarios incurrirán en costos de transporte excesivos (debido a un proceso de información incompleta sobre las condiciones de circulación). No obstante, a medida que el tiempo pasa tales costos tendrán tendencia a disminuir ya que el usuario buscará reducir dichos costos adaptando sus hábitos de desplazamiento (alternativas de elección). Finalmente, el sistema tiende a estabilizarse una vez que los usuarios minimicen sus costos generalizados de transporte (primer principio de Wardrop). Es importante mencionar que los modelos de elección (hora de partida, modo de transporte, itinerario) utilizados son del tipo discreto (e.g. Ben-Akiva y Lerman, 1985) y corresponden a la simulación de procesos estocásticos por lo que el estado estacionario del sistema se logra luego de un número importante de iteraciones (ver THEMA-TTR, 2003).

5.4. Construcción de escenarios

Dada la estructura centralizada de la distribución espacial de desplazamientos (ver cuadro 2) se espera que los mayores problemas de congestión se presenten en

la macrozona central denominada CBD. Las medidas a utilizar de gestión de desplazamientos son del tipo flexible o reversible (en los que no se requiere la construcción de nuevas infraestructuras) y buscan reducir los efectos negativos externos en el centro de la ciudad. Para evaluar los efectos de aditividad de las medidas utilizadas se consideraron alternativas en los que se agregaron adecuaciones de diferente naturaleza sobre el escenario base.

Escenario base

Representa las condiciones actuales de circulación con las características de la oferta y de la demanda descritas (ver sección 4.1 y 4.2). Con la finalidad de establecer un marco comparativo se analizó el desempeño del sistema "sin congestión" (SC) que viene a representar los tiempos de recorrido mínimos para la matriz origen-destino obtenida (sintetizada en el cuadro 2). En cierta forma, a demanda fija, cualquier política implementada no podrá obtener niveles de desempeño mejores a esta situación (ver cuadros 4, 5 y 6).

Escenario 1

Consiste en la creación de una zona peatonal al interior del primer cuadro / anillo del centro de la ciudad cerrándola a la circulación de automóviles ya que, debido a la estructura de las redes y a la presencia de los ejes troncales, por este sitio se concentra la mayor intensidad vehicular. Para compensar la pérdida de capacidad que implica la prohibición mencionada, se procedió a eliminar el estacionamiento en las calles que delimitan dicho primer cuadro / anillo restableciéndose una serie de acciones para aumentar la velocidad de circulación. Finalmente, se obtiene el aumento de un carril de circulación en cada sentido y una mejora de la velocidad de 5 km/h.

Escenario 2

Este escenario incluye medidas suplementarias de acom-

pañamiento para el escenario 1. Estas medidas varían según el tipo de la red. Para el caso de la red reticular, las vías que delimitan el primer cuadro de la ciudad fueron cambiadas en un sentido único de circulación en dirección de las manecillas del reloj, mientras que el estacionamiento en el segundo cuadro fue restringido para ganar en capacidad un carril adicional. Asimismo se realizaron mejoras para incrementar la velocidad de circulación en 5 km/h. En el caso de la red circular únicamente se mejoraron las condiciones de circulación en el segundo anillo periférico con lo que se aumentó la capacidad del anillo con otro carril y la velocidad en 5 km/h. Cabe mencionar que estas medidas resultaron de una serie de simulaciones, con ayuda del programa basado en el enfoque estático EMM2 (INRO, 1998), en las que se buscó que el tiempo de recorrido medio fuera inferior al de la situación actual en ambas redes.

Escenario 3

Se orientó hacia cambios de sentido de circulación que aportaran itinerarios alternativos a los usuarios que se dirigen hacia el centro de la ciudad. En la red reticular y con base en las modificaciones del escenario 2 se crearon dos pares viales paralelos a los ejes troncales Norte-Sur, Este-Oeste. Cada uno de los ejes unidireccionales del par vial dobló su capacidad en cuanto al número de carriles ya que no se estableció la restricción de estacionamiento. En el caso de la red circular, el primer anillo periférico fue considerado como unidireccional con lo que se obtuvo el triple de carriles disponibles para la circulación.

Escenario 4

Se incluyeron medidas para mejorar las condiciones de circulación del escenario 3. En la red reticular se disminuyeron las longitudes del par vial limitándose al segundo cuadro de la ciudad. En la red circular se hicieron cambios de dirección en las secciones viales que alimentan al periférico del primer cuadro. Se modificaron cuatro secciones pasando a ser unidireccional

con la consecuente duplicidad de los carriles de circulación.

5.5. Análisis de resultados

Debido a que los resultados arrojados por ambos enfoques de simulación sólo son comparables en términos de tiempo de recorrido, se empleó este criterio para el primer nivel de análisis. Los resultados obtenidos en cuanto a la distribución espacial de los beneficios resultantes para cada escenario son comentados de manera sucinta (para una descripción detallada ver Sánchez, 2002). El segundo nivel de análisis es exclusivo del enfoque dinámico y se refiere a las medidas de eficiencia para valorar el desempeño del sistema de transporte.

Distribución espacial de beneficios (modelo estático)

Aunque las medidas de gestión utilizadas aporten, en general, una reducción de los tiempos de recorrido para el conjunto de los usuarios es necesario determinar en qué zonas la población obtiene las mejoras de las condiciones de circulación. Utilizando el modelo estático se analizó primeramente la distribución espacial de la disminución de tiempo de recorrido para cada uno de los escenarios, y posteriormente la magnitud de los efectos fueron confrontados para las dos configuraciones de red analizadas:

En la red reticular los usuarios de las zonas externas al centro obtienen las mayores reducciones de tiempo de recorrido mientras que aquellos que llegan o salen del CBD ven incrementados sus tiempos de recorrido. Lo anterior es válido para todos los escenarios analizados.

En la red circular existe una distribución más o menos homogénea en la reducción/aumento de los tiempos de recorrido incluso para el escenario que aporta una reducción de tiempos de recorrido más importante (escenario 2) los beneficios más elevados son para los usuarios que entran / salen del centro de la ciudad (CBD).

En situación sin congestión, los tiempos de recorrido son, en general, superiores en la red reticular. Sólo en las relaciones NE-SE y NE-CBD esta situación se revierte.

La justificación de los resultados enunciados y el análisis detallado de otras condiciones de distribución es descrita en Sánchez, 2002.

Medidas de eficiencia

En el caso del enfoque dinámico, las simulaciones se realizaron con el programa METROPOLIS (De Palma y Marchal 1996) el cual produce una serie de indicadores agregados a partir de datos individuales. Debido a los alcances de este trabajo se omitirán los resultados relacionados con la distribución de costos individuales (resultado de la llegada en hora deseada, tardía o precoz). Sin embargo, se utilizarán las variables tiempo medio de recorrido, costo total medio de transporte, índice de congestión, vehículos-kilómetro medio y número de arcos medio.

Comparación de resultados

El cuadro 3 da cuenta de los tiempos de recorridos para cada tipo de red y para cada enfoque de modelación. Sobre la base de este cuadro y considerando dicho tiempo como el criterio de elección de las medidas a utilizar se tiene que:

Los enfoques de simulación no llegan forzosamente a las mismas conclusiones. Mientras que para el enfoque de estático es necesario acompañar la creación de la zona peatonal del centro de la ciudad (escenario 1) con otras medidas (escenario 2), para el enfoque dinámico dichas medidas aportan mejoras marginales (red reticular) e incluso pueden aumentar los tiempos de recorrido (red circular).

La relación entre las mejoras inducidas, en términos de tiempo de recorrido, en las redes reticular y circular son independientes del enfoque de simula-

ción cuando las actuaciones sobre la red son equivalentes. Lo anterior se verifica por la relación tiempo de recorrido medio en la red reticular contra aquella de la red circular representada en la columna "Ret/Circ" del cuadro 3 ya que para los escenarios SC, BC, 1 y 2 se tienen valores de alrededor de 1.06. Los escenarios 3 y 4 difieren completamente para cada una de las redes, por ello las actuaciones no son equivalentes.

**Cuadro 3: Comparación de resultados por enfoque de simulación.
Tomando como criterio el tiempo de recorrido medio**

ENFOQUE	ESTATICO			DINAMICO			ESTAT/DINAM	
	Circular	Reticular	Ret/Circ	Circular	Reticular	Ret/Circ	Circular	Reticular
SC	5.06	5.35	1.06	5.00	5.28	1.06	1.03	1.03
BC	8.13	8.56	1.05	6.35	6.87	1.08	1.28	1.25
1	8.50	8.90	1.05	6.72	7.02	1.05	1.27	1.27
2	8.04	8.51	1.06	6.40	6.86	1.07	1.26	1.24
3	9.04	10.21	1.13	8.80	8.28	0.94	1.03	1.23
4	9.40	10.18	1.08	6.98	7.71	1.10	1.35	1.32

54

Aditividad de efectos

En términos de tiempo de recorrido, las medidas utilizadas no siempre inducen efectos positivos, dichos efectos varían según el enfoque de modelización utilizado. El cuadro 3 permite mostrar que para el escenario 2 y según el enfoque estático, las medidas de acompañamiento vienen a mejorar las condiciones de circulación con respecto a la situación actual y a la prohibición de circulación vehicular en el CBD, por lo tanto los efectos positivos se adicionan. Lo anterior no se verifica en los escenarios 3 y 4 cuyas medidas vienen a empeorar las condiciones obtenidas en el escenario 1. En el caso del enfoque dinámico, las medidas de acompañamiento no aportan efectos benéficos ni adicionales, o si lo aportan son mejoras marginales.

Para el enfoque dinámico, los indicadores de eficiencia (IE) no siempre se dirigen en el sentido de la aditividad de efectos. En el cuadro 4 puede observarse que, a excepción de una célula, los valores de los IE son superiores a la situación actual, lo que indica que cualquier medida tomada vendrá a empeorar las condiciones de circulación. Por otra parte, los valores mínimos de los indicadores para cada red no siempre corresponden a un escenario determinado. Lo anterior justifica la necesidad de emplear un análisis multicriterio para jerarquizar las acciones de gestión de desplazamientos.

**Cuadro 4: Comparación de criterios de evaluación normalizados
a la situación actual para cada escenario y cada red de transporte (enfoque dinámico)**

Red	RETICULAR				CIRCULAR			
Esc.	Tiempo [min]	Costo [\$]	Congestión [%]	Veh-km	Tiempo [min]	Costo [\$]	Congestión [%]	Veh-km
1	1.02	1.09	1.18	1.00	1.06	1.03	1.22	0.99
2	1.00	1.07	1.23	0.98	1.01	1.00	1.13	0.98
3	1.20	1.25	1.50	1.19	1.39	1.24	2.58	1.10
4	1.12	1.18	1.12	1.17	1.10	1.06	1.05	1.09

55

Jerarquización de escenarios

Los cuadros 5 y 6 dan cuenta del análisis multicriterio aplicado para la red reticular y circular respectivamente. Para obtener la nota final de cada escenario, el valor de un *IE* determinado fue normalizado con respecto a la media de los escenarios analizados, posteriormente afectada de un peso *K*. Finalmente se sumaron todos los valores modificados de *IE*. De esta forma, la nota mínima corresponde a la mejor alternativa. Las tablas mencionadas permiten verificar que ninguno de los escenarios obtiene una nota mejor a la situación actual. En términos generales sólo el escenario 2, tanto para la red reticular como circular, presenta una evaluación cercana a la situación actual. En este sentido podría decirse que los dos enfoques de simulación coinciden en indicar que el escenario 2 es el que más "beneficios" aporta.

Cuadro 5: Jerarquización de escenarios para la red reticular (enfoque dinámico)

RETICULAR	Tiempo [min]	Costo [\$]	Congestión[%]	Veh-km	N_arcos	Multicriterio
1.6 K	5	4	3	2	1	
Media	7.00	2.58	20.74	0.41	5.99	15.0
NC	5.28	2.31	0.00	0.36	5.38	10.0
BC	6.87	2.36	20.68	0.39	5.76	14.4
1	7.02	2.57	24.35	0.39	5.79	15.4
2	6.86	2.52	25.35	0.38	5.67	15.3
3	8.28	2.94	30.99	0.46	6.73	18.4
4	7.71	2.77	23.06	0.46	6.62	16.5

Cuadro 6: Jerarquización de escenarios para la red circular (enfoque dinámico)

CIRCULAR	Tiempo [min]	Costo (\$)	Congestión [%]	Veh-km	N_arcos	Multicriterio
K	5	4	3	2	1	0
Media	6.71	2.53	24.33	0.39	6.25	15.00
NC	5.00	2.26	0.00	0.36	5.79	10.1
BC	6.35	2.42	20.92	0.38	6.11	14.1
1	6.72	2.50	25.42	0.38	6.08	15.0
2	6.40	2.43	23.74	0.37	6.10	14.4
3	8.80	2.99	53.98	0.42	6.74	21.2
4	6.98	2.57	21.90	0.42	6.69	15.2

56

Comentarios finales

Para aminorar los problemas de circulación en zonas urbanas es necesario utilizar un tratamiento integral que no sólo considere la oferta sino también la gestión de la demanda. Se ha documentado la necesidad de desarrollar análisis cuantitativos con el propósito de seleccionar el conjunto de acciones que aporte los mayores beneficios a la sociedad en su conjunto pero también que justifique técnicamente la toma de decisiones. En este sentido, se requiere dedicar un esfuerzo más importante en el desarrollo y utilización de herramientas de simulación que representen de forma más exacta los fenómenos de transporte en su componente temporal y espacial, pero sobre todo que permitan analizar de forma consistente las políticas de transporte orientadas a la gestión de desplazamientos ya que representa un área de oportunidad para el mejoramiento de las condiciones de circulación en el contexto latinoameri-

cano. En el cuerpo de este documento se describe una herramienta basada en el enfoque dinámico que posee la capacidad para modelar los efectos de las medidas orientadas a la gestión de la demanda. Su aplicación se ha ilustrado a partir de un estudio de caso basado en redes prototipo. La utilización de este tipo de herramientas en casos concretos requiere de la estimación, a partir de datos individuales, de los parámetros propios al enfoque dinámico. Éste es, quizá, uno de los retos más importantes a superar, tanto por la metodología tan específica que requiere la especificación, como los altos costos que implica la aplicación de encuestas de preferencias declaradas. No obstante, en el caso mexicano se trabaja actualmente en esta dirección (ver Sánchez y Castro, 2005) y los resultados son bastante promisorios.

En cuanto al estudio comparativo entre los enfoques de simulación estático y dinámico, los resultados obtenidos permiten mostrar que, a distribución espacial

de viajes constante, los efectos inducidos por las medidas de gestión de desplazamientos dependen de la configuración de la red, del criterio de evaluación considerado y del enfoque de simulación utilizado. En el caso del modelo estático queda claro que la prohibición de acceso vehicular al centro de la ciudad tiene que ser compensado por otras medidas de acompañamiento. En el caso del modelo dinámico lo anterior no se verifica con respecto al tipo de medidas propuestas. Sin embargo, quedan por explorar los efectos que otras medidas flexibles, como la tarificación de carburantes o la utilización de horarios flexibles de llegada puedan tener. En todo el

análisis se consideró un volumen y una distribución espacial de viajes determinados, resta por precisar si las conclusiones descritas permanecen siendo válidas para otros niveles de demanda y otro tipo de distribuciones.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con recursos del premio UDUAL de Investigación en Ciencia y Tecnología 2004. Agradecemos los comentarios y sugerencias de André De Palma, Fabrice Marchal, Omar Mekkaoui así como el apoyo de María de los Ángeles Contreras.



Bibliografía

- Algers S., E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Di Taranto, M. Dougherty, K. Fox y J.-F. Gabard (1997). "Smartest project: Review of Micro-Simulation Models". EU project No: RO-97-SC.1059, deliverable D3.
- Arnott, R., A. de Palma and R. Lindsey (1998b). "Recent Developments in the Bottleneck Model" in K. Button and E. Verhoef, eds., *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment: Issues of Efficiency and Social Feasibility*. Edward Elgar, pp. 79-110.
- Arnott, R., de Palma, A. y Lindsey, R. (1998a). "Information and Time of Usage Decisions in the Bottleneck Model with Stochastic Capacity and Demand", en *European Economic Review*.
- Beckman M. J., C.B. McGuire y C.B. Winsten (1956) *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven.
- Ben-Akiva, M. y S.R. Lerman. (1985). *Discrete Choice Analysis, Theory and Application to Travel Demand*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Ben-Akiva, M., A. de Palma y I. Kaysi (1996). "The impact of predictive info on guidance efficiency: An analytical approach", en *Advanced Methods in Transportation Analysis* 413-432.
- De Palma, A. et D. Rochat. (1998). "Understanding Individual Travel Decisions: Results From a Behavioral Survey in Geneva", Document de travail #9814, Université de Cergy-Pontoise, France.
- De Palma, A. y D. Rochat (1998a) Congestion Urbaine et Comportement des Usagers: analyse de la composante horaire. *Revue d'Economie Urbaine et Regionale* 3 467-488.
- De Palma, A. y F. Marchal (1998a). "METROPOLIS - A Dynamic Simulation Model Designed for ATIS Applications". *Proceedings of ICTTS '98*, Beijing, pp. 770-781.
- De Palma, A. y F. Marchal (1998b). "METROPOLIS: From W. Vickrey to large-scale dynamic models", presentado en la Conferencia Europea de Transportes, Loughborough, UK, 1998.
- De Palma, A. y Marchal, F. (1996). "METROPOLIS : un Outil de Simulation du Trafic Urbain". *Transports*, 378 : 304-315.
- De Palma, A. y Y. Nesterov (1997). "Congestion Laws in Dynamic Transportation Networks", working paper, CORE, Université Catholique de Louvain-la-Neuve.
- De Palma, A., F. Marchal y Y. Nesterov. (1997) METROPOLIS: A Modular System for Dynamic Traffic Simulation. *Transportation Research Record* 1607. 178-184.
- Emmerink, R. y Nijkamp, P. Editores (1999) *Behavioural and Network Impacts of Driver Information Systems*, Ashgate, Londres.
- Gerlough, D. L. y M. J. Huber (1975) *Traffic Flow Theory* : a Monograph. Reporte especial, TRB, Washington.
- INRO (1998). *EMME/2 User's Manual Software*. INRO, Montreal.
- Mekkaoui O. (2004). *Modelisation dynamique des transports publics*. Tesis doctoral. Universidad de Cergy-Pontoise. Cergy, Francia.
- Miller, H. J. (1997) *Towards Consistent Travel Demand Estimation in Transportation Planning : A Guide to Theory and Practice on Equilibrium Travel Demand Modelling*. Reporte TMIP.
- Ortúzar, J. de D. (2002) *Econometría de los modelos de elección discreta*. PUC, Santiago, Chile.
- Ortúzar, J. de D. y L. G. Willumsen (2002). *Modelling Transport*: segunda edición. Wiley, Chichester.
- Ran, B. y D. E. Boyce (1994). *Dynamic Urban Transportation Network Models: Theory and Applications for IVHS*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Sánchez, O. et al (2001). *Modelisation dynamique et gestion de déplacement en Ile de France*. En *Modelización del tráfico*. 101-116. INRETS, Arcueil. Francia.
- Sánchez, O. y J. Ortúzar (2004). *Métodos y modelos en la planeación del transporte*. UAEM, Toluca.
- Sánchez, O. (2002). *Análisis paramétrico basado en los enfoques de modelización estático y dinámico: estudio comparativo*. UAEM-CIITRA. Documento de trabajo 5/2002.
- Sánchez, O. 2004. Evaluación del impacto vial inducido por la construcción de una Terminal de autobuses en zona urbana: el caso de la Terminal Norte de Toluca. *Cuadernos de Investigación*. UAEM, Toluca.
- Sánchez, O. y Castro, A. 2005. Estimación de los parámetros de comportamiento del enfoque de planificación dinámico: el caso de la Ciudad de Toluca. *Reporte interno*. UAEM, Toluca.
- Sheffi, Y. (1985) *Urban Transportation Network*. Prentice-Hall, Englewood.
- Small, K. (1992) *Urban Transportation Economics*. Harwood, Chur.
- Spieß, F. (1990). *Conical Volume-Delay Functions*. *Transportation Science*. 153-158.
- THEMA-TTR (2003) QUATUOR : Outils dynamiques de simulation pour la gestion des déplacements dans la région parisienne. Reporte PREDIT 00MT66. Université de Cergy-Pontoise.
- Vickrey, W.S. (1969). "Congestion Theory and Transport Investment". *American Economic Review* (Papers and Proceedings) 59, 251-261.
- Wardrop, J. G. (1952) Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 2(1), 352-362.