

LA GESTION DE TRAFICO: DE LA INTUICION A LA SIMULACION

RICHARD ALLSOP *

JUAN ENRIQUE COEYMANS **

ABSTRACT

This article points out to the scarce amount of capital resources assigned to great infrastructure investment projects. This has led to an increasing utilization of Traffic management as a tool to solve urban transportation problems. This article on simulation models is directed towards non-specialists. It provides a global idea on the contributions and the limitations of such models. It also shows the alternative of utilizing socioeconomic rational criteria through models instead of mere intuitive approaches.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes preliminares

La gestión de tráfico, entendida en forma preliminar como el proceso de optimizar el uso de las vías en las ciudades, ha visto incrementada su importancia en los últimos años como consecuencia de las naturales restricciones económicas que ha sufrido la mayoría de los países del mundo. Por otra parte, el desarrollo de los sistemas de transporte urbano, orientado al empleo intensivo de vehículos privados, es decir, autos, con su secuela de inversiones cuantiosas en obras viales gigantescas que ha destruido parte del patrimonio arquitectónico, histórico y urbano de las ciudades, han hecho también converger sobre la gestión de tráfico la atención de los especialistas.

La gestión de tráfico presenta características muy especiales: en primer lugar, las inversiones necesarias para implementar esquemas son de costo muy bajo; en segundo lugar, cuando los proyectos son rentables presentan beneficios bastante grandes en términos de ahorro de tiempo de viajes, ahorros de consumo y costos de operación de los vehículos, así como de reducción de accidentes.

Como consecuencia de lo anterior, cuando hay beneficios los indicadores de rentabilidad son altísimos, en comparación a los indicadores

* Professor, Transport Studies Group, University College, London.

** Profesor Adjunto, Departamento de Ingeniería de Transporte, Pontificia Univesidad Católica de Chile.

de rentabilidad obtenidos en proyectos viales o de construcción de infraestructura.

Esta característica de bajas inversiones ha llevado a que el diseño de esquemas y proyectos de gestión de tráfico sea cada día más popular. Los países desarrollados han llevado en esto la delantera, a pesar de que disponen de mayores recursos que los países en desarrollo.

Por otra parte, los diseños de esquemas se realizaban en un comienzo sólo sobre las intuiciones del especialista, quien por su experiencia sugería qué medidas tomar y qué mejoramientos producir. Sin embargo, muchas veces estos mejoramientos intuitivos no eran necesariamente rentables desde el punto de vista social, y distaban mucho de generar los beneficios en la operación que de ellos se esperaban.

A fin de poder evaluar las consecuencias e impactos de los esquemas de gestión de tráfico, así como para diseñar con criterios, en que la intuición es complementada por la razonabilidad de criterios económico-sociales, han aparecido en el último tiempo herramientas útiles y poderosas: los modelos de simulación de tráfico, en los cuales no es necesario esperar los desastres o logros que se producen en la realidad para estimar los resultados de las medidas diseñadas.

Sobre todo, simulando el comportamiento del tráfico, el diseñador puede en forma sencilla —después de haber pagado el alto costo fijo de montar y calibrar el modelo al área de problemas— analizar diferentes cursos de acción que de otra forma sería engorroso y largo.

1.2. *Objetivos y alcances*

Los objetivos de este ensayo son tres: en primer lugar, describir y definir lo que se entiende por gestión de tráfico, para un público lector que no necesariamente es especialista en el tema.

En segundo lugar, se quiere entregar, aunque sea en forma resumida, los conceptos más importantes que están detrás de la modelación de redes de tráfico y las características más relevantes de los modelos de simulación.

En tercer lugar, se pretende dar una descripción de los modelos más usuales y al alcance del usuario de habla hispana, así como las principales líneas de desarrollo hacia el futuro.

Finalmente, se ha tratado de explicar los modelos en forma cualitativa y se ha centrado la atención sólo en los aspectos más relevantes de ellos. Para una mayor profundización se ha dejado al lector la bibliografía a que se hace referencia.

1.3. *Contenido*

De acuerdo a los objetivos del ensayo, se ha dividido éste en cinco puntos, constituyendo esta introducción el primero de ellos.

El segundo punto abarca la definición de gestión de tráfico, así como la descripción del tipo de medidas y cursos de acción que caracterizan a ésta.

Los principios generales de modelación en la simulación de tráfico configuran el punto tercero: junto a una discusión de la forma de modelar los sistemas viales en sus diferentes grados de agregación, se muestra la modelación de los desplazamientos sobre el sistema de vías, así

como la manera de traducir a características de la red las diferentes medidas de gestión de tráfico.

En el cuarto punto se describen los principales modelos disponibles y las limitaciones más importantes que poseen.

Finalmente, el quinto punto y final plantea las líneas de desarrollo y las perspectivas de este tipo de modelos, a fin de colaborar en el diseño y evaluación de esquemas de gestión de tráfico.

2. LA GESTIÓN DE TRÁFICO

2.1. *Definición*

Desde el acercamiento primitivo a la gestión de tráfico, "cómo sacar lo mejor de las calles existentes" (O.O.E., 1971), o "cómo hacer un empleo eficiente y seguro de la red de vías" (Duff, 1968), que conllevaban implícita la idea que la gestión de tránsito se circunscribe a medidas de maquillaje, puntuales y sin ninguna posibilidad de influenciar las decisiones de ruta y modo de los viajeros, se ha ido llegando a definiciones que abarcan un área más grande de problemas, y destacan y realzan un rol para la gestión de tránsito que no lo tenía en períodos anteriores.

A las definiciones de Coeymans (1976) y Hohman (1982), que muestran una visión dinámica de la gestión de tráfico, implicando el empleo de todo tipo de medidas de ingeniería de tránsito a fin de optimizar los "desplazamientos" de las personas (no de los vehículos), y sujeta dicha optimización a restricciones económicas, ambientales y sociales, se han agregado las de "gestión integral de tráfico" de la OECD (1978), "como el conjunto armónico de medidas de tránsito a fin de llegar a un compromiso entre los intereses contrapuestos entre vehículos privados, peatones, transporte público, medio ambiente y accesibilidad". Estas definiciones sacan a la gestión de tránsito de su marginalidad como herramienta, y la hacen cubrir áreas más amplias y complejas de problemas y redes. En esta última línea, Allsop (1983) genera el concepto de "area-wide Traffic Management", o gestión de tráfico extensiva, es decir, con infinitud de medidas sobre una red amplia, definiendo a lo anterior como: aplicación integral de técnicas, no ya de ingeniería de tránsito, sino de gestión y control de toda un área, a fin de influenciar el movimiento a través de ella, el acceso a ella, y el medio ambiente dentro de ella".

El crecimiento del concepto de gestión, entendida como el empleo de medidas sencillas de prohibiciones de giro aquí y allá, o permitir un cruce seguro de peatones en aquel otro lugar, hasta llegar hasta el rerroteo extensivo del tráfico, junto con el crecimiento del espectro de medidas y esquemas de control de tránsito, no ha sido por casualidad, sino el natural subproducto de la parálisis experimentada en los últimos quince años por la construcción de autopistas y grandes intersecciones intensivas en capital. La recesión mundial, con la consecuente escasez de recursos económicos (Allsop, 1980), así como un resurgimiento del conservacionismo y la revalorización del patrimonio histórico arquitectónico de las ciudades —tratando de respetar y realzar el legado de las generaciones anteriores— están en la raíz de la disminución de la ingeniería civil tradicional y del bulldozer como herramientas para solucionar los problemas de congestión, accesibilidad y medio ambiente que el transporte presenta en los centros urbanos.

Podríamos decir que la gestión de tráfico es en la actualidad el conjunto de medidas permanentes o transitorias que se emplean con el objeto de lograr una optimización de los desplazamientos de las personas, ya sea como peatones o en diferentes vehículos, y que aplicadas sobre una red amplia y extensa influyen las rutas y modos de los movimientos, tratando de respetar restricciones de calidad del ambiente, económicas y sociales.

2.2. Tipos de medidas de gestión de tráfico

Entre las medidas típicas de gestión de tráfico que abarca la definición entregada pueden citarse las siguientes, mencionadas por la OECD (1978), Allsop (1983) y Coeymans (1976):

- Apertura o cierre de calles a parte o a todo el tráfico en una o en ambas direcciones.
- Mejoramientos en el alineamiento y ancho de las calles.
- Prohibición o provisión especial de giros en las intersecciones.
- Elección del tipo de control (semáforo, prioritario, a diferentes niveles y layout de las intersecciones).
- Optimización y coordinación de semáforos.
- Señalización y demarcación, incluyendo la señalización variable.
- Prioridad para algunos medios específicos, especialmente para buses.
- Facilidades para el cruce de peatones (pelicanos y cebras).
- Suministro y control de estacionamiento; facilidades de carga y descarga.
- Fomento al empleo de la bicicleta a través de pistas exclusivas, nuevo layout de vías y facilidades de estacionamiento.
- Incentivos a medios más eficientes en el uso del espacio vial (car-pooling, taxis colectivos, motos, bicicletas), permitiendo un acceso a espacios prohibidos o el uso de pistas exclusivas para ellos.
- Rerruteo del transporte público y de los vehículos pesados.
- Apertura de pequeños tramos nuevos de calles y/o puentes, a fin de aumentar la conectividad de la red de vías.
- Facilitar la accesibilidad de todos los medios a los puntos de transbordo (estaciones, terminales de buses, terminales de carga).
- Cobrar peaje a algunos tipos de vehículos por el uso de determinadas vías.
- Reducir el ruido y la intrusión de tráfico.
- Reducir los riesgos de accidentes.
- Influnciar la localización de actividades que son especialmente dependientes de cierto tipo de accesos.

3. MODELACIÓN

3.1. Antecedentes preliminares

El comportamiento que muestra el tráfico en una red urbana es el resultado de la interacción entre dos fuerzas: los deseos que tengan las personas de desplazarse o mover bienes y por otro lado el sistema vial, incluyendo la manera en que éste es controlado o gestionado. La gestión de tráfico aplicada sobre un área afectará el comportamiento de éste, porque no son fijos ni los viajes o movimientos que se hacen, ni los medios en los que se realizan, ni las rutas que se toman. El volumen vehicular o peatonal que hay en un punto del sistema vial, desde donde vienen esos flujos y hacia donde van, depende de las personas que escogen hacer desplazamientos que pasan por ese punto.

La gestión de tránsito lo que quiere es mejorar la situación existente en el área de estudio. A fin de cuantificar hasta qué punto un esquema o proyecto de gestión de tránsito produce o lleva a un mejoramiento de la situación existente, es conveniente poder estimar la mayor cantidad posible de efectos producidos por él.

El papel de los modelos de simulación en la gestión de tránsito es "suministrar estimaciones de efectos cuantificables de los proyectos, en términos de información sobre el esquema mismo, de conocimiento acerca de la operación de diferentes componentes (intersecciones, pistas exclusivas de buses, cruces peatonales) y de hipótesis sobre cómo se comportan los viajeros al escoger sus rutas o desplazamientos" (Allsop, 1982).

Los modelos disponibles pueden ayudar de diferentes maneras en el proceso de generar soluciones —tarea en ningún caso sencilla cuando se trata de toda un área— y en optimizar aspectos del diseño de esquemas una vez que éstos se han esbozado. Sin embargo, lo que ningún modelo puede hacer es tomar la decisión final acerca de la implementación de un proyecto: lo que pueden entregar es mayor información al que toma las decisiones que la que hubiera obtenido de otra forma.

Sin embargo, la modelación en la gestión de tráfico es útil de todas maneras, por varias razones: en primer lugar, excepto en redes muy pequeñas, el rango de esquemas posibles y las interacciones entre los diferentes componentes de un proyecto son tales, que llegar a una buena solución por intentos y errores en el terreno es muy caro y poco probable que sea satisfactorio. En segundo lugar, aun para redes bastante grandes (centro de una metrópoli, por ejemplo), es posible conseguir un conocimiento más hondo sobre la operación de los componentes de la red, a pesar de las limitaciones que presentan, que el que ofrecería un conocimiento puramente intuitivo.

A un público poco familiarizado con los modelos de simulación, es importante, antes de pasar a describirlos, el entregar una breve síntesis de algunos de los aspectos más relevantes de la modelación. Eso es lo que se intentará en los puntos siguientes.

3.2. *Características generales de los modelos*

La modelación de los comportamientos sobre el sistema de calles o vías está basada en una representación matemática o al menos numérica del sistema vial y del tránsito. Es natural representar las calles como una red de nodos y enlaces, a los desplazamientos por medio de flujos sobre los enlaces, y al tiempo y otros indicadores del costo de los desplazamientos a través de costos de viaje en los enlaces.

La red de nodos y enlaces que se diseñe, junto con los parámetros asociados a ellos, tiene que ser capaz de representar en lo posible a la mayor cantidad de esquemas y/o técnicas de Gestión de tráfico que pudiera tomar en cuenta. Aún más, los flujos y los costos debieran proveer no sólo una base para modelar la elección de los usuarios sobre el sistema, sino también para describir en forma adecuada las condiciones del tráfico. Esto último es sumamente importante, ya que permite estimar parámetros que se considerarán en el proceso de evaluación.

Cada uno de los aspectos anteriores se discute a continuación.

3.3. *Representación del sistema vial*

La representación más sencilla que se puede hacer en términos de nodos y enlaces es la de una red vial con calles en uno o dos sentidos, y

en que cada cruce o intersección de vías es un nodo. A su vez, los nodos están unidos por enlaces direccionales que permiten representar las vías que los unen. Lo anterior asegura que si la ruta seguida por un vehículo a través de la red de calles se representa por una secuencia de enlaces en la red correspondiente, entonces al vehículo se le representará como si viajara solamente en la dirección permitida a lo largo de una calle. Las intersecciones y calles que las conectan, y que se muestran en la Fig. 1, se modelan en la forma sencilla descrita anteriormente, tal como se presentan en la Fig. 2(a).

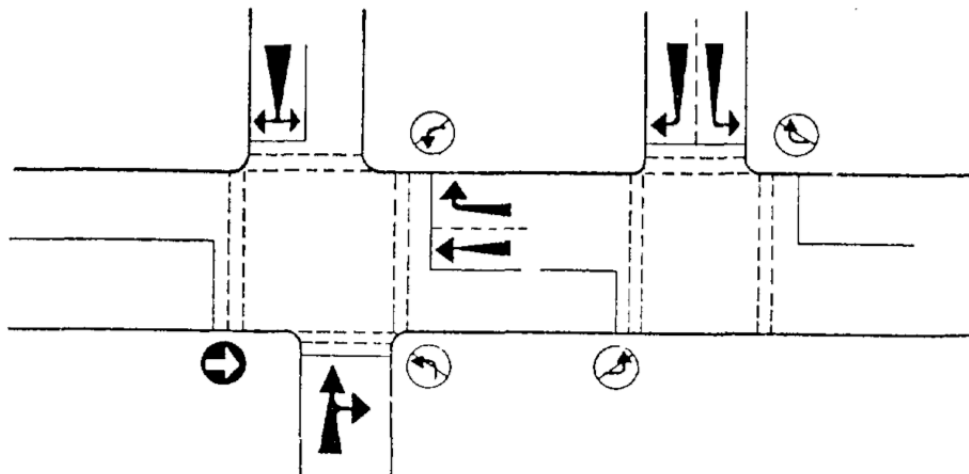


Figura 1

A menudo sucede que dos o más corrientes de tráfico que se desplazan en la misma dirección a lo largo de una calle toman tiempos claramente diferentes para atravesarla, ya sea porque forman colas separadas en alguna intersección a fin de dirigirse hacia distintas calles, o porque son vehículos que tienen distinto comportamiento (un flujo apreciable de bases con paradero es diferente de un flujo formado sólo por automóviles, aunque compartan la misma vía). En tales casos, es importante modelar el movimiento del tráfico en cada una de esas corrientes separadamente, y por lo tanto ellas se representan por enlaces separados y paralelos, tal como se muestra, por ejemplo, en la Fig. 2(b).

Un nivel de detalle como el anterior es apropiado para la modelación de redes semaforizadas, en las cuales las rutas tomadas por el tráfico a través del área de estudio se asume que son fijas, como es el caso del ampliamente usado modelo TRANSYT (Vincent et al, 1980), que se describirá más adelante.

A fin de aplicar la teoría de flujos en redes a la modelación de las elecciones de ruta de los viajeros es necesario, sin embargo, que todos los enlaces que dejan un nodo estén disponibles a todo el tráfico que entra a ese nodo. Este requerimiento no se satisface en general cuando un cruce es representado por un solo nodo, ya sea porque algunos giros están prohibidos o porque el tráfico que hace colas separadamente a fin de tomar distintas vías al salir de la intersección ha sido representado por diferentes enlaces que concurren al nodo. Debido a lo anterior se hace necesario, es bastante simple de construir, comenzando con los enlaces que los interconectan, tal como se muestra, por ejemplo, en la Fig. 2(c).

Una modelación como la anterior puede parecer complicada; sin embargo, es bastante simple de construir, comenzando con los enlaces de entrada y salida que han sido ya especificados, borrando el nodo sim-

pie que existía previamente y que representaba la intersección, y aplicando las siguientes reglas (Allsop, 1974) :

a) Considere cada enlace de entrada a un nodo, desde los cuales los vehículos puedan dejar ese cruce, hacia dos o más enlaces de salida. Haga terminar a cada uno de esos tipos de enlace de entrada en un nodo separado y llame a esos nodos, "nodos de entrada".

b) Considere cada enlace de salida de un nodo, cuyo tráfico ha sido formado por dos o más enlaces. Haga empezar esos enlaces en un nodo separado y llame a esos nodos, "nodos de salida".

c) Uno de los "nodos de entrada" con los "nodos de salida" por la cantidad suficiente de enlaces directos, a fin de representar los movimientos de tráfico que pueden realmente ocurrir en la intersección.

d) Considere cada enlace de entrada a un nodo desde los cuales los vehículos puedan dejar el cruce solamente por un solo enlace de salida. Si este enlace de salida comienza en un nodo de salida, haga terminar el enlace de entrada en ese nodo de salida. Si no es así, haga que se encuentren los dos enlaces en un nuevo nodo, que no es el punto de término de ningún otro enlace.

e) Pueden quedar algunos enlaces de salida, cada uno de los cuales lleva tráfico solamente desde un nodo de entrada, pero que no termina en ningún nodo. Haga empezar a esos enlaces de salida en el correspondiente nodo de entrada.

Estas reglas sencillas pueden aplicarse directamente a intersecciones controladas por semáforos o a intersecciones prioritarias. Una rotonda puede representarse como un conjunto de intersecciones prioritarias alrededor de una vía circular de un solo sentido.

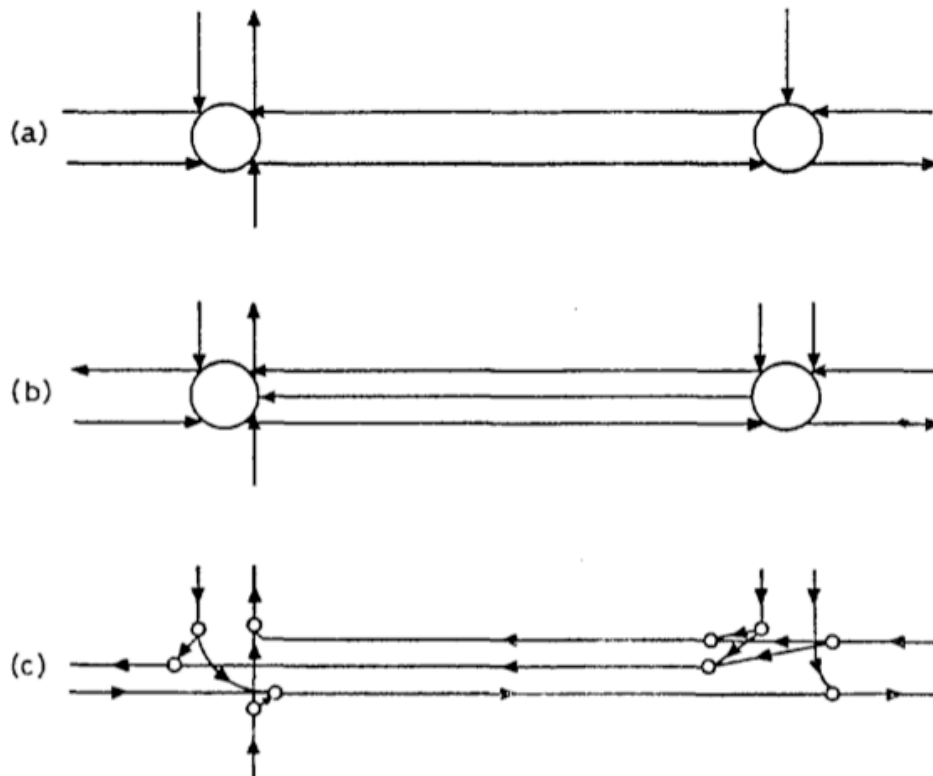


Figura 2

Enlaces y nodos adicionales se tienen que usar para representar los puntos de entrada y salida del sistema vial que está siendo modelado.

Las entradas de los atractores o generadores de tráfico, tales como edificios de estacionamiento o grandes almacenes distribuidores, pueden representarse como intersecciones, y los lugares mismos pueden modelarse como nodos unidos por enlaces a esas seudo intersecciones.

El tráfico que entra o deja una corriente en un acceso no muy importante o en lugares de estacionamiento sobre la calle, puede modelarse como si realizara la maniobra en un nodo conectado en forma apropiada a la corriente principal.

Puntos de demora a mitad de calle, tales como cruces peatonales del tipo pelicano o cebra, pueden modelarse por medio de nodos adicionales, de la misma forma como pueden representarse los puntos en los cuales el tráfico emerge o diverge en lugares que no son intersecciones.

Una descripción como la anterior se ha concentrado en los desplazamientos vehiculares, pero nodos de entrada a intersecciones, así como nodos que representan cruces peatonales, forman un conjunto de puntos en que se puede hacer provisión para los peatones a expensas de demoras a los vehículos. En principio estos puntos podrían ser enlazados para formar una red peatonal, pero los autores no conocen de ningún modelo en el cual esto haya sido hecho.

3.4. *Modelación de la forma de los desplazamientos*

Desde el punto de vista de los viajeros, la forma de desarrollarse los viajes en el sistema vial es la de realización de trayectos desde donde ellos están hasta donde desean o tienen que estar.

Por otra parte, desde el punto de vista de las condiciones locales de tráfico que encuentran los viajeros en diferentes puntos de sus rutas y de los efectos del tráfico sobre los peatones, sobre los habitantes y sobre el medio ambiente, lo que importa es a menudo simplemente los flujos de tráfico a lo largo de cada sección de calle y la realización de cada giro permitido en una intersección, independiente de su origen y destino. Estos dos aspectos de la forma de realizar los desplazamientos puede ser representada en la red de nodos y enlaces por medio de:

- a) Una matriz de movimientos cuyos elementos son el número de vehículos por unidad de tiempo que desean viajar entre cada punto de entrada a la red y cada punto de salida de ella.
- b) Un conjunto de flujos sobre los enlaces, que abarcan tanto el tráfico en términos de vehículos por unidad de tiempo, junto con el flujo de peatones por unidad de tiempo que atraviesan cada cruce peatonal.

Los flujos sobre los enlaces comprenden la misma clase de flujos y movimientos de giro tal como son usados en evaluaciones sencillas de gestión de tráfico, y su medición presenta poca dificultad. El problema más difícil es el de estimaciones de la matriz. Existen maneras de realizarla directamente, pero hay alternativas para estimarla a partir de los flujos sobre los enlaces o de estudios amplios de transporte, o de una mezcla de estos dos últimos (Willumsen, 1978, 1982).

Ambos, la matriz y los flujos, deberían cambiar con el tiempo, reflejando, por ejemplo, el crecimiento del tráfico en el periodo punta y el decrecimiento en el tráfico a medida que el periodo punta llega a su término, pero los modelos presentan diferencias en su capacidad para representar tales cambios con el tiempo.

Los modelos pueden, sin embargo, en diversos grados, trabajar con matrices y flujos separados según distintas clases de tráfico, tales como autos, buses, camiones y peatones.

Las elecciones hechas por los viajeros se representan por hipótesis acerca de las relaciones entre la matriz, los flujos y los costos de viaje percibidos a lo largo de los diferentes enlaces de la red.

El primer paso es representar el costo percibido de viajar a lo largo de cada enlace como una función de los flujos (en lo posible de los flujos en cada enlace considerado), y de las características del enlace, incluyendo parámetros cuyos valores puedan ser alterados como resultado de medidas de Gestión de Tráfico. En los diferentes modelos estas funciones se construyen ya sea numérica o analíticamente, basándose en teorías y modelos de teoría de flujos de tráfico y de teoría de filas de espera y control. Como medidas de costos percibidos se emplean las demoras o una combinación lineal de demoras y paradas. Ellos son los medios de representar la forma como los cambios producidos por medidas de Gestión de Tráfico pueden ser percibidas por los conductores en la red de nodos y enlaces.

Respecto a las elecciones de rutas a través de la red, una manera muy corriente de modelarlas es basándose en el primer principio de Wardrop (1952), que dice que "ningún conductor tomará una ruta habiendo percibido un costo mayor que el menor de los costos percibidos en las otras rutas disponibles, a la luz de las elecciones de todos los otros usuarios". Este principio requiere obviamente mayor validación que la que hasta ahora ha sido posible, y se están realizando varias investigaciones al respecto. Sin embargo se le ha usado intensamente, porque combina una dosis de razonabilidad junto con ciertas propiedades matemáticas que lo hacen muy útil en el proceso de modelación. Puede ser también fácilmente ampliado para representar la elasticidad de la demanda por viajes a través de la red vial en estudio, y así facilitar la representación del efecto de las medidas de gestión de tráfico sobre la matriz de movimientos. Los modelos, sin embargo, no emplean todavía esa capacidad, en parte, porque no está claro cuál es la elasticidad apropiada para representar sólo pedazos de viaje que realizan los viajeros.

En principio, los modelos pueden proveer, como datos para una posterior evaluación, estimaciones de cualquier cantidad que pueda expresarse en términos de la matriz, de los flujos sobre los enlaces, y de aquellos parámetros que expresan condiciones sobre la red, y que pueden ser representados por la forma de la red, los parámetros asociados con los enlaces y nodos, y las funciones de costos percibidos asociados con los arcos.

3.5. *Representación de la Gestión de Tráfico*

La representación anterior de la red vial permite la modelación de medidas de gestión de tráfico en la medida en que ellas puedan ser expresadas como cambios en los nodos y enlaces o en los parámetros asociados con ellos. Es útil, a este respecto, distinguir entre cambios continuos y discretos.

Los cambios continuos corresponden a alterar cantidades en el sistema que pueden ser tomadas como variables continuas, tales como el ancho de una vía, las dimensiones de una entrada a un cruce, el tiempo durante el cual un semáforo muestra verde, el intervalo entre los comienzos de un ciclo de semáforo en dos intersecciones cercanas, o el precio de un lugar de estacionamiento.

Los efectos que características como las anteriores producen sobre las condiciones de los desplazamientos en el sistema, pueden ser modelados tomándolos como parámetros continuamente variables de funciones que representan el costo de viaje por vehículo a lo largo de cada enlace sobre la red.

Las alteraciones del tipo cerrar una calle o hacer que una vía tenga un solo sentido de tránsito en vez de dos, la prohibición de ciertos giros a los vehículos, la asignación de una pista exclusiva para la utilización por el transporte público o la instalación de un cruce peatonal, se representan todos por cambios en la estructura de enlaces y nodos, es decir, por cambios discretos en el sistema.

Hay también otro tipo de alteraciones discretas al sistema de vías, y es la alteración de las secuencias en que diferentes corrientes de tráfico y peatones tienen derecho a vía en un semáforo. Este tipo de alteraciones es llamado de secuencia de las fases. La alteración de una secuencia no afecta la estructura de nodos y enlaces, pero, por la naturaleza discreta de este tipo de cambios, es más afín matemáticamente con una alteración en la estructura de la red que con los parámetros de funciones asociadas a los enlaces.

Sea $N = N(s)$ la red representando al sistema vial, y
 $s =$ el conjunto de secuencia de fases en las intersecciones semaforizadas.

Para cada $N(s)$ dado, sea

$p =$ el vector de todos los parámetros que representan variables continuas que describen características del sistema vial, y

$q =$ el vector de flujos de vehículos en los enlaces de la red.

Entonces, en general, el costo por vehículo de viajar por un enlace dado en la red, será una función de p y q .

De esta manera, $\underline{C}_N(p, q) =$ vector de costos por vehículo viajando por los enlaces de $N(s)$

En principio, estos costos deberían reflejar todos aquellos aspectos del desplazamiento que influyen las elecciones de los conductores en sus viajes. Sin embargo, en el contexto de la Gestión de Tránsito, normalmente * al tiempo de viaje (o una combinación ponderada de tiempo gastado en colas y tiempo consumido desplazándose libremente, más algunos factores extras que representen el número de veces parado en colas) y el costo operacional directo (litros de combustible y mantención).

3.6. *Equilibrio de los viajes*

El vector q , definido anteriormente, es suficiente para especificar los volúmenes de tráfico en diferentes partes del sistema vial. Estos volúmenes, junto con la información relativa acerca de las velocidades y de largo de colas o filas de espera que esta contenida en el vector $\underline{C}_N$, describe las condiciones de tráfico que encuentran los viajeros en sus desplazamientos

* Se emplea como medida del costo en los enlaces.

sobre la red. Normalmente habrá una cierta elección acerca de dónde entrar al sistema vial o dónde dejarlo, o ambas. El número de viajes que emplea el sistema modelado puede representarse por una matriz $\underline{t}$, donde:

$\underline{t}$ = matriz de movimientos vehiculares por unidad de tiempo entre cada punto de entrada y cada punto de salida del sistema vial.

La matriz $\underline{t}$ será diferente en las distintas horas del día, e incluso puede cambiar rápidamente durante los períodos punta. A menudo, es necesario distinguir entre los diferentes tipos de vehículos, tales como autos, buses, camiones e incluso bicicletas.

La suposición de que los costos $\underline{C}_N$ reflejan aquellos aspectos de las condiciones del tráfico que afectan las elecciones de los viajeros, sobre cuándo y dónde entrar y dejar el sistema de vías modelado, y sobre qué ruta seguir, lleva a dos conjuntos de decisiones que pueden representar para cualquier red $N(s)$ por ciertas relaciones:

$$\underline{t} = \underline{T}(\underline{C}_N(p, q)) \quad (1)$$

$$q = \underline{Q}(\underline{t}, \underline{C}_N) \quad (2)$$

donde $\underline{T}$ y $\underline{Q}$ representan no un conjunto de funciones analíticas, sino más bien un conjunto de condiciones que expresan hipótesis sobre la conducta de los viajeros.

La relación (1) es formalmente similar a la generación y a la distribución de viajes típicas de la planificación de transporte, pero difiere de ellas en varios aspectos (Allsop, 1982), mientras que la relación (2) es precisamente el problema de asignación de viajes en planificación de transporte. Estas condiciones conjuntas generan una o más soluciones $(\underline{t}, q)$, cada una explicando una forma de realizar los viajes que es consistente con las características del sistema de vías y las conductas de los usuarios. Escribiendo una solución tal como:

$$(\underline{t}, q) = (\underline{t}^*(N(s), p), q^*(N(s), p)) \quad (3)$$

se expresa la dependencia de la forma de los desplazamientos con respecto a las medidas de gestión de tráfico. Bajo hipótesis apropiadas, la solución (3) puede entenderse como un punto de equilibrio en el espacio $(\underline{t}, q)$, y la forma de realizar los viajes puede explicarse como un equilibrio entre la demanda por movimiento y la oferta suministrada por el sistema de calles.

Desgraciadamente, poco se conoce acerca de la relación (1). Si una ciudad entera o una región fueran a ser estudiadas, entonces los modelos de generación y distribución de viajes podrían usarse; pero en el contexto de gestión de tráfico ellos no son directamente aplicables, porque las matrices $\underline{t}$ representan sólo partes de algunos de los viajes realizados por los viajeros. Por esta razón, los modelos de redes para gestión de tráfico han tomado hasta ahora las matrices $\underline{t}$ como fijas, y se han circunscrito, asimismo, a modelar los rerruteos de movimientos entre los puntos de entrada y salida de la red, representándolos por la relación (2).

4. PRINCIPALES MODELOS

4.1. *Preliminares*

Existe una variedad grande de modelos. Los que se presentan a continuación son aquellos que han tenido una validación mayor, que han sido divulgados más ampliamente, y que cuentan con documentación al alcance de usuarios latinoamericanos.

Por razones de conveniencia, los modelos que se listan pueden agruparse en tres categorías, según las técnicas que han empleado para la modelación. Estos grupos son:

— Grupo que se basa en simulación microscópica: en que el desplazamiento de cada vehículo es seguido a través de la red en estudio. Es posible simular detalladamente la interacción vehículo/vía, pero a costa de recursos computacionales significativos. NETSIM y TRAFFICQ pertenecen a este grupo.

— Grupo que emplea simulación macroscópica: los vehículos son simulados en pelotones o frentes. TRANSYT/8 y SATURN pertenecen a este grupo, aunque TRANSYT es el pionero en este tipo de modelación.

— Grupo de modelos que emplean modelación analítica: los vehículos se asignan en la red de acuerdo a condiciones de tráfico expresadas en funciones de tipo flujo-demora o funciones de demora en los enlaces. CONTRAM, LATM y MICRO-ASSIGNMENT pertenecen a este grupo. Algunos autores (Luck et al., 1983) prefieren no denominar modelos de simulación a los de esta categoría y restringirlos sólo a los dos grupos anteriores.

4.2. *Descripción*

A continuación se describen los modelos en forma resumida:

a) CONTRAM, desarrollado por Leonard, Tough y Baguley (1978 y 1979) en Inglaterra, cuyas principales aplicaciones están en la simulación de redes con semáforos de tiempo fijo, rotondas e intersecciones prioritarias, así como en elección de ruta y optimización de semáforos. Permite simular estrategias de desvío, cambiando la capacidad de algunos arcos y pasando "mensajes" a los pelotones o frentes de vehículos. Toma en consideración tres tipos de vehículos: autos, buses y camiones. Realiza reasignación de flujos.

b) LATM, desarrollado por Taylor (1979) en Australia, es capaz de simular redes con intersecciones prioritarias, rotondas y semáforos de tiempo fijo. Distingue solamente entre autos y vehículos pesados. Permite, asimismo, la modelación de los desvíos y emergencias en autopistas, y simula la reasignación de flujos.

c) MICRO-ASSIGNMENT, diseñado por Brown y Scott (1970) en USA, que sólo trabaja con autos privados, y que permite modelar semáforos de tiempo fijo e intersecciones prioritarias en las redes. Cuenta con algoritmo de asignación.

d) SATURN, elaborado por Dirk Van Vliet con la cooperación de Bolland, Willumsen, Ferreira y Hall, en Inglaterra (Bolland, J. D. et al., 1977; Bolland, J. D. et al., 1, 1979; Bolland, J. D. et al., 2, 1979), distingue entre autos y buses. Simula redes grandes e intersecciones prioritarias. Cuenta con un submodelo interno para generar matrices de origen-destino

(entradas y salidas de la red) desarrollado por Willurasen (así como con un submodelo de asignación para reasignar flujos, haciendo escoger a los vehículos la mejor ruta.

e) NETSIM fue elaborado en USA por Lieberman (1981): simula redes con intersecciones prioritarias, cruces semaforizados (de tiempo fijo y activados por vehículos), pero no trae submodelo de asignación. Distingue entre autos, buses, camiones y opcionalmente peatones.

f) TRAFFICQ, desarrollado por Miles Logie en Inglaterra (Logie, D.M.W., 1977, 1979; Logie, D.M.W. y Dawson, S.A.L., 1980), capaz de simular redes con intersecciones prioritarias, semáforos de tiempo fijo y activados por vehículos, así como rotondas. No trae modelo de asignación incorporado, y las matrices de origen-destino hay que entregárselas como dato. Distingue, al igual que NETSIM, entre autos, buses, camiones y opcionalmente peatones.

g) TRANSYT/8, diseñado y perfeccionado por Denis Robertson (1969) en Inglaterra, con la colaboración principalmente de Vincent, Hunt, Kennedy y Mitchell (Robertson, D.I., y Vincent, R.A., 1975; Hunt, P.B. y Kennedy, J.V., 1980; Vincent, R.A. et al., 1980), y cuyo objetivo principal es la optimización de una red de semáforos de tiempo fijo, para lo cual emplea un modelo de simulación del comportamiento de los vehículos en pelotones, análogamente a como lo hace SATURN, que, por lo demás, se basó en el modelo de TRANSYT para estos efectos. Distingue entre autos y buses, y trae incorporado también la posibilidad de simular no sólo los cruces semaforizados, sino también las intersecciones prioritarias.

4.3. Limitaciones más importantes

De los modelos presentados en el punto anterior, los cuatro primeros tienen la posibilidad de estudiar el rerruteo de vehículos en una red, dada una matriz de origen-destino. Permiten por lo tanto estudiar el efecto de desvío vehicular que podría producir algún esquema de gestión de tránsito. Los tres últimos no tienen modelos de asignación incorporado, por lo que son útiles para aquellos casos en que el rerruteo de vehículos puede ignorarse.

SATURN, NETSIM y TRAFFICQ son los que presentan un nivel de detalle mayor para la simulación, quedando en un nivel inmediatamente inferior TRANSYT/8 y LATM.

Todos los modelos tienen submodelos de simulación, ya sean analíticos o macroscópicos, pero ninguno entrega tanto detalle a nivel microscópico como NETSIM y TRAFFICQ.

En el submodelo de asignación, sólo SATURN presentaría una convergencia y optimalidad asegurada (Luk et al., 1983). CONTRAM, LATM y MICROASSIGNMENT presentarían una convergencia observada según los mismos autores.

La mayoría de los modelos han sido validados sólo en redes reales pequeñas, y va a tomar un tiempo hasta ser aceptados universalmente como herramientas para la gestión de tráfico.

Todos, sin embargo, presentan el problema, al tratarse con redes semaforizadas, que no se tiene en absoluto seguridad de que al optimizar la red de semáforos se produzca una reasignación de flujos y que ésta a su vez requiera otra optimización, y el proceso converja. Lo que se ha hecho hasta el momento es simplemente mantener constante los repartos y desfases durante la asignación.

Respecto a las características computacionales, todos están escritos en FORTRAN IV y algunos en Assembler o CSL (Control and Simulation Lenguaje). El consumo de CPU es alto en TRAFFICQ, mediano en SATURN y relativamente bajo en los demás modelos (TRANSYT/8 sólo simulando (Luk et al., 1983).

En cuanto a la documentación, TRANSYT/8, TRAFFICQ y NETSIM tienen manual del usuario, claro y fácil de emplear, y material publicado suficiente. SATURN tiene documentación suficiente y clara, y un manual del usuario regularmente claro, comparable a LATM. Sin embargo, CONTRAM y MICROASSIGNMENT tienen muy poca documentación.

5. LÍNEAS DE DESARROLLO Y PERSPECTIVAS

La utilidad de un modelo depende mucho del tipo de red a estudiar y del o de los problemas a considerar. Cada uno de los modelos explicados tiene sus ventajas en su área, pero también limitaciones. Para un conocimiento más detallado de estas últimas, puede referirse a las descripciones de Akcelik y otros (Luk, et al., 1983) y Allsop (1980, 1982.1, 1982.2 y 1983).

Una cosa, sin embargo, es clara: no existe hasta el momento un modelo que pueda simular todas las posibles medidas que emplea la gestión de tráfico; no hay un modelo completo.

Los modelos macroscópicos que tienen algoritmos de asignación permiten estudiar los efectos de rerruteos de medidas de gestión de tráfico, pero no pueden llegar al detalle de simular el comportamiento de los vehículos en términos de cambio de pistas, bloqueo de pistas (problemas de paraderos de locomoción colectiva, por ejemplo) o aceleraciones y desaceleraciones.

Por otra parte, los modelos microscópicos, sin la posibilidad de reasignar, quedan limitados para su empleo como herramientas de gestión de tráfico.

Hacia adelante hay bastantes líneas de investigación a fin de mejorar los modelos existentes o crear síntesis nuevas que los superen. Así, los mejoramientos que podrían introducirse dentro de los actuales alcances de los modelos podrían resumirse como sigue:

- Agrandar y mejorar las evidencias empíricas acerca de las medidas de gestión de tráfico sobre la elección de ruta, para afinar la construcción de modelos teóricos.
- Desarrollar algoritmos para la asignación en redes donde los costos en algunos arcos dependen del flujo en otros.
- Profundizar la investigación sobre la unicidad y estabilidad del equilibrio en los modelos de asignación.
- Diseñar algoritmos para optimización combinada de parámetros y asignación.
- Modelación más detallada del efecto de la locomoción colectiva masiva (situación muy propia de países en desarrollo) sobre el comportamiento en los enlaces con paraderos.
- Mejorar la entrada de datos, ya que, en general, los modelos y paquetes computacionales fueron diseñados pensando en un empleo restringido a especialistas, y pecan de críticos muchas veces.

- En lo que respecta al crecimiento de los actuales alcances de los modelos, es interesante remarcar que sería muy útil:
- Incluir la modelación de elección de estacionamiento y de paradero de locomoción colectiva, y las etapas peatonales asociadas a los viajes comenzados y terminados en el área modelada.
- Modelar los movimientos y la interacción peatonal con el flujo vehicular.
- Poder modelar la ocurrencia de accidentes en términos de detalles del sistema vial y de la forma del tráfico.
- Incluir en la modelación otros efectos aparte de las demoras y consumos de combustibles, tales como externalidades ambientales y ahorros en accidentes.

Todas las limitaciones que presentan los actuales modelos, y el amplio campo que hay hacia adelante, no impide, sin embargo, considerar que la década del 80 y las décadas futuras tendrán más posibilidades de estimar los reales efectos que la gestión de tránsito, entendida como se definió en este trabajo, produce sobre el sistema vial, los usuarios y el medio ambiente. Esta mejor comprensión indudablemente producirá, por una parte, conjuntos más amplios, creativos y grandes de soluciones, al mismo tiempo que decisiones basadas menos en la intuición y más en indicadores reales y racionales.

Es así, entonces probable, que no sólo para especialistas, sino para todos los que tengan que ver con la gestión de tráfico directa o indirectamente, los modelos de simulación se hagan cada vez más asequibles, y realmente se esté pasando "de la intuición a la simulación" en esta área con tantas potencialidades.

REFERENCIAS

- ALLSOP, R. (1980). *Transport studies and the quality of life Environmental and Planning A, Vol. 12*, 339-356.
- ALLSOP, R. (1982). Introduction to Modelling the effects of area-wide traffic management. *PTRC Course Notes*, November 1982, London.
- ALLSOP, R. (1982). Network models in Traffic Management and Control. *ICTS International School of Transportation Planning*, Amalfi, 11-16, octubre, 1982.
- ALLSOP, R. (1983). Network Models in Traffic Management and Control. *Transport Reviews, Vol. 3*, N° 2, 157-182.
- BOLLAND, J. D., HALL, M. D., VAN VLIET, D. y WILLUMSEN, L. G. (1977). A model for the simulation of traffic management schemes. *Proc. PTRC Summer Annual Meeting*, University of Warwick, Vol. P152, 76-83.
- BOLLAND, J. D., HALL, M. D. y VAN VLIET, D. (1979). SATURN - a model for the evaluation of traffic management schemes. Working Paper 106, *Institute for Transport Studies*, Leeds University.
- BOLLAND, J. D., HALL, M. D., VAN VLIET, D. y WILLUMSEN, L. G. (1979). SATURN: Simulation and assignment of traffic in urban road networks. *Proc. of the International Symposium on Traffic Control Systems*. Vol. 2D, 99-115.
- BROWN, G. B. H. y SCOTT, R. S. (1970). Micro-Assignment a New Tool for Small Area Planning. *Highway Research Record* 322, 149-161.
- COEYMANS, J. E. (1976). *Traffic Management, Definition, Description and Relevance to Chile*, M. Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering. Southampton University.

- D.O.E. (1967). *Better Use of Town Riads*, H.M.S.O., London.
- DUFF, S. T. (1968). *Traffic Management. Traffic Engineering Practice*, E. and F. N. Spon Ltd., London.
- HOHMAN, C. (1982). El Proceso de Gestión de Tránsito. Secretaría Ejecutiva. *Comisión de Transporte Urbano* (versión preliminar), Santiago, Chile.
- HUNT, P. B. y KENNEDY, J. V. (1980). A guide to TRANSYT/7. TRRL Supplementary Report SR595, Crowthorne.
- LEONARD, D. R. y BAGULEY, P. C. (1978). CONTRAM: a traffic assignment model for predicting flows and queues during peak periods. *TRRL Laboratory Report*, LR841, Crowthorne.
- LEONARD, D. E. y TOUGH, J. B. (1979). Validation work on CONTRAM - a model for use in the design of traffic management schemes. Proc, *PTRC Summer Annual Meeting*, University of Warwick, Vol. P180, 135-153.
- LIEBERMAN, E. (1981). Enhanced NETSIM program. Special Report 194. *Transportation Research Board*, 32.35.
- LOGIE, D. M. W. (1977). Computer-aided design and evaluation of traffic management schemes: Programs LP-Plan and TRAFFICQ. *Traffic Engineering and Control*, Vol. 18 (7/8).
- LOGIE, D. M. W. (1979). TRAFFICQ: a comprehensive model for traffic management schemes. *Traffic Engineering and Control*. Vol. 20 (1), 516-518.
- LOGIE, D. M. W. y DAWSON, J. A. L. (1980). *TRAFFICQ-User's Manual*, Traffic Advisory Unit, Department of Transport, London.
- LUK, J. Y. R., AKCELIK, E., BOWYER, D. P. y BRINDLE, R. E. (1983). Appraisal of eight small area traffic management models. *Journal of the Australian Road Research Board*, Vol. 13 Nº 1, 2544.
- OECD (1978). *Integrated Urban Traffic Management*. OECD Publications, Paris.
- ROBERTSON, D. I. (1969). TR.A.N.S.Y.T: a traffic network study tool. TRRL Laboratory Report LR253, Crowthorne.
- ROBERTSON, D. I. y VINCENT, R. A. (1975). Bus priority in a network of fixed-time signals. TRRL Laboratory Report LR666, Crowthorne.
- TAYLOR, M. A. D. (1979). Evaluating the Performance of a Simulation Model. *Transportation Research*, Vol. 13 A (3), 159-173.
- VINCENT, R. A., MITCHELL, A. I. y ROBERTSON, D. I. (1980). User's guide to TRANSYT/8. TRRL Laboratory Report LR888, Crowthorne.
- WARDROP, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part II, 1(2), 325-362.
- WILLUMSEN, L. G. (1978). Estimation of an O-D matrix from traffic counts: a review. Working Paper 99, *Institute of Transport Studies*, Leeds University,
- WILLUMSEN, L. G. (1982). Estimation of trip matrices from volume counts: Validation of a model under congested conditions. 10-th *PTRC Summer Annual Meeting*, University of Warwick, 12-15 july, 1982.

