

MODELACIÓN DE DEMANDA PARA CARRETERAS DE CUOTA

$$P_c = \frac{e^{\lambda \text{Costogen} \cdot c}}{\sum_k e^{\lambda \text{Costogen} \cdot k}}$$

**Manual de modelación
2006**

MODELACIÓN
DE DEMANDA
PARA CARRETERAS
DE CUOTA

**Manual de modelación
2006**

Este documento fue preparado
para la Secretaría de Comunicaciones
y Transportes por las firmas
Steer Davies Gleave y Transconsult
en cooperación con la Dirección General
de Desarrollo Carretero.

Septiembre de 2006

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
General	9
Organización del Manual	10
2. CARACTERIZACIÓN DE CARRETERAS DE CUOTA	11
Introducción	11
Carreteras interurbanas	11
Libramientos	11
Puentes internacionales y túneles	12
Autopistas urbanas/suburbanas	12
Proyectos simples	13
Proyectos de redes	15
3. REQUERIMIENTOS A LA MODELACIÓN DE TRÁFICO Y RECAUDACIÓN	19
Requerimientos de la banca internacional	19
Descripción del proyecto y el área de influencia	21
Observación de la demanda actual	22
Segmentación de la demanda	22
Estimación de valores subjetivos del tiempo	23
Calibración y validación de modelos	24
Presentación de procesos y resultados	24
Incertidumbre y riesgo	24
Tasas de captura y transición	25
Crecimiento y análisis de sensibilidad	25
Base de datos y transparencia	26
4. IMPACTOS POSIBLES DE UNA NUEVA CARRETERA DE CUOTA	27
Corto y largo plazo	27
Cambio de ruta entre O y D	27
Cambio de modo de transporte entre O y D	28
Cambio en la hora de viajes	28
Tráfico inducido	28
Cambio de destino (D) aprovechando accesibilidad	29
Generación pura de viajes (frecuencia)	29
Cambio en el tamaño del grupo que viaja	29
Cambios en el uso del suelo adyacente a la carretera	30
5. ESTRATEGIA DE MODELACIÓN	31
Introducción	31
Modelación basada en lo fundamental	31

Seleccionar los modelos apropiados	32
Períodos de modelación y horizontes	33
Información actualizada y estadísticamente confiable	33
Calibración y validación	34
Crecimiento y escenarios	34
Tratamiento de la incertidumbre	35
6. REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN	37
Descripción del área de influencia de la carretera	37
Información censal y socioeconómica	38
Zonificación	40
Redes de Análisis	43
Funciones de costo de operación	46
Funciones de costo generalizado	47
Tiempos de recorrido	48
Encuestas Origen Destino	59
Aforos vehiculares	67
7. ESTIMACIÓN DEL VALOR SUBJETIVO DEL TIEMPO	75
Concepto de VST	75
Preferencias Reveladas	78
Preferencias Declaradas	78
VST para carga	81
Distribución de VST's	83
Proyecciones de VST en el tiempo	84
Consideraciones de la práctica internacional	85
8. MODELOS LOGIT DE ELECCIÓN	87
Naturaleza de los modelos	87
9. MODELOS DE ASIGNACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	93
Introducción	93
Principios de asignación determinística y estocástica	93
Modelos de asignación estocásticos	94
Asignación de equilibrio del usuario	95
Asignación con diferentes clases de usuarios	96
Calibración de modelos de asignación	97
Validación de modelos de asignación	100
10. MODELOS DE ELECCIÓN DE MODO Y DESTINO	101
Modelos conjuntos de elección: frecuencia, destino y modo de viaje	101
Modelos de generación o frecuencia de viajes	102
Modelos agregados de distribución de viajes	104
Modelos desagregados de elección de destino	105

11. TRÁFICO INDUCIDO	109
Existencia e importancia del tráfico inducido	109
Métodos de estimación	109
12. MODELOS DE CRECIMIENTO Y TRANSICIÓN	113
Modelos de crecimiento simples basados en series históricas	113
Modelos basados en otros factores	113
Uso combinado de modelos de crecimiento	114
Períodos de transición y maduración, y su modelación	114
13. DESARROLLO DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN FUTURA	117
Uso de escenarios en estimaciones de demanda	117
Preparación del escenario esperado	118
Preparación de escenario pesimista y optimista	118
Modelación	119
14. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	121
Presentación segmentada de resultados	121
Presentación de tablas de tráfico	122
Presentación de gráficos de demanda	123
Condiciones con y sin proyecto	123
Tasas de captura	123
15. RECAUDACIÓN Y ANUALIZACIÓN	125
Anualización de resultados	125
Conversión de tráfico en recaudación bruta (con IVA) y neta	127
Pérdidas de ingresos	128
Otros ajustes	128
16. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGO	131
Análisis mínimos de sensibilidad	131
Sensibilidad a la tarifa (cuota), tarifa de ingreso máximo	131
Sensibilidad al crecimiento (PIB, población, etc.)	131
Sensibilidad al VST y otros parámetros de modelación (ej. factor de escala)	132
Sensibilidad a proyectos alternativos y complementarios	132
Identificación de riesgos y mitigación	132
17. RECONOCIMIENTOS	133
Anexo A	135
El modelo Logia: Aspectos Técnico	

FIGURAS

2.1	Ejemplo de Carretera Interurbana de Cuota	13
2.2	Estimación de la Tasa de captura de una autopista Interurbana de cuota	14
2.3	Ejemplo de Proyecto de Cuota en Área Urbana, Sydney	15
2.4	Modelo de Redes para Proyecto de Cuota en Área Urbana	16
2.5	Modelo De Redes: Análisis de los viajes atraídos por un nuevo puente en un área urbana	16
2.6	Modelo De Redes: Análisis de los viajes atraídos por una nueva Autopista de Cuota en Un Área Urbana	17
5.1	Modelos basados en lo fundamental	32
6.1	Curva Velocidad (V) vs. Flujo (F)	45
6.2	Tiempos de recorrido y demoras por el método de vehículo de prueba. Formato de campo	51
6.3	Tiempos de recorrido y demoras por el método de vehículo de prueba. Procesamiento.	55
6.4	Tiempos de recorrido por el método de placas. Formato de campo.	57
6.5	Número de estaciones de aforo usadas entre 1989-2004	69
6.6	Formato para realizar un estudio de aforos manuales	72
8.1	Función de densidad Gumbel para $\beta = 1$ y $\eta = -0.577$	88
8.2	Estructura general de modelo Logit de dos niveles	89
9.1	Comparación de volúmenes observados y modelados	99
10.1	Modelo jerárquico de elecciones de viaje	102
11.1	Tiempos de Viaje entre un Punto situado al norte del Río y el resto de la ciudad, antes de la construcción de un nuevo puente	110
11.2	Tiempos de Viaje entre un Punto situado al norte del Río y el resto de la ciudad, Después de la construcción de un nuevo puente	111
14.1	Presentación segmentada de la demanda por una carretera de cuota	122
14.2	Tráfico capturado (en rojo) y de donde proviene (en azul)	123
15.1	Perfil de TRÁFICO horario de una vía Urbana en Día Laboral	126
15.2	Datos de Tráfico diarios durante un año	126

TABLAS

6.1	Tamaño de la muestra necesario para estudios de tiempo de recorrido con un nivel de confianza de 95%	50
6.2	Valores de z para varios niveles de confianza	57
6.3	Tamaño muestral típico para encuestas OD	64
6.4	Contenido de los listados de información de las publicaciones de Datos Viales	69
11.1	Ejemplos de Redistribución de Viajes	112
15.1	Factores de Anualización – Autopista de Cuota Urbana	127

1. INTRODUCCIÓN

GENERAL

En México, los proyectos de infraestructura carretera considerados dentro del nuevo esquema de concesiones de autopistas de cuota no cuentan en la actualidad con el sustento teórico y técnico necesario para generar la certidumbre exigida por las entidades (crediticias, calificadoras y gubernamentales) relacionadas, de manera directa o indirecta, con el financiamiento de su implementación.

A lo largo de la experiencia de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a través de la Dirección General de Desarrollo Carretero (DGDC) dentro del nuevo esquema de concesiones, se han detectado distintas áreas susceptibles de mejora en los estudios de oferta y demanda de transporte que pueden conducir hacia estudios más robustos y mejor sustentados.

Las entidades encargadas de la planeación en México, han realizado grandes esfuerzos por implementar las mejores prácticas en cuanto a metodologías y técnicas en el campo de planeación de transporte. Sin embargo, no se ha logrado obtener los resultados confiables esperados de los estudios de oferta y demanda de transporte realizados en México.

Para revertir esta situación, la SCT a través de la DGDC determinó realizar un estudio para construir e implementar una metodología de planeación de transporte que integre el mejor estado de la práctica en cuanto a técnicas y métodos para la planeación del transporte, que permita mejorar sustancialmente la realización de estudios de tránsito referentes a la concesión de nuevas carreteras en México, y con ello lograr la calidad, sustento y certidumbre necesarios para los estudios de oferta y demanda de transporte generados por esta Dirección General.

El presente documento ha sido elaborado sobre la base del producto final de dicho estudio que la SCT comisionó para definir las mejores prácticas que deben aplicarse en los estudios de pronóstico de tránsito para los proyectos del nuevo esquema de concesiones de autopistas de cuota en México.

El objeto de este manual es recomendar las metodologías más apropiadas para los estudios de infraestructura carretera concesionada de cuota reduciendo la incertidumbre en las proyecciones de tránsito y aplicando las mejores prácticas en materia de planeación.

La metodología propuesta tiene, por tanto, los siguientes objetivos:

- Incrementar la certidumbre de los pronósticos de mercado ante las entidades financieras relacionadas con la asignación de recursos a los nuevos proyectos de concesionamiento de autopistas de cuota.

- Identificar, mitigar y redistribuir de mejor manera los riesgos asociados a la concesión de autopistas de cuota, como resultado de un proceso de pronósticos de alta calidad.
- Apoyar el diseño de concesiones de infraestructura carretera de cuota que resulte en mayores beneficios para sus usuarios y a un menor costo para los gobiernos Federal y Estatal.
- Estandarizar criterios y conocimientos entre los profesionales mexicanos que realizan estudios de esta naturaleza.

El desarrollo de esta metodología se benefició de un número de entrevistas con personal del Gobierno, profesionales de empresas consultoras, de la banca nacional e internacional y de calificadoras de riesgo. La perspectiva del estudio es claramente la del Gobierno con un interés en otorgar concesiones de carreteras de cuota eficientes al Sector Privado, a mínimo costo para el Sector Público y que al mismo tiempo ofrezcan los mayores beneficios a los usuarios.

ORGANIZACIÓN DEL MANUAL

El Manual está organizado como sigue. El Capítulo 2 contiene una caracterización de las carreteras de cuota que deberán estudiarse en el futuro. Esta caracterización permite identificar aquellas condiciones que requieren de una aproximación diferente en las tareas de modelación. El Capítulo 3 destaca algunos requerimientos de la modelación moderna para satisfacer las necesidades de entidades de Gobierno, posibles concesionarios, la banca internacional y evaluadores de riesgo. El Capítulo 4 discute las posibles respuestas conductuales de los usuarios cuando se construye una carretera de cuota y cómo esto permite seleccionar el tipo de modelos que reflejen esos impactos. El Capítulo 5 muestra la estrategia propuesta de modelación que permite enfrentar los requerimientos identificados en forma efectiva y eficiente. El Capítulo 6 discute los requerimientos de información y los estándares de confiabilidad estadística que deberían utilizarse. El Capítulo 7 presenta un tema fundamental y al mismo tiempo difícil: la estimación del valor subjetivo del tiempo como indicador de disponibilidad a pagar.

Los siguientes capítulos se concentran en las técnicas de calibración de modelos y la presentación de resultados e informes. Así, el Capítulo 8 discute los métodos de calibración y sus estándares para los modelos Logit de elección de ruta y potencialmente modo y destino. El Capítulo 9 presenta las técnicas de modelación de asignación con múltiples usuarios y su calibración/validación. El Capítulo 10 presenta modelos de elección de modo y destino mientras que el Capítulo 11 discute el tráfico inducido. El Capítulo 12 presenta los modelos de crecimiento de la demanda y las curvas de transición (ramp-up). El Capítulo 13 discute el desarrollo de escenarios de condiciones futuras. El Capítulo 14 argumenta cómo presentar resultados mientras que el Capítulo 15 trata la conversión de tráfico en recaudación y por ende la anualización de resultados. El Capítulo 16 discute el análisis de sensibilidad y riesgo. Finalmente en Anexo se muestran aspectos más técnicos de la modelación Logit para quienes deseen profundizar el tema.

2. CARACTERIZACIÓN DE CARRETERAS DE CUOTA

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se distinguen los diferentes tipos de carreteras de cuota y como sus características afectan al tipo de modelación que se requiere en cada caso.

Por un lado, se consideran aquí cuatro tipos de carreteras o infraestructura donde puede cobrarse cuota. Cabe señalar que en todos estos casos se consideró el cobro de cuotas reales, no “peajes sombra” o proyectos de prestación de servicios (PPS). Los cuatro tipos de infraestructura tarifada pueden ser clasificados en:

- Carreteras interurbanas
- Libramientos
- Puentes internacionales y túneles
- Autopistas urbanas y suburbanas

CARRETERAS INTERURBANAS

Este es el tipo más común de carretera de cuota en México y en la mayor parte de los países del mundo. Se caracterizan por:

- Tramos relativamente largos
- Sin muchas limitaciones de espacio para instalar plazas de peaje
- Con alternativas, a veces libres y otras veces de cuota
- El número de alternativas depende de la geografía y del desarrollo de la región
- Diseños con número limitado de accesos para evitar evasión y permitir cobro a (casi) todos los usuarios
- Uso optativo de peaje electrónico de baja velocidad (con barrera)
- A menudo parte de una red mayor, de importancia para el transporte de carga y el desarrollo regional
- • La congestión rara vez es significativa en la elección de rutas; más importantes pueden ser las velocidades y características de diseño, una o dos calzadas, uso de cruces a diferente nivel evitando semáforos, etc.

LIBRAMIENTOS

En este caso se trata de una carretera que permite evitar pasar por el centro de un área urbana. En los casos más simples se puede tratar de un libramiento que conecte dos accesos a la ciudad y por ello genera dos alternativas de ruta: por el área urbana o por el libramiento.

En ciudades mayores y cuando el libramiento cubre más de dos accesos, se producirán varias alternativas de ruta para distintos pares origen-destino (O-D). En este caso el proceso de modelación es más complejo.

En ciudades mayores los libramientos también pueden ser usados por viajes locales, al menos en horas pico, para evitar la congestión en el centro.

PUNTES INTERNACIONALES Y TÚNELES

Este es un caso especial de inversión en infraestructura que conecta dos puntos que previamente sólo se vinculaban por una ruta más larga y menos conveniente. Otros casos pueden ser puentes en estuarios (por ejemplo en el Río de la Plata, Argentina), túneles que cruzan una cadena montañosa o megaproyectos como el puente del estrecho de Messina en Italia.

Se caracterizan por el hecho de que sí bien cuentan con alternativas, estas son generalmente bastante peores que la nueva infraestructura.

Rara vez la congestión juega un papel importante en la elección de ruta, excepto en el caso de obras internacionales, en que la eficiencia de las operaciones de Aduana e Inmigración puede tener un rol importante en la selección de la ruta a seguir.

Son generalmente parte de un sistema de rutas más amplio, pero generalmente pueden modelarse como sistemas simples con pocas alternativas.

Los costos de las expropiaciones pueden variar significativamente dependiendo de la localización de esta infraestructura. En ciudades fronterizas pueden ser bastante altos.

AUTOPISTAS URBANAS/SUBURBANAS

En los últimos 10 años ha aumentado el número de concesiones de carreteras urbanas y suburbanas de cuota tanto en México como en países como los EE.UU., Canadá, Australia, Brasil, Chile y varios países del sudeste asiático.

En estos casos la nueva carretera viene a resolver un problema de acceso y de congestión, que es más grave en horas pico. Los ahorros de tiempo deben ser significativos para que la carretera sea atractiva.

Los costos del terreno (expropiaciones) son generalmente muy altos y por lo tanto es difícil destinar espacio a plazas de peaje. La tendencia actual es establecer sistemas de recolección de cuota electrónica de flujo libre, sin barreras ni demoras.

El número de alternativas, libres o con cuota, es elevado, así como lo son los pares O-D relevantes.

Por otro lado, la categorización anterior se clasifica a su vez en proyectos simples y complejos de acuerdo con la configuración del subsistema en que el proyecto estará inmerso y sus requerimientos de modelación.

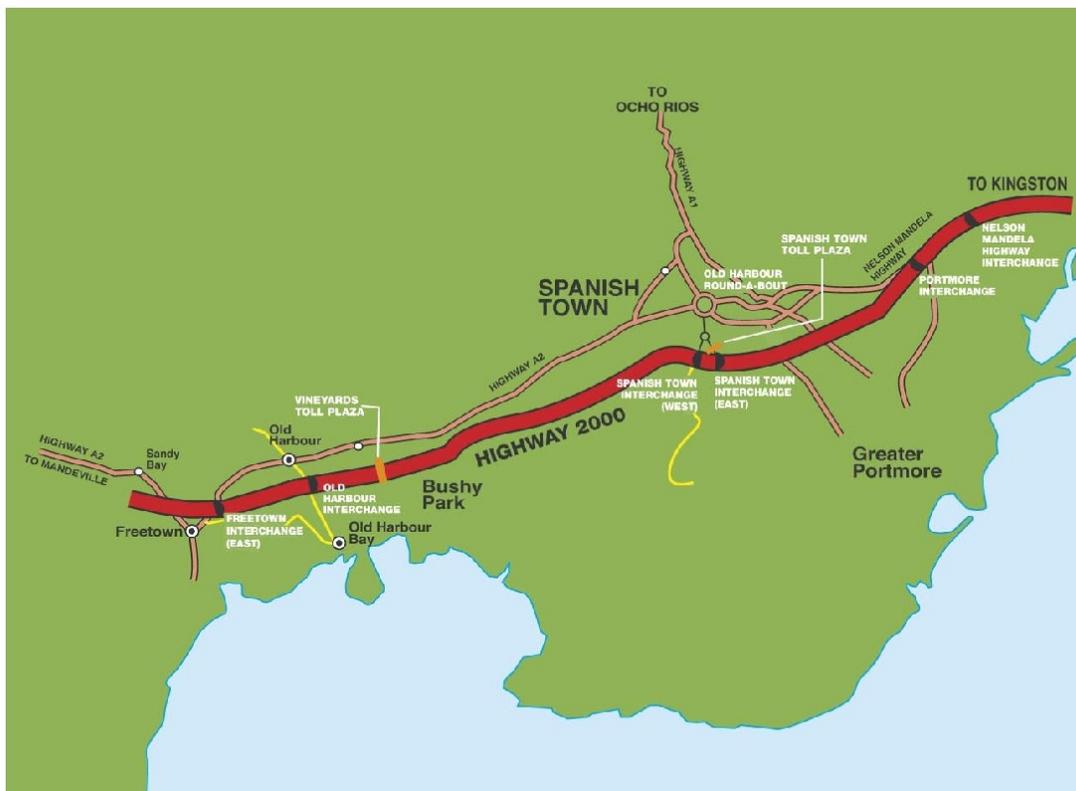
PROYECTOS SIMPLES

En este caso es posible identificar sólo unas pocas rutas alternativas y pares O-D de relevancia y por ende es posible aplicar modelos de elección entre alternativas discretas y aplicarlos en hojas de cálculo. El modelo que se utiliza más frecuentemente en estos casos es el de captura tipo 'logit', que entrega la proporción de viajeros que utilizaría una alternativa determinada.

Algunas carreteras interurbanas (con sólo una alternativa), así como puentes o túneles en áreas poco pobladas, también se pueden catalogar como proyectos simples. Algunas características de este tipo de proyectos son:

- Existencia de número limitado de alternativas (ruta existente y alternativa de cuota);
- Posibilidad de agrupar a los usuarios potenciales de la nueva alternativa de cuota en un número limitado de zonas.
- No existen serios problemas de congestión.

FIGURA 2.1
Ejemplo de carretera interurbana de cuota



En los modelos tipo 'logit' se suele aplicar una función exponencial para calcular la 'captura' de tránsito con base en la diferencia de costos generalizados de viajes (incluyendo tiempo, costo de operación y el pago de cuota) entre la ruta existente y la nueva alternativa de cuota.

La fórmula utilizada para evaluar la selección de ruta con diferentes cuotas toma la forma siguiente:

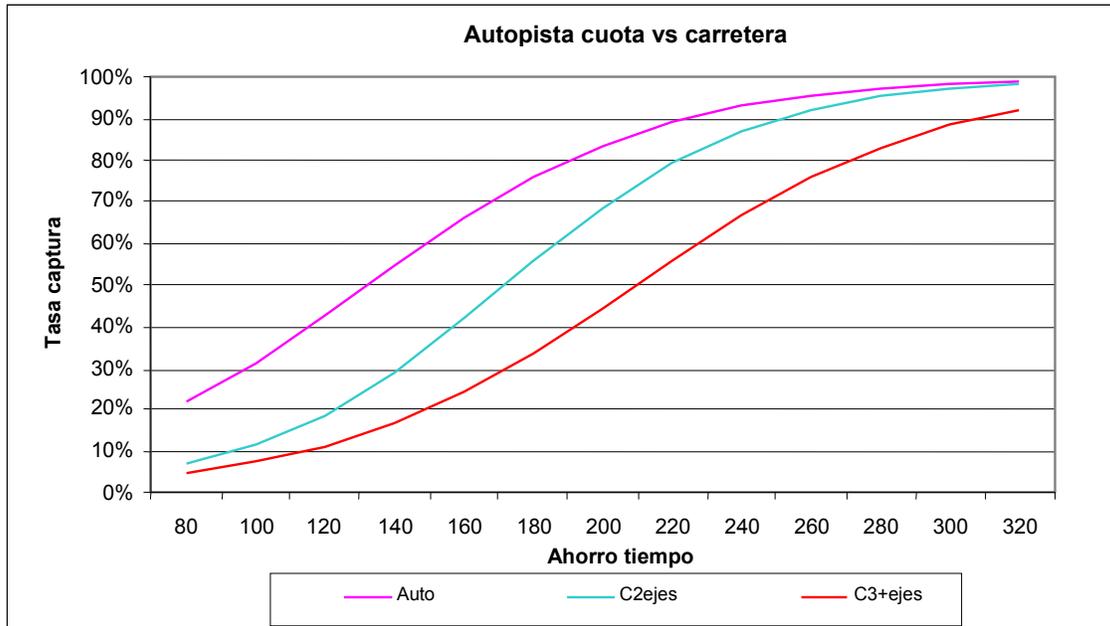
$$P_c = \frac{e^{\lambda \text{Costogen}_c}}{\sum_k e^{\lambda \text{Costogen}_k}}$$

donde Costogen_k es el costo generalizado de viajar por la alternativa k (cuando $k=c$ es la carretera de cuota) y λ es un parámetro que debe ser estimado. P_c es la proporción de viajeros que escoge la alternativa c (cuota).

Esta función se utiliza para estimar el tráfico que sería captado por la alternativa de cuota o la ruta libre de pago, en función de la diferencia en el costo generalizado del viaje (incluyendo el peaje) entre una u otra ruta. Si el costo generalizado es el mismo, el tráfico se asigna 50/50. Los modelos 'logit' se representan con una curva en forma de "S" como la que se muestra en la Figura 2.2. En este caso los valores del eje Y representan las tasas de captura obtenidas

para una autopista interurbana de cuota en función de las ventajas de usarla versus la ruta libre de pago.

FIGURA 2.2
Estimación de la tasa de captura de una autopista interurbana de cuota



PROYECTOS DE REDES

Para estimar tráficos de proyectos de cuota localizados en áreas urbanas o en la periferia de áreas urbanas, así como en carreteras interurbanas, congestionadas o no (en particular aquellos casos en que se requiere considerar muchas alternativas, pares O-D y otras interacciones de tráfico), generalmente se necesita la aplicación de un modelo de transporte.

En estos casos, además de la alternativa de cuota existen múltiples rutas alternativas. La ruta óptima puede variar dependiendo de las condiciones de tráfico.

Además de la existencia de múltiples rutas, la introducción de una autopista de cuota o un puente/túnel en un área urbana con una red compleja, es capaz de modificar los patrones de viajes de varias zonas de la ciudad, teniendo un impacto en gran parte de la red dentro del ámbito de estudio.

Por ejemplo en la Figura 2.3 se muestra un esquema de un proyecto de libramiento en un área urbana. Para hacer las proyecciones del tráfico atraído fue necesario construir un modelo de redes en Emme/2 (Figura 2.4). La red es tan compleja, que sería imposible modelar todas las posibles rutas alternativas mediante una hoja de cálculo.

FIGURA 2.3
Ejemplo de proyecto de cuota en área urbana, Sydney

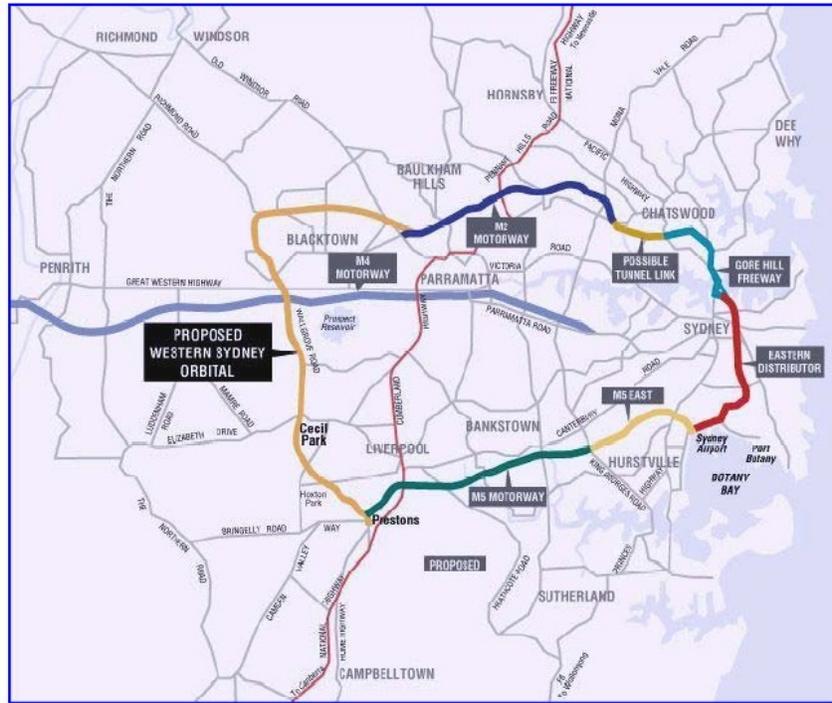
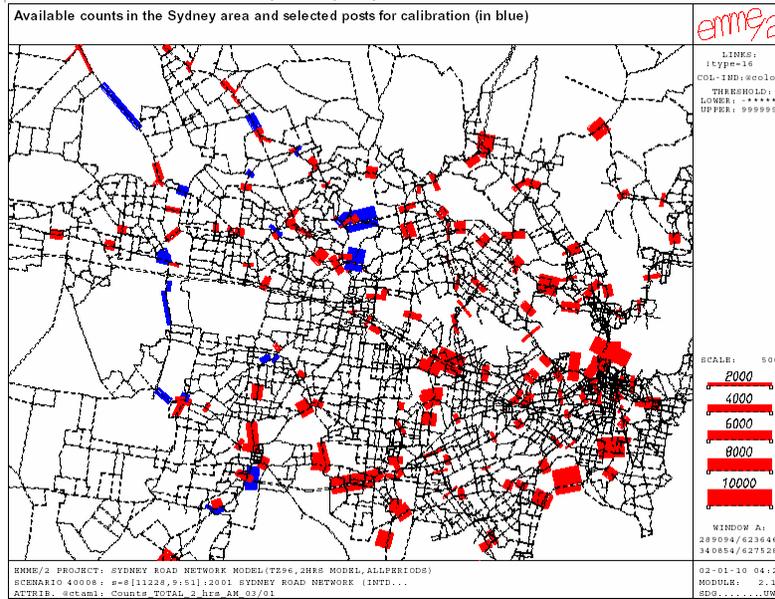


FIGURA 2.4
Modelo de redes para proyecto de cuota en área urbana



La Figura 2.5 muestra un gráfico generado usando un modelo de redes, que ilustra los viajes que serían captados por un nuevo puente de cuota en un área urbana. Se puede observar que el proyecto tiene un impacto que va más allá de su entorno inmediato. La representación de estos flujos en un modelo en hoja de cálculo es prácticamente imposible. En la Figura 2.6 se muestra algo similar, pero en este caso el modelo de redes se construyó para estimar la demanda de viajes de una autopista de cuota.

FIGURA 2.5
Modelo de redes: análisis de los viajes atraídos por un nuevo puente en un área urbana

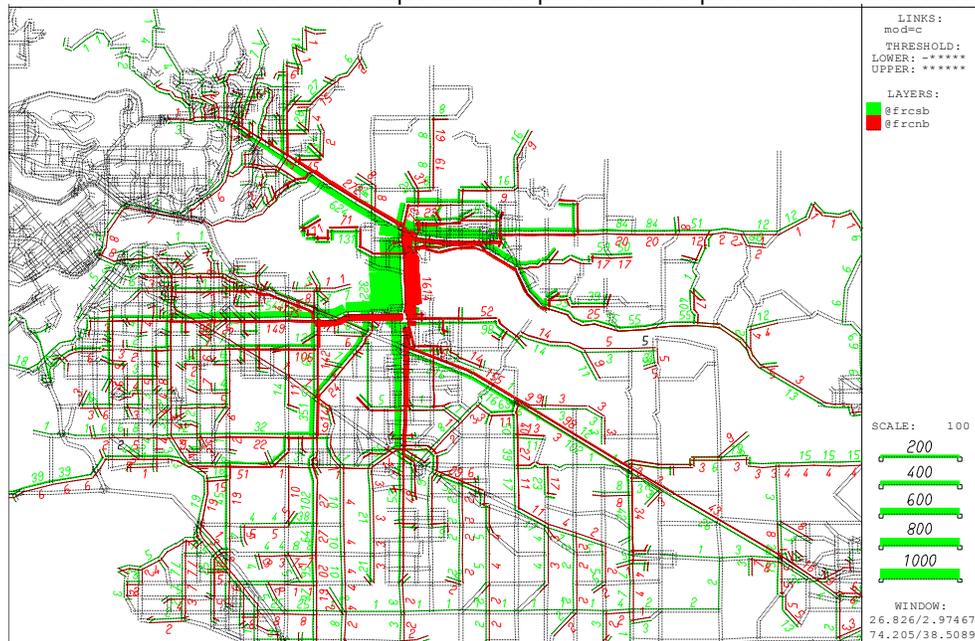
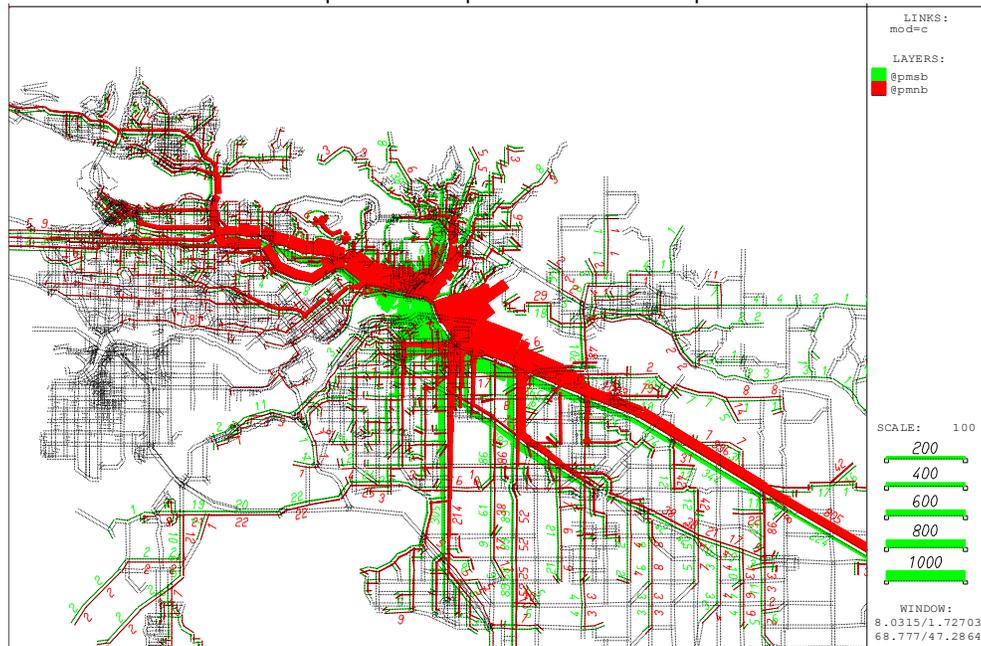


FIGURA 2.6

Modelo de redes: análisis de los viajes atraídos por una nueva autopista de cuota en un área urbana



En los casos de redes complejas, se requiere la aplicación de programas especializados disponibles en el mercado como Emme/2, TransCAD, CUBE/Trips y SATURN. Para el sistema de autopistas de cuota urbanas de Santiago, Chile, se utilizó el paquete ESTR AUS, de alto nivel técnico, con ese objetivo. En todo caso, el programa (software) que se elija debe ser capaz de simular cómo los conductores realizan la elección de ruta teniendo en cuenta la congestión. Modelos simples tipo 'todo o nada', o de elección 'logit', no son idóneos para modelar el tráfico en áreas urbanas con redes complejas.

Mediante la utilización de cualquiera de estos programas, los viajes son cargados a la red de transporte, usualmente a través de algún método de equilibrio que utiliza el tiempo de viaje, congestión y costos (de operación y cuotas), con la premisa de que los individuos pueden reducir sus costos mediante una adecuada selección de rutas.

3. REQUERIMIENTOS A LA MODELACIÓN DE TRÁFICO Y RECAUDACIÓN

REQUERIMIENTOS DE LA BANCA INTERNACIONAL

Si bien los estudios de tránsito y recaudación que se discuten en este informe están destinados a satisfacer necesidades de Gobierno, es muy importante mantener la perspectiva de la Banca Internacional en todo momento. En buena parte de las carreteras de cuota se requerirá, o será ventajoso, contar con la posibilidad de financiamiento internacional. Aún en los casos dónde esto pudiera no ser necesario, el realizar estudios que respondan a los requerimientos de los organismos financieros internacionales les da un mayor rigor y confiabilidad.

Se han realizado diversas investigaciones sobre la calidad de los estudios de carreteras de cuota o peaje. Uno de los primeros fue realizado por el banco J P Morgan. A éstas, le han seguido investigaciones realizadas por calificadoras de riesgo como Standard & Poors, Fitch y Moody's. Nos referimos a estos como representantes de los intereses de este tipo de organismos.

La investigación de J P Morgan¹ cubrió 14 estudios realizados antes de inaugurar carreteras de cuota en los EE.UU. y comparó sus proyecciones con los tráficos y recaudaciones realmente observadas en la práctica, una vez que estaban operando. JP Morgan encontró que en dos casos el tráfico había sido subestimado entre el 10 y el 30%; en cuatro casos los estudios originales habían sobre-estimado el tráfico en forma "moderada" a juicio del banco, es decir entre 12 y 25%, y en los otros ocho casos las sobre-estimaciones habían sido muy altas, entre el 45 y el 75%.

A juicio del banco J P Morgan, las debilidades más importantes relacionadas con la sobre-estimación del tráfico en estos estudios habían sido:

- Una pobre representación y modelación de las alternativas, libres o no;
- Tasas de crecimiento excesivamente optimistas, en particular porque se basaban en la esperanza de que se produjeran nuevos desarrollos inmobiliarios en el área de influencia de la carretera;
- Un análisis muy pobre, a veces incluso inexistente, de la disponibilidad a pagar peajes/cuota para tener un mejor servicio.

La calificadora de riesgo Fitch, presentó su opinión sobre este tipo de estudios en un informe en el año 2003². En éste se encontraron problemas similares con los estudios de tráfico y recaudación y se recomendó mejorarlos mediante:

¹ J.P. Morgan (1997) Examining Toll Road Feasibility Studies. Municipal Finance Journal, Vol 18, No 1, Spring 1997.

² Fitch (2003) Bliss, Heartburn, and Toll Road Forecasts. Project Finance Special Report, Fitch Ratings, Noviembre 2003.

- Metodologías de modelación más apropiadas, adaptando modelos utilizados en zonas urbanas para que representen adecuadamente a las carreteras de cuota manteniendo un mayor rigor.
- Considerar desde un principio la existencia de varios escenarios posibles a futuro y, que es deseable analizar cómo diferentes supuestos afectan estos resultados.
- Estudiar, muy seria y detalladamente, la disponibilidad a pagar peaje (valor subjetivo del tiempo) para dar mayor confianza en los resultados.
- Efectuar un análisis más acucioso de los períodos de transición.
- Llevar a cabo un análisis más detallado del tráfico de camiones de carga.
- Realizar un proceso más riguroso de calibración y validación de los modelos de tráfico.
- Incorporar auditorías (peer reviews) de otros consultores para mejorar la calidad.

La calificadora de riesgo Standard and Poor's (S&P) ha publicado los resultados de varias investigaciones sobre la confiabilidad de los estudios de tránsito y recaudación para carreteras de cuota. En el primero de ellos, publicado en 2002 ³, hizo uso de una base de datos propia sobre 32 carreteras de cuota, los estudios de tránsito que sustentaron su financiamiento y los volúmenes que efectivamente se observaron desde su inicio. La gran mayoría de estos estudios (28), sobre-estimó el tráfico futuro de las carreteras de cuota, mientras que sólo cuatro subestimaron la demanda futura.

Para cada uno de estos casos, S&P calculó un Índice de Efectividad de las Proyecciones (IEP), el cual está dado por la razón entre el tráfico efectivamente observado y la proyección correspondiente. Así, un IEP igual a 0.75 indica que el tráfico real fue sólo un 75% del proyectado.

La media de este índice para las 32 carreteras analizadas fue 0.73 con una gran dispersión; es decir, algunos estudios subestimaron la demanda mientras que otros la sobre-estimaron con un gran margen. S&P destaca el hecho de que las proyecciones de tráfico realizadas para entidades financieras (principalmente bancos) tendían a sobre-estimar el tráfico menos que aquellas realizadas para gobiernos o concesionarios (IEP de 0.82 para bancos y 0.66 para otros).

Esto no es una sorpresa. Las proyecciones realizadas para entidades financieras tienden a utilizar escenarios menos optimistas (posiblemente más realistas) y a ignorar potenciales ganancias futuras que pueden ser de interés para concesionarios e inversionistas.

S&P reconoce que este tipo de proyecciones es inherentemente incierta y que depende a menudo de importantes factores externos, en particular el crecimiento de la economía nacional o regional.

³ Standard & Poor's (2002) Credit Implications of Traffic Risk in Start-Up Toll Facilities. Infrastructure Finance, Ratings Direct, Agosto 2002.

S&P ha actualizado recientemente esta investigación, primero en el 2004⁴ y nuevamente en el 2005⁵. En lo fundamental estas actualizaciones confirman los resultados de la investigación original, pero con una muestra mayor de 104 carreteras de cuota.

Finalmente Moody's, otra calificadora de riesgo, preparó un comentario documentado⁶ en que discute el valor que otorga a los estudios de tránsito preparados por consultores. En este comentario se reconoce que los estudios de tránsito tienen distintas características dependiendo de la perspectiva de quien los comisiona. Si se trata de entidades financieras o inversionistas de capital, las perspectivas de riesgo son diferentes. A las primeras les interesa recibir los pagos de interés y principal a tiempo y en su totalidad; por ello, utilizarán escenarios más bien pesimistas para ponerse a cubierto de un deterioro de la economía.

A los inversionistas les interesa además la posibilidad de contar con ingresos futuros mayores (y menores) que los proyectados por el escenario esperado. Por ello, el empleo de un rango de escenarios diferentes es necesario en estos casos.

Todas las investigaciones mencionadas enfatizan el valor de estudios de tránsito y recaudación transparentes, y que utilicen metodologías de buen nivel técnico. Las diez características ideales de un buen estudio de tránsito y recaudación se presentan en los puntos siguientes.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y EL ÁREA DE INFLUENCIA

Un buen estudio de tránsito debe contener una clara descripción del proyecto, sus características físicas y de circulación, y una comparación con las carreteras alternativas (libres o no). Si la carretera propuesta crea condiciones de competencia con otros modos de transporte, por ejemplo si elimina un "cuello de botella" que hacía poco atractivos a los viajes largos en auto, entonces este aspecto debe discutirse también.

Asimismo, un buen estudio de tránsito debe describir la economía de la región y el área de influencia de la carretera propuesta. La distribución de la población y de las actividades económicas juega un papel importante en estructurar la demanda por carreteras de alto nivel de servicio.

Particular atención debe prestarse al rol que los transportes cumplen en esa economía regional; si existen proyectos pendientes que puedan afectar la demanda futura por la carretera, como una nueva planta de agroindustria, deben identificarse y también debe analizarse su importancia y probable fecha de apertura.

⁴ Standard & Poor's (2004) Traffic Forecasting Risk: Study Update 2004. Infrastructure Finance, Ratings Direct, Octubre 2004.

⁵ Standard & Poor's (2005) Traffic Forecasting Risk Study Update 2005: Through Ramp-Up and Beyond. Corporates. Agosto 2005.

⁶ Moody's (2002) Moody's View of Consultants' Reports in Project Finance. Moody's Investor Services, Special Comment. Diciembre 2002.

Es deseable mostrar estas características sobre mapas regionales, en lo posible basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esto permite visualizar la relación entre la población, la actividad económica y las redes de transporte, actuales y futuras, de manera más clara.

OBSERVACIÓN DE LA DEMANDA ACTUAL

Las entidades financieras y calificadoras de riesgo tienen un sano escepticismo frente a una modelación excesivamente compleja de la demanda de viajes. Prefieren constatar que el estudio de tránsito destinó suficientes recursos para hacer observaciones directas de la demanda actual en el corredor o área de interés. Como un mínimo se requiere que se hayan hecho suficientes observaciones O-D, aforos vehiculares y mediciones de tiempos de viaje por la red actual.

Estas mediciones deben ser hechas utilizando buenas técnicas de muestreo y una correcta expansión de las observaciones. Es decir, se deben emplear buenos principios estadísticos para elegir las muestras y buenos conocimientos de la región para escoger puntos de encuestas O-D, aforos y observaciones de tiempos de viaje. Al menos en las encuestas O-D, se debe procurar identificar distintos segmentos de la demanda como se discute más adelante. También es importante señalar si la muestra es representativa de un día promedio, o si hay variaciones estacionales, semanales, etc. que deban tomarse en cuenta.

No es suficiente que los estudios indiquen dónde y cuándo se hicieron las encuestas. Es necesario también mostrar las tasas de muestreo, el plan de gestión de la calidad de las observaciones, los mecanismos de expansión y qué técnicas se utilizaron para eliminar o corregir por doble-observación (por ejemplo, observar el mismo viaje en dos puntos distintos). Finalmente, los datos básicos de demanda deben presentarse en forma transparente para que otros usuarios de los estudios puedan calificar su calidad y representatividad.

SEGMENTACIÓN DE LA DEMANDA

Es importante reconocer que no todos los usuarios de sistemas de carreteras tienen las mismas características. En particular, no todos los usuarios tienen la misma disponibilidad a pagar peajes para acceder a una carretera de mayor calidad y que ofrezca ahorros de tiempo.

La segmentación de la demanda es entonces fundamental. Se debe destinar un esfuerzo serio a discutir cual debe ser la segmentación o agrupación de la demanda más apropiada en cada caso. En general se distinguirán los siguientes segmentos: usuarios de automóvil particular, camiones de carga y transporte público de pasajeros, con subgrupos dentro de cada uno de ellos.

En el caso de los automóviles, la experiencia ha demostrado que hay toda una distribución de la disponibilidad a pagar peajes para obtener un mejor servicio. Estas variaciones se deben a distintos propósitos de viaje, tamaño del grupo que viaja, y, por sobre todo, al nivel de ingreso de quien toma las decisiones.

La mayor parte de los estudios realizados según estándares internacionales utiliza entre 5 y 10 segmentos de usuarios de automóvil particular, cada uno con una distinta disponibilidad a pagar. A menudo uno de estos segmentos incluye aquellos cuyos costos de operación y cuota los cubre la empresa para quien trabajan. Por cierto, estos usuarios tienen una alta disposición al pago.

En el caso de los vehículos de carga es deseable, en principio al menos, segmentar la demanda de acuerdo con la estructura de tarifas existente. Es decir, si hay cuatro niveles de cuota para camiones de carga se pueden establecer cuatro categorías de usuarios. Sin embargo, hay dos aspectos que condicionan esta elección. El primero, es que alguna categoría de tarifa puede resultar con muy pocos usuarios; en este caso puede agruparse con otra categoría de camión y hacer las correcciones a los ingresos fuera del modelo de demanda. El segundo aspecto es que la disponibilidad a pagar cuota para beneficiarse de una mejor carretera varía también con el tipo de empresa que opera el camión. Empresas pequeñas, propietario-chofer, tienen generalmente una menor disponibilidad a pagar que las empresas mayores. Esto se debe a que las grandes empresas conocen mejor sus costos y por ende los beneficios de utilizar una carretera con un mejor estándar de calidad. Los transportistas por cuenta propia normalmente conocen también sus costos y pueden agruparse con las grandes empresas.

Generalmente, los autobuses de largo itinerario caen en dos categorías. La primera comprende a las empresas que ofrecen servicios directos o expresos, que tienden a usar la nueva carretera si les ofrece ahorros de tiempo. El segundo grupo comprende las empresas que ofrecen servicios locales o paradores. En este caso, sólo utilizarán la nueva carretera cuando les permita llegar a todos estos destinos intermedios y ahorrar tiempo.

ESTIMACIÓN DE VALORES SUBJETIVOS DEL TIEMPO

La disponibilidad a pagar por acceder a una mejor carretera se representa normalmente a través de un parámetro que permite convertir ahorros de tiempo en dinero (o viceversa) para comparar con las cuotas. Este parámetro se denomina Valor Subjetivo del Tiempo (VST), se mide generalmente en unidades monetarias por hora (\$/hr) y depende de varias condiciones:

En primer lugar, el VST y la disponibilidad a pagar están relacionados con el ingreso del conductor, si éste sufraga sus gastos, o con la política del empleador si la empresa cubre los costos de operación del vehículo. En el caso del transporte de carga, la disposición al pago depende del tipo de empresa, de la carga transportada y del tipo de contrato (justo a tiempo o normal) de transporte. Ciertos productos peligrosos sólo pueden transitar por la alternativa más segura, casi siempre una carretera de cuota.

En segundo lugar, el VST depende también de la “calidad” del tiempo en cuestión. Así, el tiempo que se gasta en condiciones difíciles o poco gratas se percibe como más oneroso que

el empleado en mejores condiciones. Es más importante ahorrar un minuto de viaje incómodo que un minuto cómodo.

Es por ello que para la misma persona el VST de viajar en una buena carretera es menor que el VST de viajar en una carretera de montaña, o de una sola calzada, o con mal pavimento, o con interrupciones de tráfico por semáforos y rotondas.

Un buen estudio de tránsito y recaudación utilizará una técnica apropiada para estimar estos valores subjetivos del tiempo, por ejemplo, Preferencias Reveladas y Declaradas. Además comparará estos valores con otros encontrados en otros países y condiciones para dar mayor confianza en los resultados.

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS

La tarea de calibración de un modelo de asignación y pronóstico de tránsito, consiste en encontrar los mejores valores para sus parámetros críticos a fin de asegurar que represente la realidad lo más exactamente posible. Existen estándares de calibración que deben aplicarse en estos casos y los resultados deben presentarse en forma clara y transparente.

Las tareas de validación merecen también atención, ya que contribuyen a dar más confianza en los resultados de la modelación. Durante la validación se comparan los resultados del modelo con datos que no han sido utilizados en su calibración.

Las tareas de calibración y validación de un modelo deben estar bien documentadas en el informe del consultor para dar mayor confianza en sus proyecciones.

PRESENTACIÓN DE PROCESOS Y RESULTADOS

El desarrollo, calibración, validación y uso de un modelo en proyecciones de tránsito, es una tarea compleja, con muchos elementos y fases. Es importante que el informe del consultor contenga una buena descripción de los procesos efectivamente empleados en cada estudio particular para mejorar la comprensión de las tareas abordadas.

De la misma forma, es importante también destinar suficiente tiempo y recursos a mostrar los resultados en forma de tablas y gráficos de fácil comprensión, y que demuestran un esfuerzo positivo de comunicación de los resultados.

El uso de formatos apropiados en tablas y gráficos, la eliminación de falsas precisiones, y el uso consistente del color y mapas en los gráficos tienen un alto valor práctico y nada de superfluo.

INCERTIDUMBRE Y RIESGO

Los estudios de proyecciones de tránsito y recaudación sufren necesariamente de incertidumbre y riesgo. Es altamente deseable que la modelación y los informes que de ella emanan, consideren estos aspectos en forma integral y desde un principio.

Hay diversas formas de abordar los problemas de incertidumbre y riesgo, desde el análisis de sensibilidad hasta el tratamiento específico de riesgo mediante simulación del tipo Monte Carlo. Cada una debe utilizarse cuando sea apropiado y su tratamiento no debe ser ignorado, ni siquiera en los estudios preliminares para el Gobierno.

TASAS DE CAPTURA Y TRANSICIÓN

Cada carretera tiene un período de transición que dura desde la apertura de la misma hasta que el tráfico se estabiliza luego que los conductores han aprendido a apreciar los costos y beneficios de utilizarla. Cabe señalar que los modelos de demanda precisamente tratan de estimar este tráfico estabilizado y no necesariamente el período de transición o aprendizaje.

Este período de aprendizaje (ramp-up en inglés) depende de las características de la carretera, de su entorno y de los usuarios potenciales de la misma. Su estimación es importante ya que afecta los ingresos en los primeros meses (o años) de operación.

La tasa de captura de una carretera es el porcentaje del tráfico potencial que efectivamente será atraído por la nueva vialidad. Es importante estimar esta tasa de captura y mostrarla en los resultados como una forma de aumentar la transparencia del modelo y permitir comparaciones con otras situaciones similares.

CRECIMIENTO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Uno de los factores más críticos en la estimación de tránsito y recaudación futura es la tasa de crecimiento de la demanda potencial. A menudo esta tasa depende de factores como el aumento de la población, empleo, motorización (vehículos por habitante) y en general el crecimiento de la economía.

El desarrollo de buenos modelos de crecimiento de la demanda potencial es esencial para mejorar la calidad de los estudios de tránsito. Estos generalmente dependen de las proyecciones del crecimiento de la economía, lo que es un arte incierto.

Dada la incertidumbre inherente al crecimiento futuro de la economía, es normal desarrollar dos o tres “escenarios de crecimiento” y hacer diferentes proyecciones para cada uno de ellos. De esta forma se sensibilizan las proyecciones al crecimiento de Producto Interno Bruto u otro indicador similar.

Es importante también hacer un análisis de sensibilidad de los resultados del modelo por dos razones. Primero, para dar confianza que éste se comporta razonablemente, y responde como podría esperarse a cambios en sus parámetros y entradas de datos. Segundo, para permitir

analizar mejor los aspectos de riesgo e incertidumbre; por ejemplo, cómo cambian los tránsitos y recaudaciones si el VST es mayor o menor a lo estimado, si las tarifas son superiores o inferiores a lo supuesto, etc.

BASE DE DATOS Y TRANSPARENCIA

Por último, las entidades financieras esperan que la documentación de los estudios sea clara y transparente, es decir, que contenga explícitamente los supuestos adoptados, los procesos empleados en la recolección de información, desarrollo y calibración de modelos y en la producción de proyecciones de tránsito e ingreso.

Se espera también que habiendo hecho un esfuerzo importante para recolectar información, esta no se pierda y pueda ser utilizada por otros. De esta manera se reducirán los costos de preparar y presentar ofertas, lo que redundará en beneficios para el Gobierno y los usuarios, además de los posibles concesionarios. Por cierto, esto no obsta para que los que preparen ofertas para una concesión quieran recolectar alguna información adicional y posiblemente actualizar, por ejemplo, los aforos de tránsito.

Es deseable, por ello, preparar una base de datos que contenga toda la información sobre el proyecto y el estudio, incluyendo los datos de entrada del modelo mismo.

4. IMPACTOS POSIBLES DE UNA NUEVA CARRETERA DE CUOTA

CORTO Y LARGO PLAZO

La entrada en servicio de una nueva carretera de cuota puede alterar los patrones de comportamiento de los viajeros de diversas maneras, al ofrecer un mejor servicio a un cierto precio. Algunos impactos de una nueva carretera o puente/túnel pueden ser más o menos inmediatos, mientras que otros se producen en el largo plazo.

La mejora o construcción de una nueva carretera (o puente/túnel) debiera conducir a una disminución del costo generalizado de viaje, principalmente debido a ahorros de tiempo. Los viajeros pueden aprovechar las ventajas que ofrece la nueva infraestructura, cambiando de ruta (re-asignación), la hora en que se viaja, el modo de transporte, viajando más frecuentemente, o cambiando el lugar de residencia o trabajo (redistribución). También los usos del suelo pueden cambiar como consecuencia de cambios en los niveles de accesibilidad. Se sabe que las respuestas individuales a cambios en la accesibilidad se desarrollan en distintos plazos de tiempo.

Los cambios en los patrones de viaje a corto plazo, son los siguientes:

- Cambio de ruta entre un determinado par O-D
- Cambio de modo de transporte entre un origen y un destino
- Cambio en la hora de viaje
- Cambios en el destino del viaje (por ejemplo: donde se va de compras, paseo, etc.)

Los otros efectos, catalogados como de largo plazo, requieren de cambios más fundamentales tales como cambiar de lugar de residencia o trabajo, realización de nuevos desarrollos inmobiliarios, etc. Estos tomarán más tiempo en materializarse y por ende en contribuir tránsito y recaudación adicional al proyecto.

CAMBIO DE RUTA ENTRE O Y D

Este es el efecto de reasignación. El tráfico reasignado se refiere exclusivamente a usuarios que alteran su ruta (es decir, todavía viajan a la misma hora y por el mismo modo).

Aunque tal vez este es el efecto más evidente y fácil de modelar (bien sea en hoja de cálculo para proyectos simples o usando modelos de redes), la magnitud del tránsito reasignado puede ser determinante en la valoración financiera del proyecto.

De hecho, esta respuesta conductual, el cambio de ruta, es la más importante en la mayor parte de las carreteras de cuota en el mundo. Se trata de un efecto dominante que resulta la fuente de más del 90% de la recaudación en la mayoría de los casos, al menos en el corto plazo.

CAMBIO DE MODO DE TRANSPORTE ENTRE O Y D

El análisis de proyectos de cuota en varios países desarrollados sugeriría que este efecto es poco significativo y por tanto no se justificaría su modelación. La situación puede ser algo diferente en países emergentes, en que muchas personas utilizan transporte público habitualmente y al crecer el ingreso podría haber una tendencia a adquirir y usar automóvil. Este cambio se deberá más a efecto ingreso que a la existencia o no de una carretera de cuota. Por otro lado, un buen sistema de transporte alternativo al automóvil, podría implicar un aumento de la demanda inferior al que habría de no existir tal alternativa, al menos en el caso urbano.

No obstante, en general se consideran como usuarios potenciales de una carretera de cuota a aquellos individuos que ya tomaron la decisión de utilizar el automóvil. El argumento es que resulta poco probable que individuos que anteriormente escogieron como alternativa el transporte público, generalmente más barato, decidan utilizar el auto, aún en el caso de disponer de uno.

Por otro lado, en áreas urbanas donde el transporte público suele constituir una alternativa efectiva en comparación con usar las vías congestionadas, es posible que algunos individuos que disponen de vehículo se decidan a usar la nueva vía de cuota; sin embargo, se suele aceptar que en términos de la generación de ingresos, el impacto es poco significativo.

CAMBIO EN LA HORA DE VIAJES

Este efecto puede darse en áreas urbanas congestionadas, donde posiblemente algunos individuos se hayan visto obligados a viajar más tarde o más temprano para evitar la congestión. No obstante, desde el punto de vista de los ingresos de la concesión el impacto es muy reducido, porque el aumento en ciertos períodos se compensa con una disminución de los viajes en otros períodos del día y, en consecuencia, el impacto en términos de ingresos es prácticamente nulo.

Sin embargo, la aplicación de distintos valores de peaje para períodos pico y fuera de pico para el caso de algunas autopistas urbanas, sí puede tener un efecto en la elección de la hora de viajar (por ejemplo: los peajes urbanos diferenciados por hora del día en Santiago de Chile y la tarificación por congestión en Londres y otras ciudades).

En estos casos, es posible que además de ser necesario modelar la captación de vehículos en distintos períodos del día, sea necesario aplicar algún tipo de modelo de demanda elástica para estimar los viajes generados por 'cambios en la hora de viaje'.

TRÁFICO INDUCIDO

Los efectos de los que se habla a continuación generalmente se catalogan como 'demanda inducida'. El tráfico inducido se refiere a viajes que antes se hacían hacia otros destinos (redistribución) o a viajes que son completamente nuevos, bien sea por un aumento en la

frecuencia de los viajes a consecuencia de un aumento en la actividad económica, o a cambios en los patrones de localización de los usos del suelo.

La demanda inducida es uno de los elementos más difíciles de modelar en cualquier proyecto de transporte. En algunos casos de proyectos de cuota, la demanda inducida es una componente importante de la proyección total de los ingresos y tiene un impacto relevante en la evaluación socio-económica del proyecto. La necesidad de modelar estos impactos depende de la escala del proyecto y su impacto en los costos generalizados de viaje.

CAMBIO DE DESTINO (D) APROVECHANDO ACCESIBILIDAD

Existen algunos proyectos de cuota que tienen un impacto significativo en las condiciones de accesibilidad y por ende, en los tiempos de viaje, entre ciertos orígenes y destinos. En estos casos, es de esperar que la nueva infraestructura dé lugar no sólo a cambios de ruta y/o de modo entre orígenes y destinos, sino también a un cambio en el origen o destino de los viajes.

Esto puede suceder especialmente cuando la nueva alternativa no sólo supone una mejora de las condiciones de viaje con relación a las rutas alternativas, sino que efectivamente constituya una alternativa completamente nueva. Este es, muchas veces, el caso de puentes o túneles que permiten el acceso a áreas que anteriormente estaban relativamente aisladas debido a la existencia de barreras físicas (río, lago, montaña).

GENERACIÓN PURA DE VIAJES (FRECUENCIA)

Como consecuencia de una mejora importante en las condiciones de acceso, los individuos pueden empezar a viajar más. Por ejemplo, si se produce una reducción en el tiempo de viaje entre la residencia y su lugar de trabajo de aproximadamente 30 minutos, más personas pueden estar dispuestas a almorzar/comer en su casa. El origen y el destino es el mismo, pero en lugar de dos veces el viaje se hace cuatro veces al día.

Este efecto también puede darse en el caso de nuevas carreteras de cuota suburbanas. Un individuo que usualmente iba al campo o a la playa una vez al mes, puede decidir hacerlo todos los fines de semana porque la nueva autopista o carretera permite hacer el viaje el mismo día, por ejemplo.

Como en el caso anterior, si la nueva infraestructura genera cambios drásticos en el tiempo de viaje entre dos puntos, la generación pura de viajes puede ser significativa y es importante su evaluación desde el punto de vista de los ingresos para el operador, además de otros beneficios de tipo socio-económico. Ignorarlo puede dar lugar a una subestimación de las proyecciones de demanda e ingreso.

CAMBIO EN EL TAMAÑO DEL GRUPO QUE VIAJA

Si bien es posible que a fin de utilizar una carretera de cuota algunos grupos decidan compartir el vehículo, la proporción de personas que lo hace es muy pequeña y por tanto el impacto en los ingresos puede ser casi nulo. Una excepción es cuando el proyecto en estudio incluye carriles destinados (HOV o carriles de alta ocupación) sólo a vehículos que viajan con dos o más ocupantes.

CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO ADYACENTE A LA CARRETERA

En el largo plazo, además de los cambios en los patrones de viajes (más viajes, distintos orígenes–destino, etc.), la construcción de una nueva carretera de cuota puede dar lugar a cambios significativos en el uso del suelo, así como facilitar el desarrollo económico de áreas prácticamente inaccesibles.

Eso puede acontecer incluso con proyectos interurbanos. Es común, por ejemplo, ver la aparición de centros comerciales fuera de la ciudad u otro tipo de instalaciones (parques de diversiones, gasolineras, etc.) a lo largo de una autopista suburbana, los cuales no se habrían instalado si ésta no existiera.

Este tipo de impacto es también difícil de predecir, ya que está muy influenciado por la dinámica urbana y económica de la región o ciudad. En general, un análisis de las expectativas de crecimiento económico puede dar una indicación del potencial crecimiento de nuevos desarrollos en el área de estudio y ayudar en la estimación del tráfico extra generado que puede ser captado por la nueva carretera de cuota.

Existen modelos integrados que tratan de predecir el impacto que las mejoras en el sistema de transporte producen en el uso del suelo. Dado que los resultados de este tipo de modelos no se encuentra plenamente comprobada, éstos se tienden a aplicar más en planificación urbana y regional que para proyectar ingresos de carreteras de cuota.

5. ESTRATEGIA DE MODELACIÓN

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la forma de abordar la tarea de modelar y proyectar tránsito y recaudación para carreteras de cuota. Aquí se persigue aplicar los principios más sólidos de modelación, así como también los requerimientos de las instituciones financieras internacionales.

Para ello se recomienda una estrategia de modelación que busque:

- Modelar las respuestas conductuales fundamentales y presentar como aspectos adicionales aquellas que contribuyen menos a los ingresos
- Seleccionar los modelos más apropiados a cada caso
- Identificar los períodos de modelación necesarios
- Utilizar rigurosamente los conceptos de costo generalizado o funciones de utilidad
- Usar información actualizada y estadísticamente confiable
- Calibrar y validar rigurosamente los modelos
- Modelar el crecimiento de la demanda en la forma de escenarios
- Tratar a la incertidumbre de forma transparente.

MODELACIÓN BASADA EN LO FUNDAMENTAL

La aplicación ingenua de la modelación clásica de cuatro (o cinco) etapas o submodelos a las carreteras de cuota, está plagada de problemas. Por una parte, es una herramienta estratégica gruesa que no distingue qué es importante y qué no lo es. En segundo lugar, su implementación total es sumamente cara en tiempo, recursos y recolección de información y encuestas. En tercer lugar, un modelo de gran tamaño aparece a menudo como una “caja negra” que da poca confianza, principalmente porque se han cometido muchos errores en su nombre en el pasado.

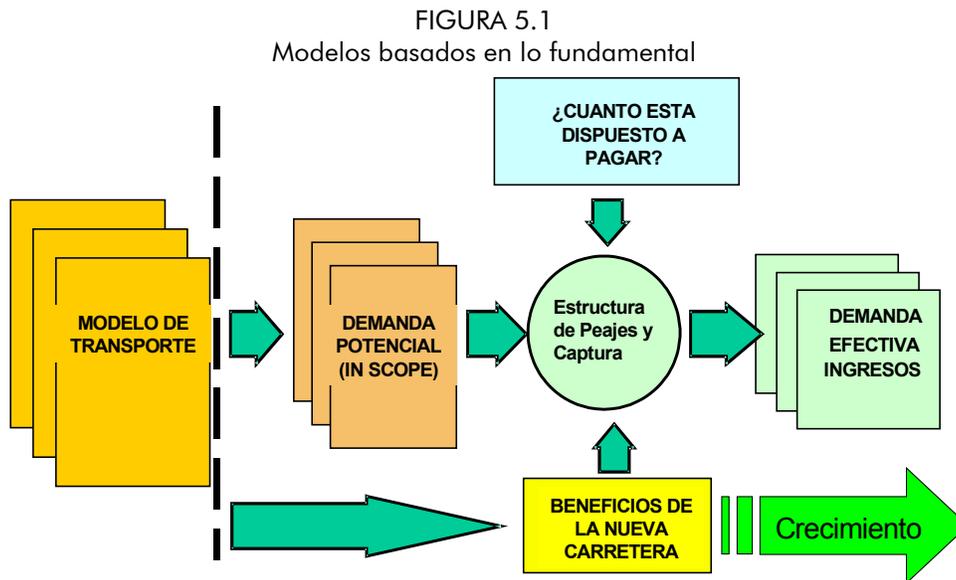
Es por ello que se recomienda hacer un análisis inicial de cuáles son las respuestas conductuales que realmente van a ser relevantes en un estudio de futura carretera de cuota y qué pares O-D son los más importantes. Esto ayuda a definir el Tráfico de Interés o Potencial (in-scope traffic).

La modelación debe basarse en estimar qué proporción de ese Tráfico Potencial es posible capturar y cuantos ingresos se generarían de esta manera.

La siguiente etapa es determinar los beneficios que ofrecerá la carretera de cuota en términos de menores tiempos de viaje (para algunos pares O-D), menos detenciones, mejor nivel de diseño, mayor seguridad, etc.

La disponibilidad a pagar por parte de los usuarios potenciales determinará quienes optarán por la carretera de cuota para obtener esos beneficios y quienes seguirán en las alternativas libres. Finalmente, los modelos de crecimiento permitirán proyectar esa captura y recaudación a años futuros.

Lo esencial de la modelación queda ilustrado entonces en la Figura 5.1.



SELECCIONAR LOS MODELOS APROPIADOS

Como se sugirió anteriormente, en lo posible debe utilizarse el modelo más sencillo que logre capturar lo esencial del comportamiento de los individuos frente a una carretera de cuota. En el caso de problemas sencillos como puentes sobre un estuario o carreteras interurbanas con pocas alternativas, lo más apropiado será generalmente utilizar un modelo de elección entre alternativas discretas del tipo Logit.

Este puede implementarse sobre una plataforma Excel lo que lo hace muy transparente y transportable.

Para problemas más complejos, con más alternativas, es deseable adoptar un paquete computacional especializado como Cube/Voyager, Emme/2, SATURN o TransCAD. Todos ellos han sido empleados para estimaciones de demanda y recaudación de nivel internacional. Posiblemente la calidad de los resultados no dependa tanto del paquete seleccionado (si se trata de uno de estos cuatro), sino de cómo se realice la modelación.

Para la mayoría de los casos bastará con modelar las elecciones de ruta con la nueva carretera. En algunos casos será apropiado agregar los impactos de cambios en los destinos (redistribución de viajes) y, posiblemente, los debidos a la generación de nuevos desplazamientos (tráfico generado puro). Rara vez es necesario considerar cambios en los modos de transporte o el tamaño del grupo que viaja. En algunos casos de carreteras urbanas en áreas congestionadas, puede ser conveniente estudiar qué ocurriría con los cambios en las horas de viaje.

Estos efectos, además del cambio de ruta, deben tratarse separadamente y como un tráfico potencial adicional que aumentaría la recaudación de la carretera si llegaran a ser relevantes. En algunos casos podría ser que un proyecto relacionado, por ejemplo la construcción de un nuevo aeropuerto o línea férrea, haga necesario considerar cambios en la elección de modo de transporte.

En cualquier caso, todo estudio de carretera de peaje debe contener una discusión de qué respuestas conductuales se tomarán en cuenta y por qué.

PERÍODOS DE MODELACIÓN Y HORIZONTES

Se deben resolver aquí dos aspectos. El primero es, qué período típico debe modelarse. En el caso de autopistas sujetas a congestión que varía con las horas del día (urbanas y suburbanas), será necesario modelar al menos la hora pico de la mañana y una hora valle. Puede ser necesario modelar también la hora pico de la tarde de un día laboral si esta es muy diferente a la de la mañana.

Si el comportamiento durante los fines de semana es muy distinto, puede ser necesario también modelar una o más horas típicas de ese periodo. Si las tarifas son diferentes durante ciertas horas, eso va a requerir modelarlas separadamente.

En todos estos casos deben utilizarse factores de anualización para generar, desde el punto de partida de modelos de horas representativas, el Tráfico Medio Diario Anual (TMDA) y la recaudación anual.

El segundo aspecto es, cuáles serán los horizontes de modelación; es decir, qué años futuros es necesario modelar. La práctica recomienda modelar períodos cada cinco años e interpolar para los años intermedios.

INFORMACIÓN ACTUALIZADA Y ESTADÍSTICAMENTE CONFIABLE

El proceso de licitar una carretera concesionada toma bastante tiempo, varios años en muchos casos. La confianza en los resultados de los estudios anteriores y de base depende de: (a) su frescura, es decir cuán recientemente se recolectaron los datos base y (b) del rigor estadístico con que se recolectaron y procesaron los mismos datos.

Es por eso que es deseable recolectar datos al comenzar cualquier estudio de carretera de cuota; en particular los que se discuten en el Capítulo 6. Estos deben ser recogidos y procesados utilizando buenas técnicas estadísticas de muestreo y expansión, como las que se presentan también en ese capítulo.

La documentación de estos procesos debe ser también clara y transparente.

CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Todo modelo requiere un proceso de calibración para asegurar que refleja las condiciones de la realidad actual en la región. No existen estándares absolutos que deban satisfacerse en la calibración de cada tipo de modelo. Esto, porque el nivel de calibración requerido depende de los objetivos de la modelación y de las tasas esperadas de crecimiento y cambio a futuro.

Sin embargo, es deseable considerar una serie de indicadores de referencia disponibles para comparar niveles de calibración. Estos se discutirán en los capítulos 8 y 9.

La tarea de validación de un modelo es diferente y complementaria a la calibración. En este último caso se trata de confirmar que el modelo reproduce mediciones, por ejemplo aforos, que no fueron utilizados en la calibración del modelo. Para ello, en lugar de utilizar la totalidad de los aforos que se usaron para la calibración, se deben reservar algunos, por ejemplo el 10%, para compararlos más adelante con lo que el modelo predice para esos arcos.

Las tareas de calibración y validación de un modelo deben estar bien documentadas en el informe del consultor para dar mayor confianza en sus proyecciones. Se entregan indicaciones más adelante para ello.

CRECIMIENTO Y ESCENARIOS

El futuro crecimiento de la demanda potencial de una carretera es una de las fuentes más importantes de incertidumbre. Es por ello que debe presentarse particular atención a su tratamiento. Cabe señalar que el crecimiento es siempre de la demanda potencial y nunca directamente del tránsito capturado por la concesión.

Esto, porque las condiciones más importantes que regulan las tasas de captura: existencia y costo de alternativas, congestión en ellas y la carretera de cuota, y la disponibilidad a pagar, pueden cambiar año con año.

Se recomienda tratar los problemas de crecimiento a través del desarrollo de escenarios alternativos. En este contexto, un escenario es un conjunto de condiciones, externas a la carretera de cuota que se entregará en concesión, y que afectan su demanda potencial futura y su tasa de captura (por el cambio de condiciones de las alternativas, tasa de motorización, etc.).

Generalmente, se preparan un Escenario Esperado, uno Pesimista y uno Optimista. El Escenario Esperado, o tendencial, refleja las condiciones más probables que se espera ocurran en el futuro; en el fondo, es una proyección de condiciones que reflejan el crecimiento "normal" de la economía. El Escenario Pesimista, describe la situación que puede darse si algunos aspectos evolucionan en una dirección menos favorable. Es el tipo de condición que ha ocurrido en el pasado sin llegar a constituir una crisis, por ejemplo períodos de bajo crecimiento del PIB, pero no la crisis en México de 1994/95. El Escenario Optimista refleja condiciones más favorables pero consistentes con períodos mejores que el caso tendencial.

TRATAMIENTO DE LA INCERTIDUMBRE

Se propone un tratamiento triple del riesgo y la incertidumbre en los proyectos de carreteras de cuota. Sus elementos son: análisis de sensibilidad de la demanda y recaudación, des-agregación (de-construcción) de los resultados del modelo y, en el caso de los estudios para competidores por la concesión y sus entidades financieras, un análisis probabilístico del valor del proyecto.

El análisis de sensibilidad es importante para mostrar cómo dependen las estimaciones de tránsito y recaudación futuras, de los valores de ciertas entradas y parámetros de los modelos, en particular aquellos que no pueden establecerse con precisión. Ejemplos típicos son el análisis de sensibilidad a la tarifa/cuota, a la tasa de crecimiento, y al valor subjetivo del tiempo. El capítulo 16 describe como deben realizarse estos análisis.

La des-agregación de los resultados del modelo es deseable porque hay diferentes componentes de la demanda con diferentes grados de certidumbre en su estimación. Así por ejemplo, deben mostrarse separadamente la contribución al tráfico y recaudación que provienen de: re-asignación de tráfico, redistribución, tráfico generado puro, algún efecto de cambio de modo. Otra forma complementaria de descomponer los resultados es mostrar separadamente los ingresos por tipo de vehículo y/o propósito de viaje.

El análisis probabilístico de recaudación requiere el empleo de modelos más complejos, cuya utilidad mayor es estimar algún tipo de probabilidad que una combinación de factores, que resultan en un nivel de recaudación, se dé en el futuro. Su valor es mayor en los estudios realizados para entidades financieras e inversionistas.

6. REQUERIMIENTOS DE INFORMACIÓN

Este capítulo describe los distintos tipos de información que son necesarios para la realización de un estudio de carretera de cuota, especialmente para el Gobierno Federal o Estatal.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE LA CARRETERA

Una parte importante de estos estudios apunta a entender cabalmente cómo funciona la economía de la región a la que servirá la nueva carretera. Esto requiere ofrecer una descripción de la base económica regional, sus perspectivas de crecimiento y el rol que cumplirá la carretera dentro de esa economía.

La economía regional

Es necesario describir cuáles son las principales fuentes de trabajo y producción de la región, y dónde se ubican las residencias y elementos de producción en la misma. Algunas regiones pueden tener una actividad dominante: minería, agricultura, actividad portuaria, industria automotriz o servicios, pero será más común encontrar una combinación de estos; no obstante, aún así es importante entender cuáles son.

Uno de los objetivos de esta descripción es identificar de qué factores externos puede depender el éxito económico de la región: de los precios internacionales del petróleo o minerales, de la apertura de ciertos mercados internacionales a las exportaciones agrícolas, de mayores niveles de turismo, etc.

La descripción de la economía regional no debe ser una acumulación de cuadros y estadísticas sin análisis y comprensión. Por el contrario, debe ser una buena descripción de la economía regional en función de su sistema de transporte y apoyada por las estadísticas indispensables. Es conveniente ilustrar esta descripción en forma geográfica para entender mejor como se insertará la nueva carretera en ese contexto.

En algunos casos, factores como el clima pueden ser importantes (p.e. para turismo, agricultura), en otros puede ser la topografía la que dificulta al transporte de largo itinerario o el acceso a ciertos lugares. Cabe recordar que en el mundo moderno los países, las regiones y sus ciudades compiten en el contexto global, no solamente nacional.

Su población

Las características de la población residente y de paso por la región, son importantes. En particular, interesan la tasa de motorización (autos y/o vehículos por habitante o por cada 1000 habitantes) y los niveles de ingreso medio.

Si existe información sobre la distribución del ingreso, esta puede tener importancia con respecto a las perspectivas futuras de aumento de la motorización. Lo mismo si se cuenta con información sobre la distribución entre modos de transporte para los desplazamientos de interés, urbanos o interurbanos como sea el caso.

Perspectivas de crecimiento

Interesa conocer la tendencia de crecimiento económico y de población, tanto en valores nacionales como regionales, y en lo posible su distribución geográfica dentro del área.

Es importante distinguir, cuando es posible, las proyecciones oficiales de aquellas producidas en forma independiente por institutos de investigación, entidades bancarias, etc.

Es deseable lograr un rango de proyecciones; por ejemplo, decir que se espera que la tasa de crecimiento de la economía regional (PIB regional) sea de $x\%$ al año con un valor más optimista del $y\%$ y uno pesimista del $z\%$. Lo mismo para la población.

Si el crecimiento de la economía depende de algún evento o tendencia externa importante (por ejemplo precio internacional del petróleo), las expectativas para la evolución de ese factor deberían comentarse también.

El rol de la carretera en el sistema de transporte

La carretera propuesta debe cumplir uno a más roles dentro de la economía urbana o regional. Puede ser una carretera que elimine puntos de congestión, ofrezca mejor acceso a áreas aisladas, permita realizar viajes de larga distancia en forma más eficiente, reduzca los accidentes en carreteras de diseño pobre, etc.

En la práctica, la mayor parte de las carreteras cumplirán más de una función, pero es importante destacar aquellas que se conciben como más importantes. Esto permitirá a las entidades financieras e inversionistas formarse una idea de los mecanismos que contribuirán al tráfico en la carretera así como también, dada su importancia estratégica, la prioridad que reciba por parte del Gobierno para resolver problemas y deficiencias.

La carretera deberá verse en el contexto del resto del sistema de transporte de la región y en ese sentido la presentación de la misma en forma gráfica (posiblemente usando un Sistema de Información Geográfica) es particularmente útil.

INFORMACIÓN CENSAL Y SOCIOECONÓMICA

Población y características

La población y características socioeconómicas asociadas se obtienen de la fuente oficial que es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). La información está

disponible en medio electrónico y georeferenciada a nivel de AGEB (Área Geoestadística Básica), Localidad, Municipio y Estado.

La consulta de la mayor parte de esta información es libre (sin costo), y se puede hacer en la página oficial del INEGI (www.inegi.gob.mx), aunque se recomienda adquirir la información estadística georeferenciada en medio magnético.

INEGI también obtiene y publica, de manera periódica, información económica básica, entre la que se puede encontrar:

- Población económicamente activa (PEA)
- Empleo
- Número de unidades productivas por sector
- Ingresos
- Gastos
- Producción
- Inversión
- Moneda y banca
- Comercio internacional
- Sistema de cuentas nacionales
- Cobertura de servicios, etc.

Los últimos dos censos económicos, 1999 y 2004, se pueden consultar en la página oficial.

También existe información sobre censos agropecuarios y ejidales, aunque éstos no se han realizado de manera periódica.

Es importante aclarar que, aún cuando INEGI es la mejor fuente de consulta estadística, no realiza pronósticos de las variables demográficas. El organismo que oficialmente hace pronósticos demográficos para todo el país, tanto a nivel Estatal como Municipal y por localidad, es el Consejo Nacional de Población (CONAPO). Sus proyecciones se pueden consultar en la página oficial www.conapo.gob.mx, donde están disponibles los pronósticos de población hasta el año 2050.

Motorización

Si bien el índice o tasa de motorización (número de automóviles per cápita) es un indicador del desarrollo y del nivel de ingreso de las zonas, no se recomienda utilizar este dato (por

ejemplo para el caso de México) a la ligera, ya que puede producir sesgos importantes en las estimaciones de aforos.

La utilización de este dato debe estar supeditada a verificar que no exista un número importante de vehículos sin registro oficial, por ejemplo vehículos ilegales, etc.. En caso de no prestar especial cuidado en este aspecto, las tasas de motorización que se calculen, estarán por debajo, quizás del tránsito real que captarán los proyectos, sin embargo siempre será preferible calcularla, conjuntamente con otras variables.

Crecimiento esperado de la economía

El indicador de crecimiento económico es el Producto Interno Bruto (PIB) y, oficialmente es el Banco de México la institución que lleva los registros y hace estimaciones de corto plazo de esta variable.

Las estadísticas oficiales se pueden consultar en la página www.banxico.org.mx, donde están disponibles también otros indicadores macroeconómicos (inflación, balanza comercial, etc.). La Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) también hace estimaciones de corto plazo de esta variable, aunque la fuente más recomendable de consulta es el Banco de México.

El pronóstico de largo plazo de variables macroeconómicas de esta naturaleza la hacen generalmente grupos consultores especializados, organizaciones independientes, universidades u otros organismos. Una de las instituciones de mayor reputación en esta área es el Centro de Estudios Económicos del Sector Privado (www.cce.org.mx), creado por el Consejo Coordinador Empresarial y que cuenta con el respaldo de reconocidos organismos y universidades.

ZONIFICACIÓN

Para proyectos simples, la descripción de la red es también relativamente sencilla. Sin embargo, es necesario indicar qué pares O-D y que rutas y/o modos alternativos van a ser considerados. Para proyectos más complejos, es necesario preparar una red de transporte y una zonificación que permita representar adecuadamente los orígenes y destinos en la región.

Los principios básicos para generar una zonificación razonable para estudios de este tipo se encuentran en Ortúzar y Willumsen (2001, sección 3.4). En general, rara vez vale la pena utilizar menos de 50 zonas y por otra parte sólo los proyectos muy significativos ameritan una zonificación con más de 300 zonas.

La zonificación, desde el punto de vista de la planeación de la infraestructura de transporte, puede ser definida como la división de una región urbana en zonas homogéneas con respecto a la generación de viajes. En este proceso normalmente se toman en cuenta los factores siguientes: usos de suelo, número de viviendas, población total, número total de empleos, red vial existente, etc.

Las dos dimensiones clave de un sistema de zonificación son el tamaño y el número de zonas, que por supuesto están relacionadas; mientras mayor sea el número de zonas en un área determinada, menor será su tamaño.

El número y tamaño de las zonas en que se debe dividir un área depende básicamente de dos factores:

- **Carácter del estudio:** si éste es estratégico, se elegirán menos zonas y más grandes; si es detallado, mayor cantidad de zonas y de menor tamaño.
- **Recursos disponibles:** mayor número de zonas implica mayor exactitud, pero es más caro desde todo punto de vista.

De esta forma, los criterios de zonificación que se deben considerar al desarrollar un estudio son los siguientes:

- La zonificación debe ser compatible con otras divisiones administrativas, en especial con zonas censales; éste constituye el criterio fundamental y los demás sólo se debieran respetar si no son incompatibles con él.
- Las zonas deben ser de un tamaño tal que la suposición de que todas sus actividades se concentran en el centroide no produzca error muy grave; además, el que existan muchas zonas pequeñas tiene la ventaja de que se pueden agregar a futuro, dependiendo de los proyectos que se estudien o evalúen.
- Las zonas deben ser, en lo posible, homogéneas en cuanto al uso del suelo y/o la composición de la población; cuando no exista homogeneidad, no se deben agrupar zonas censales, aunque sean muy pequeñas (por ejemplo, sectores residenciales con diferentes niveles de ingreso).
- Los límites de las zonas deben ser compatibles con cordones internos y líneas pantalla, y con zonificaciones de estudios anteriores; también es importante que los límites no estén definidos por arterias importantes de la red vial primaria, ya que ello dificulta considerablemente la posterior asignación de viajes a zonas, especialmente cuando éstos se originan o terminan en el límite entre un par de zonas.
- La forma de las zonas debe permitir una fácil determinación de su centroide; como este criterio tiene menos importancia que los anteriores, si resulta alguna zona con forma irregular, su centroide se localizará en el centro ponderado de densidades poblacionales y no en su centro geográfico.
- No es necesario dividir el área de estudio en zonas de igual tamaño.

Sin embargo, todos estos criterios deberán inevitablemente sufrir modificaciones dadas las características topográficas, de uso de suelo y de población, que existan en el área de estudio.

Por otro lado, la experiencia indica la conveniencia de no emplear sólo criterios geográficos en la zonificación, sino que también guiarla hacia el verdadero uso que se le dará eventualmente a la encuesta, el cual es proveer la información básica indispensable para que los procesos de modelación de la demanda y evaluación de proyectos de transporte se puedan realizar eficazmente.

Esta jerarquización de criterios de zonificación se debe a que, cualquiera que sea la división zonal efectuada, es necesario finalmente poder estimar, en forma aceptable, la población en cada zona de la encuesta. Así, el tamaño de las zonas no podrá ser tan pequeño como para que los datos recogidos no sean estadísticamente significativos y por otra parte no deberá ser tan grande como para producir una pobre síntesis de los viajes.

La zonificación que se haga para un estudio de carreteras de cuota, dependerá del tipo de proyecto que se desea analizar. La caracterización por tipo de vía se puede dividir de la siguiente forma:

- Libramientos urbanos,
- Autopistas urbanas o suburbanas, o
- Carreteras o autopistas interurbanas

Las vías urbanas y suburbanas, incluyendo los libramientos, requerirán de un mayor detalle en la zonificación, por las características mismas de los viajes y de conectividad de la red (este asunto se trata más adelante).

En su nivel más desagregado, una zona de análisis de transporte (ZAT) debe estar asociada a uno o varios AGEB según la definición del INEGI. Es a partir de esta unidad geográfica que se podrán generar unidades de mayor magnitud dependiendo de las necesidades de cada caso en particular. El AGEB es esencial para estandarizar las bases de datos de los diferentes estudios de factibilidad de carreteras que se realizan en México.

La información socioeconómica y demográfica se encuentra georeferenciada por el INEGI en los siguientes niveles:

- Área geoestadística básica (AGEB),
- Municipio (o Delegación en el caso del Distrito Federal), y
- Estado

Es por ello que lo más recomendable es utilizar estas unidades de área con la finalidad de tener dicha información asociada a una misma referencia espacial.

Otra unidad de área comúnmente utilizada, especialmente para la realización de los trabajos de campo, es la Colonia; sin embargo, la información (socioeconómica y demográfica)

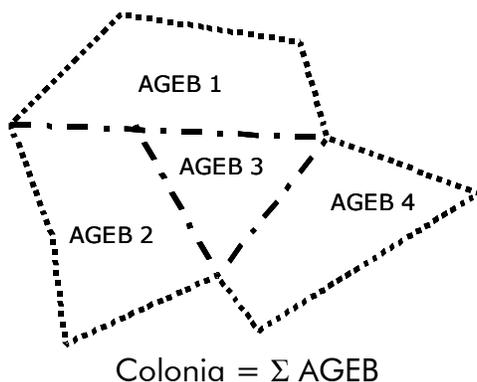
disponible no está asociada a ésta, lo que dificulta en algunos casos el análisis de la información.

En casos particulares la agrupación de AGEB puede llevar a definir el área de una Colonia, aunque esto en general no es una regla y formalmente no existe relación entre ambas divisiones territoriales; sin embargo, como se comenta en el párrafo anterior, una de las preguntas básicas que se hace a los conductores en los estudios de campo es la Colonia de origen o destino, especialmente en los casos con gran influencia urbana.

En trabajos con características regionales, la información solicitada es el nombre de la Localidad y el Municipio al que pertenece.

En el caso de autopistas de cuota urbanas o libramientos, generalmente se parte de una red más compleja lo que obliga a representar el área de influencia del proyecto con mayor detalle (dependiendo de la conectividad de la red). Para estos casos, la Colonia (como unidad de área) es lo más recomendable, por su fácil identificación.

En la medida de lo posible se debe lograr que la Colonia sea una agrupación de AGEB tal como se muestra en el esquema siguiente. Sólo de esta forma (agrupación de AGEB) se podrá lograr asociar información socioeconómica a la división zonal.



Como ya se ha dicho, no hay una relación formal entre los límites de las AGEB y los límites de las Colonias, por lo que en la mayoría de los casos el planificador deberá utilizar criterios propios para definir de manera adecuada los límites de las zonas de análisis.

Para carreteras o autopistas interurbanas, donde la complejidad de las redes generalmente es menor, la unidad básica de referencia mínima será el Municipio, aún cuando se puede aceptar que un municipio se divida en dos o más zonas dependiendo de las necesidades de análisis y de la estructura de la red que se pretenda evaluar.

REDES DE ANÁLISIS

La red de transporte intenta representar la oferta del sistema de transporte para satisfacer las necesidades de movimiento de los viajeros en el área de estudio. La descripción de la red de transporte, en un modelo computacional, puede hacerse a distintos niveles de detalle y requiere la especificación de su estructura o topología, las características de cada arco o enlace de la red y la forma en cómo esas características se relacionan con los flujos en los arcos mismos.

Normalmente, la red se modela como un grafo orientado, esto es, un sistema de nodos y enlaces que los unen; la mayoría de los nodos representan intersecciones y los enlaces o arcos representan secciones homogéneas de vía entre ellas. Los enlaces se caracterizan por varios atributos, tales como longitud del enlace (metros o Km), tiempo de viaje (o velocidad) en el arco, ya sea a flujo libre (sin otros vehículos) o bajo ciertas condiciones de flujo y capacidad (asociada al número de carriles).

Además de estas propiedades, se requiere de una función flujo-velocidad o tiempo de viaje (por Km) vs. velocidad. Esto permite estudiar cómo aumentarán las demoras en el arco a medida que aumentan los flujos, aún cuando en la situación base esos flujos sean muy bajos.

Al establecer una red, una decisión clave es decidir cuántos niveles jerárquicos de vía se deben incluir. Si se incluyen más tipos de calles, se conseguirá una mejor representación de la realidad pero el sistema será más caro y complejo de utilizar; así, el compromiso entre economía y realismo forzará al analista a eliminar ciertos enlaces. Además, no parece lógico usar una red muy detallada y un sistema de zonificación muy agregado, ya que en ese caso, los errores de agregación espacial (en términos de conectividad a la red) reducirán el valor del proceso de modelación.

La red de análisis de un proyecto para la concesión de infraestructura carretera deberá considerar los siguientes elementos.

- Trazo del proyecto propuesto (punto de inicio y de destino de la nueva autopista)
- Carreteras o autopistas existentes con las cuales se pretende competir
- Todos los tramos de rutas alternas potencialmente utilizables por un conductor para completar su viaje dentro de la red
- Conectores entre los arcos de la red y los centroides de zona.

Esta red de análisis deberá incluir conectores a todas aquellas zonas donde se ha identificado producción y atracción de viajes, o aquellas donde se estima que potencialmente podría haber producción o atracción, una vez que se construya la vía propuesta.

Esta red de análisis es un conjunto de nodos y arcos, conectados de tal forma que constituyan rutas de viaje entre las distintas zonas de origen y destino, según los resultados de las encuestas que se realicen.

Cada arco deberá diferenciarse en función de los siguientes elementos:

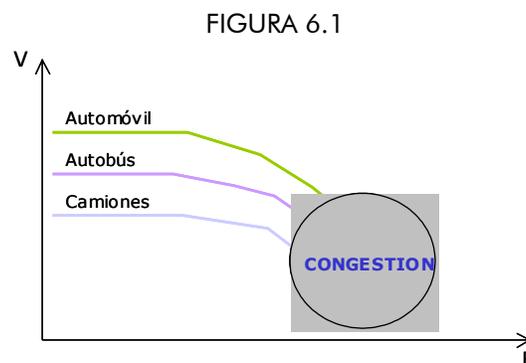
- Longitud,
- Sección transversal,
- Capacidad, y
- Gradiente.

Este último elemento (gradiente) es un factor importante para el análisis de costos, aunque tradicionalmente se utiliza el tipo de terreno (plano, lomerío, montañoso) como elemento de análisis; en efecto, este dato puede ser un factor que permita diferenciar una función de costos de operación, según el destino del viaje.

Funciones de flujo-demora

Las funciones flujo-demora son necesarias para representar la forma como la congestión afecta el tiempo de viaje en un arco. Existe una gama de funciones que pueden utilizarse con ese fin. En su mayor parte se describen como funciones de tiempo de viaje unitario (costos) vs. flujo; analíticamente como $C_a(V_a)$ donde $C_a(.)$ es la función de costos (tiempo por unidad de distancia) para el arco a y V_a es el volumen de tráfico en ese arco.

Las funciones flujo-demora, desarrolladas para el cálculo de velocidades en los arcos de una red de análisis de transporte, deberán diferenciarse por tipo de vehículo. Para ello, deberán determinarse las curvas de velocidad vs. flujo en función de la capacidad de cada tramo analizado (ver Figura 6.1).



Curva velocidad (v) vs. flujo (f)

Las funciones del tipo BPR están disponibles en la mayor parte de los paquetes computacionales y parecen servir bien en modelos urbanos e interurbanos, dependiendo de los valores de sus parámetros α y β , que deben ser estimados para cada carretera:

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{V}{Q} \right)^\beta \right)$$

donde:

t es el tiempo de viaje por kilómetro cuando el volumen de tráfico es V

t_0 es el tiempo de viaje por kilómetro a flujo libre ($V = 0$)

Q es la capacidad de la carretera, en vehículos equivalentes por hora

No se desea normar sobre qué funciones y qué valores deben utilizarse en cada caso, ya que la elección depende del paquete seleccionado y el juicio de los modeladores. Pero es importante señalar que la elección de la función y de los valores de sus parámetros debe documentarse en el informe.

Algunos aspectos a tomar en cuenta, ya que pueden tener un efecto importante en la calibración de las funciones, son los siguientes:

- Las unidades de transporte público de pasajeros, especialmente los de primera clase y servicios ejecutivos, están bastante controladas en relación con las velocidades a que deben circular. Esto sólo sucede en condiciones de flujo libre, pues en condiciones de saturación la velocidad estará condicionada por el tránsito en general.
- En condiciones de flujo libre, deberán diferenciarse las velocidades del tránsito en general, dependiendo de la gradiente en que circulan.

FUNCIONES DE COSTO DE OPERACIÓN

En relación con las funciones de costo a utilizar como parte del análisis de utilidades en las distintas trayectorias de viaje de los usuarios, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) ha hecho algunas aproximaciones a la estructura de costos de transporte en el ámbito carretero nacional. Sin embargo, estos trabajos no se han actualizado desde el 2002 y no incluyen las funciones continuas desarrolladas, sino que sólo se incorporan tablas de referencia para hacer los cálculos.

En estricto sentido, la función de costos de operación que presenta el IMT tiene la siguiente estructura:

$$COV = f(C, T, M, D, F, CI) + Fb$$

donde:

C = Consumos (combustibles, lubricantes, llantas)

T = Tiempo del operador

M = Costos de mantenimiento (incluye refacciones y mano de obra)

D = Depreciación de la unidad

F = Financiamiento

CI = Costos indirectos (aquellos relacionados con la parte administrativa y gastos propios de la explotación del servicio)

F_b = Un factor base estimado por el IMT para distintas condiciones de velocidad e índice de rugosidad internacional (IRI), para cuatro tipos distintos de camiones.

Las limitaciones que presenta esta información (base de datos no actualizada, limitaciones debidas al tipo de vehículo de referencia y falta de funciones continuas para el cálculo de costos), hacen deseable la realización de un estudio de actualización.

Así, una estructura más útil para el cálculo de costos de operación en los distintos tramos de una red de análisis puede ser la siguiente:

$$\text{COV} = f(\text{TV}, \text{V}, \text{IRI}, \text{G})$$

donde:

TV = Tipo de vehículo,

V = Velocidad,

IRI = Índice de rugosidad internacional,

G = Gradiente

Este tipo de función considera en forma más directa lo que es realmente importante en el estudio de costos de operación de una carretera. Las funciones de costos que utilicen las empresas consultoras deberán cumplir con algunos requisitos, como los siguientes:

- Deberán estar regionalizadas, es decir, no existirá una función única para el país.
- Deberán actualizarse periódicamente en función de los indicadores macro-económicos del país.
- Deberán detallarse para al menos 10 categorías de vehículos (A, B2, B3, C2, C3, C4, T2S2, T3S2, T3S3, T3S2S2)
- Deberán ser funciones continuas expresadas a través de la velocidad, IRI y gradiente, a fin de facilitar el cálculo en los procesos de análisis.

FUNCIONES DE COSTO GENERALIZADO

Los costos de utilizar cada arco o alternativa, se representarán normalmente como un costo generalizado. Se recomienda utilizar una función de costo generalizado general y flexible a partir de la formulación siguiente para carreteras:

donde:

Tv_k es el tiempo de viaje sobre el arco k (alternativa)

Tp_k es el tiempo de recorrido por arcos con estándar inferior a la autopista de cuota

D_k es la distancia del arco (alternativa)

C_k es la tarifa o cuota a pagar para esa categoría en ese arco (alternativa)

$\alpha_k, \beta_k, \gamma_k$ y δ_k son parámetros que deben establecerse para cada caso.

Si los costos generalizados se miden en unidades monetarias equivalentes a la tarifa/cuota/peaje, el costo generalizado para la alternativa/arco k se puede obtener haciendo δ_k igual a 1. En ese caso α_k es el Valor Subjetivo del tiempo de viaje en una carretera de buen estándar (autopista), β_k el costo de operación percibido en ese arco por ese tipo de vehículo y γ_k es el costo adicional, en unidades monetarias por hora, de viajar por una carretera de estándar inferior.

En las ocasiones en que no se haga distinción sobre el estándar de la carretera el valor de γ_k será nulo (cero).

TIEMPOS DE RECORRIDO

El objetivo de este apartado es describir algunas técnicas utilizadas en el establecimiento de velocidades o tiempos de viaje a lo largo de segmentos, para la aplicación de modelos de distribución y/o asignación de viajes.

Dos son los métodos que se emplean normalmente en terreno para obtener los tiempos de recorrido vehicular. En ambos casos, al realizar el muestreo es posible obtener los tiempos de recorrido promedio por tipo de vehículo y de toda la muestra vehicular. Estos métodos son el del vehículo de prueba y el método de placas.

Método del vehículo de prueba

En este procedimiento, un vehículo de prueba (también conocido como vehículo flotante) recorre varias veces el tramo de vía en estudio a una velocidad "promedio". Esta velocidad promedio puede fijarse exigiendo que el conductor rebase tantos vehículos como lo rebasen a él/ella o simplemente aceptando lo que el conductor considere como velocidad media.

En cualquier caso, las mediciones de tiempo y pasadas por puntos clave pueden hacerse a mano o utilizando equipo de GPS, de bajo costo y gran efectividad. Se describe primero el método manual aunque se reconoce que este está siendo reemplazado rápidamente por el de GPS ya que en ese caso el conductor sólo se preocupa de mantener una velocidad promedio.

Cuando se trate de autobuses de pasajeros, se sugiere la técnica de persecución; esta consiste en la selección aleatoria de vehículos de observación, a los cuales se les sigue a lo largo de su recorrido por la carretera. Para este caso, los tomadores de información deben cronometrar los recorridos sin considerar los tiempos muertos por paradas (ascenso y descenso de pasajeros, tiempo para tomar algún refrigerio, etc.) que haga el servicio.

Es importante mencionar que la mayoría de los autobuses que prestan servicios ejecutivos y de primera clase cuentan con dispositivos reguladores de velocidad máxima (95 km/h), por lo que las variaciones generalmente no son significativas.

Para los camiones de carga se recomienda, al igual que los autobuses, la técnica de persecución, pues estas unidades muestran grandes variaciones dependiendo de la dirección en que transiten (por lo general en una dirección van cargados y en otra no) y de las condiciones físicas del terreno (en pendientes descendentes las velocidades son mayores que en las ascendentes).

Tamaño de muestra

El tamaño necesario de la muestra, es decir, el número mínimo de observaciones o recorridos dependerá del error tolerable de la media de las velocidades de recorrido estimadas y de la variabilidad o dispersión de las observaciones.

Box y Oppenlander⁷ (1985, p. 101) recomiendan los siguientes valores para este error:

- Para estudios de planeación: de 5.0 a 8.0 km/h.
- Para análisis de circulación y evaluaciones económicas: de 3.5 a 6.5 km/h.
- Para estudios anteriores y posteriores a un cambio: de 2.0 a 5.0 km/h

También recomiendan que se use como medida de la variabilidad lo que llaman “amplitud media de las velocidades de recorrido” y que se puede estimar de la siguiente manera:

$$R = \frac{\sum S}{N - 1}$$

⁷ Box, P.C. y Oppenlander, (1985) Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito. 4ª edición, Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A., México, D.F.

R = Rango promedio de la velocidad de recorrido (km/h)

$\sum S$ = Suma de los valores de todas las diferencias de velocidades

N = Número de recorridos de prueba completos

Una vez estimada la amplitud media de las velocidades de recorrido y seleccionado el valor del error máximo tolerable de la media de velocidades, se va a la Tabla 6.1 y se determina el número mínimo estimado de recorridos.

TABLA 6.1
Tamaño de la muestra necesario para estudios de tiempo de recorrido con un nivel de confianza de 95%

Amplitud media de la velocidad de recorrido (km/h)	Número mínimo de recorridos para un error tolerable específico (km/h)				
	±2.0	±3.5	±5.0	±6.5	±8.0
5.0	4	3	2	2	2
10.0	8	4	3	3	2
15.0	14	7	5	3	3
20.0	21	9	6	5	4
25.0	28	13	8	6	5
30.0	38	16	10	7	6

Personal y equipo

Para la realización de este estudio se requerirá de un vehículo cuyo odómetro y velocímetro funcionen correctamente, así como una persona, además del conductor, que realice las actividades de tomar la información, por lo que deberá estar provisto de un cronómetro con el que medirá y anotará en la hoja de campo los tiempos de recorrido y los tiempos de detención o demoras, así como sus causas.

Actividades previas a la toma de información

Antes de emprender los recorridos hay que determinar los puntos iniciales y finales del tramo, así como los puntos de control donde se considere importante registrar tiempos de recorrido parciales y/o medir demoras. En autopistas se utilizan puntos específicos en los ramales de entrada y salida; mientras que en carreteras de dos carriles se suele usar como puntos de control a los lugares donde cambian las características de la vía. En la Figura 6.2 se presenta un formato de campo para la toma de información de los tiempos de recorrido y demoras por el método del vehículo flotante.

De acuerdo con la información a recopilar, es importante conocer por adelantado la longitud del tramo de estudio y la distancia entre puntos de control, tomándolos de planos o inventarios existentes o midiéndolos por los medios más expeditos de que se disponga.

FIGURA 6.2

Tiempos de recorrido y demoras por el método de vehículo de prueba. formato de campo

- Fecha: Fecha en que se realiza el estudio
 - Ubicación: Lugares de inicio, control y terminación del recorrido.
-
- Cuando se tiene todo listo para empezar, se detiene el vehículo poco antes de llegar al punto de inicio, y en la hoja de campo se anotan los datos generales de última hora relativos al recorrido que se va a hacer, tales como hora de inicio y condiciones climáticas
 - Cuando el vehículo flotante pasa por el inicio del tramo, el anotador registra la lectura del odómetro, o si se le facilita lo coloca en ceros, al tiempo que el observador pone en marcha el cronómetro y lo deja correr.
 - Mientras se recorre la vía, se va leyendo y registrando la distancia acumulada en el odómetro según el vehículo va llegando a cada punto de control, estas anotaciones se hacen en la segunda columna de la hoja de campo.
 - Enseguida se registra el tiempo acumulado del cronómetro. Las lecturas se realizarán cuando el vehículo pase sobre el eje de la vía transversal que constituye el punto de control a considerar.
 - Para establecer los tiempos de demora, se registra el tiempo acumulado en el campo "Hora Inicio" cuando el vehículo se detiene o reduce su velocidad a un valor menor del que limita la detención; para cuando el vehículo se pone en movimiento rebasando el límite de velocidad aludido, se anota en el campo "Hora Final" el valor indicado por el cronómetro. La diferencia de estas dos lecturas es el tiempo de demora. En la séptima columna se indica la causa aparente de la demora escribiendo el símbolo correspondiente.
 - Al llegar al final del tramo, se detiene el cronómetro, se lee el tiempo total de recorrido y se anota en la fila que contenga las vías que conforman el último punto de control.

Recomendaciones para la realización del estudio

El vehículo a emplear debe estar en óptimas condiciones mecánicas y su conductor debe realizar los recorridos en forma natural pero procurando "flotar" dentro de la corriente del tránsito.

Los recorridos del vehículo flotante se realizan dentro de los periodos de tiempo en que se desee analizar las condiciones de velocidad del corredor en estudio; generalmente se trata de cubrir los periodos de hora pico y valle.

Los recorridos se deben efectuar en días típicos de una semana cualquiera, generalmente de martes a jueves, con el propósito de abarcar condiciones de comportamiento normal en la corriente del tránsito.

Los puntos de control para el ejercicio deben ser establecidos con anterioridad por la persona encargada de la planeación del estudio, para lo cual debe realizar un recorrido en el que identifique claramente los sitios precisos a utilizar como referencia.

Las lecturas de tiempo para registrar el paso del vehículo por los puntos de control y la definición de las demoras, se realizan de manera acumulada de acuerdo con lo registrado en el cronómetro.

En aquellos lugares en donde se acumulen las demoras, por dos o más causas, es conveniente que el observador realice la anotación de cada una por separado; si las demoras se traslapan, el observador debe estar en capacidad de asignar el tiempo total de la demora a la causa más relevante o representativa dentro de las que se presentan.

Determinación de la velocidad media

Con los datos del formato de campo se calcula el tiempo total de recorrido y las demoras, tanto para cada tramo entre puntos de control como para todo el corredor estudiado. Si al tiempo total de recorrido se le resta el tiempo de las demoras, se obtiene el tiempo total de marcha.

Con esta información, las medidas de tiempo son convertidas en velocidades de recorrido o de marcha, dividiendo la longitud del tramo o del corredor por el tiempo de recorrido o de marcha, respectivamente

Así, la velocidad media de cada recorrido se puede calcular de la siguiente manera:

$$V = \frac{60D}{T}$$

donde:

V = Velocidad de recorrido (km/h)

D = Longitud del tramo o del corredor en estudio (Km)

T = Tiempo de recorrido (min)

Por su parte, la velocidad media del corredor se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\bar{V} = \frac{60ND}{\sum T}$$

donde:

\bar{V} = Velocidad media de viaje (km/h)

D = Longitud de la ruta o tramo en estudio (km)

ΣT = Suma de todos los tiempos de recorrido (min)

N = Número de recorridos

En la Figura 6.3 se muestra un ejemplo del procesamiento de la información recolectada en terreno para la determinación de las velocidades de recorrido y marcha.

Utilización de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS)

Los navegadores satelitales o GPS (Sistema de Posicionamiento Global) son instrumentos portátiles que tienen la función básica de captar señales satelitales para determinar su ubicación geográfica en tiempo real, almacenando y procesando automáticamente la información levantada en el campo.

Cuando el GPS en modo navegador recorre un trayecto cualquiera en un vehículo, va mostrando a tiempo real y acumulando automáticamente en la memoria, todos los parámetros de velocidad máxima, velocidad media de movimiento y media total, tiempos de detención y de marcha, tiempo estimado de arribo, distancia hasta el punto de destino, entre otros.

Además de obtener los parámetros en tiempo real, al final del recorrido, con una interfase de conexión, los datos levantados en campo pueden bajarse directamente a una PC, y obtener los gráficos de velocidad versus espacio, tiempo, y altura. También podrá verse la simulación de la trayectoria del vehículo.

Todas estas operaciones son realizadas automáticamente por el GPS con gran precisión, de manera que no se necesita más que el propio operador, disminuyendo al mínimo los costos operativos en el terreno y el posterior procesamiento de datos.

Tamaño mínimo de la muestra

La distribución de las velocidades individuales de los vehículos no se aparta mucho de la Distribución Normal (la de forma acampanada o de Gauss). Por lo tanto, sin incurrir en grandes errores se puede suponer, que la distribución de las medias de las velocidades es también Normal y aplicar las propiedades de esta distribución al estudio de velocidades por el método de placas. Por ello, el número mínimo de observaciones estará determinado por la siguiente expresión:

$$N = \left(\frac{z \cdot S}{E} \right)^2$$

donde:

N = Tamaño de la muestra

S = Desviación estándar de la muestra (km/h)

z = Valor de la variable Normal estándar para el nivel de confiabilidad deseado

E = Error permitido en la estimación de la velocidad (km/h)

Box y Oppenlander (1985, p.86) sugieren una desviación estándar (S) de 8.0 km/h, como valor empírico para velocidades en cualquier tipo de camino y de tránsito.

El valor de z depende del nivel de confianza seleccionado y se puede obtener de la Tabla 6.2.

FIGURA 6.4
Tiempos de recorrido por el método de placas. formato de campo.

**ESTUDIO DE TIEMPOS DE RECORRIDO
METODO DE PLACAS**

Fecha: _____ Hoja _____ de _____

Carretera: _____ Hora inicio: _____

Ubicación: _____ Hora terminación: _____

Sentido: _____ Condición climática: _____

No.	Tipo Vehículo	Número placa	Hora		
			hh	mm	ss
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

No.	Tipo Vehículo	Número de placa	Hora		
			hh	mm	ss
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					

TIPO DE VEHICULO:

A AUTOMOVIL	C2 CAMION DE 2 EJES	C6 CAMION DE 6 EJES
B AUTOBUS DE 2 EJES	C3 CAMION DE 3 EJES	C7 CAMION DE 7 EJES
B3 AUTOBUS DE 3 EJES	C4 CAMION DE 4 EJES	C8 CAMION DE 8 EJES
	C5 CAMION DE 5 EJES	C9 CAMION DE 9 EJES O MAS

Nombre: _____	Nombre: _____
Carga: _____	Carga: _____
Fecha: _____	Fecha: _____
Elaboró	Revisó

TABLA 6.2
Valores de Z para varios niveles de confianza

NIVEL DE CONFIANZA (%)	VALOR DE LA Z
68.3	1.00
90.0	1.64
95.0	1.96
95.5	2.00
99.0	2.58
99.7	3.00

Los niveles de 90 y 95% son los más usados en la medida de las velocidades. El error tolerable máximo de la media aritmética de las velocidades suele estar comprendido entre uno y cinco km/h, y es generalmente de dos o tres km/h.

Ya que el procedimiento descrito está basado directamente en las propiedades de la distribución Normal estándar, no debe emplearse cuando las muestras son de menos de 30 observaciones, pues en esos casos no se cumple el Teorema Central del Límite y la media de la distribución de velocidades no necesariamente distribuye Normal.

Método

- Se selecciona el tramo o los tramos que se vayan a estudiar y se mide su longitud.
- Se colocan dos personas en el extremo de cada tramo: un observador provisto de un cronómetro y un anotador con una hoja de campo y una tableta.
- Se sincronizan todos los cronómetros, y a partir de la hora convenida los observadores dictan a los anotadores, como información mínima, los tres últimos números de las placas de matrícula de los vehículos que pasan, así como las lecturas de los cronómetros en esos momentos.
- Si el volumen de tránsito es muy alto, es preferible utilizar un formato para cada tipo de vehículo. Además, se puede considerar utilizar únicamente los vehículos que tengan matrículas con determinadas características (que terminen en 0, o números pares, por ejemplo).
- Los números de las placas y las lecturas del cronómetro se escriben en la hoja de campo.
- Luego, en el gabinete, se revisan los números de placa, se seleccionan aquellos que coinciden en ambos puntos de lectura del tramo, se clasifican por tipo de vehículo y se obtiene el tiempo de recorrido promedio por sentido de circulación en el tramo, a partir del cual puede ser estimada la velocidad de operación promedio.
- El trabajo de cotejar a mano las dos observaciones es largo y tedioso. Es mejor “digitalar” las observaciones en el gabinete y realizar todo el trabajo de reducción y análisis de la información en computador.

Alternativas tecnológicas

Existen otras alternativas, más tecnológicas, como utilizar cámaras de video para observar los vehículos y “digitalar” los datos en el gabinete o usar computadores portátiles para registrar los números de placa (el registro de la hora es automático) y dejar que el computador se encargue de cotejar los números de placa, calcular los tiempos de recorridos, indicar los que parezcan erróneos, y efectuar el análisis estadístico. Esto requiere, por supuesto, haber diseñado un programa que realice estas tareas.

Determinación de la velocidad de recorrido

Los resultados obtenidos a partir de este método únicamente permiten determinar la velocidad de recorrido, ya que la información relativa a los tiempos por demora no se puede registrar.

Después que los números de las placas han sido confrontados, se calcula el tiempo de recorrido para cada tipo de vehículo como la diferencia de los tiempos registrados en los

puntos de control; esto es, se resta la hora a la cual el vehículo pasó por el lugar de inicio de la ruta, de la hora por la que pasó por el lugar final.

Con todo ello, la velocidad de recorrido por tipo de vehículo se calcula a partir del tiempo medio de recorrido para ese tipo de vehículo de la siguiente forma:

$$\bar{V}_i = \frac{60D}{\bar{T}_i}$$

donde:

\bar{V}_i = Velocidad media del tipo de vehículo i (km/h)

D = Longitud del corredor o tramo en estudio.

\bar{T}_i = Tiempo medio de recorrido del tipo de vehículo i (min)

El tiempo medio por tipo de vehículo se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$\bar{T}_i = \frac{\sum T}{N}$$

$\sum T$ = Suma de los tiempos de recorrido para el tipo de vehículo i (min)

N = Número de recorridos de prueba

ENCUESTAS ORIGEN DESTINO

Ubicación

Las encuestas origen-destino (EOD) deben realizarse en el área de influencia del estudio (previamente definida y zonificada), procurando entrevistar todos los tipos de viajeros susceptibles de ser afectados por la nueva infraestructura.

Las EOD se deben efectuar durante días considerados representativos, típicamente Martes a Jueves en período laboral, para los flujos a modelar. Por ende, es necesario conocer la distribución de flujos en el área de estudio durante el año (estableciendo lo que comúnmente se denomina "periodización"), con el fin de decidir en qué época(s) del año y durante cuantos

días deberían recolectarse las encuestas. La práctica estándar en el caso interurbano, considera al menos la definición de períodos “normal” y “estival”, y dentro de éstos la separación en días laborales y de fin de semana.

Desde el punto de vista espacial, se trata de lograr la mayor y más eficiente cobertura posible de todos los viajes que tienen lugar en el área de estudio; es posible que se puedan producir problemas cuando se trata de interceptar viajes poco probables o que, por configuración de la red, resulte muy ineficiente interceptar.

Para asegurar un buen resultado, es importante contar desde el principio con una red de transporte codificada y una matriz de viajes inicial (aunque sea obsoleta, o sencillamente sintetizada a partir de conteos de tráfico o de un modelo de distribución transferido de otro lugar). Esto permite cargar todos los viajes a la red y hacer un análisis de los pares origen-destino (O-D) que utilizan arcos potenciales para hacer encuestas de interceptación.

En redes complejas esto se puede hacer mediante programas comerciales, habitualmente disponibles, usando la opción “análisis de enlaces seleccionados” (Select Link Analysis o SLA, por sus siglas en inglés). La técnica SLA no sólo es sencilla sino que muy poderosa en la práctica. Consiste en la posibilidad de especificar (en un paquete de asignación) uno o más arcos de interés y extraer la matriz de viajes que utiliza esos arcos.

De esta forma, se puede especificar arcos que constituyan un cordón alrededor del área de interés y la matriz que se extrae es la correspondiente a los viajes que lo cruzan. Es igualmente útil identificar líneas de pantalla con ese objeto; paquetes como EMME/2, por ejemplo, permiten especificar estos arcos en forma interactiva en la pantalla gráfica que despliega la red.

Es interesante destacar, sin embargo, que bajo condiciones estrictas de equilibrio se produce una cierta ambigüedad en este procedimiento, ya que los costos son únicos pero las rutas usadas no lo son (no están completamente identificadas). En estas condiciones, la mayoría de los paquetes comerciales identifica un conjunto factible de pares O-D y las proporciones que usan los arcos seleccionados; no obstante, estrictamente hablando es posible que otras proporciones de viajes también satisfagan las condiciones especificadas.

En nuestro caso, interesa seleccionar una combinación de sitios que permita cubrir la mayor parte de la matriz O-D (esto es, los pares más importantes) sin duplicaciones innecesarias. Esto puede hacerse utilizando una combinación de experiencia, intuición y método sistemático.

En particular, un procedimiento heurístico simple es el siguiente:

- 1) Cargar la matriz disponible a la red usando el método “todo o nada” (que es adecuado en situaciones de baja o nula congestión)

- 2) A continuación, hacer un SLA de los sitios de encuesta en el cordón externo al área, que son generalmente conocidos, y obtener la matriz de viajes que los cruzan. Luego, sustraer de la matriz total esa parte de la matriz, lo que permite eliminar los viajes que entran o salen del área.
- 3) Cargar la matriz restante (esto es, la diferencia) todo o nada a la red. Los flujos resultantes en cada arco indicarán los montos probables que todavía escapan de una observación completa (son sólo estimados). Seleccionar un cierto número de puntos adicionales de encuesta (por ejemplo, cinco), distantes entre sí y que cumplan la condición de aportar altos flujos de la matriz restante; hacer SLA de esos puntos, extraer la matriz resultante y sustraerla de la matriz restante anterior.
- 4) Repetir el paso (c) hasta que quede muy poco de valor en la matriz restante; es decir, volúmenes bajos en la red cuando se cargue con la última matriz restante.

Un criterio alternativo de parada puede estar dado por el presupuesto disponible. Se debe tener en cuenta que en el caso de encuestas de interceptación el costo marginal de una entrevista es bajo. De hecho, los costos más importantes son por sitio de encuesta: permisos, policía o seguridad, supervisión, conteos permanentes asociados, movilización e iluminación (en período invernal). Por ello, en esta etapa es razonable ignorar el costo de obtener un tamaño muestral específico en cada sitio; por otra parte, es difícil justificar sitios de encuesta en lugares con menos de 150 vehículos al día en el caso interurbano.

La selección de puntos para la realización de encuestas de interceptación, debe realizarse separadamente para cada tipo de vehículo a considerar (particulares, transporte público, vehículos de carga).

En cuanto a la realización del trabajo en terreno, en general es recomendable separar las tareas de entrevistar a los viajeros y de identificar a los vehículos interceptados; esto permite que si una encuesta queda incompleta, no se invalide el resto de las encuestas del vehículo, y también facilita que los pasajeros de un mismo vehículo sean abordados por más de un encuestador. Así, este método requiere asignar personal y formularios distintos para cada tarea, como se describe más adelante.

Además, se deben ejecutar aforos de clasificación y de tasas de ocupación, al mismo tiempo y en el mismo lugar que las EOD.

Muestra

La selección de la muestra debe ser aleatoria, por lo que las pautas de detención de vehículos deben ser precisadas al personal responsable.

En el caso de transporte público, el ideal es que un grupo de encuestadores aborde al vehículo y encueste luego la mayor cantidad posible de pasajeros, a fin de no demorar adicionalmente el viaje; esto se traduce en una mejor disposición de los viajeros a contestar la encuesta.

Se deben registrar los casos de no-respuesta o rechazo, inscribiendo toda la información posible (por ejemplo, marca y tipo de vehículo, número de ocupantes y hora del día) para efectos de corrección de los datos.

Con relación al diseño de formularios, se deben tomar en cuenta diversos aspectos. En primer lugar, como ya se indicó es conveniente diseñar dos tipos de formulario: uno, para realizar la encuesta propiamente como tal a los viajeros y otro para identificar las características de los vehículos en que viajan; en el caso de vehículos particulares y de carga, este último debe registrar la siguiente información: número serial de identificación del vehículo (número único, de preferencia prefoliado); tipo de vehículo (particular, comercial, de carga, etc.), cantidad de ocupantes, hora de la encuesta.

Por su parte, el formulario de encuesta debe registrar información como la siguiente: número serial de identificación, que relaciona esta información con la descripción del vehículo, origen, destino y propósito del viaje, nivel de ingreso, edad, sexo, frecuencia del viaje y tipo de viajero (chofer/conductor del vehículo, acompañante de automóvil, pasajero de taxi o de transporte escolar, etc.).

Es recomendable que las preguntas se escriban de manera completa para evitar sesgos. También resulta conveniente formalizar un método para registrar un mismo origen y/o destino entre varios pasajeros, pues permite acortar notablemente la encuesta cuando las personas viajan en grupo.

En el caso de transporte de carga se debe proceder de forma similar (y al mismo tiempo) que en el caso de vehículos particulares; incluso se debe utilizar el mismo formulario de identificación de vehículos, pero el formulario de encuesta busca registrar datos tales como: número serial de identificación, origen, destino y tipo de carga transportada, cantidad de carga, silueta del vehículo (permite ver rápidamente si es un camión de uno o dos ejes, etc.) y ruta que utiliza o pretende utilizar en el área geográfica del estudio.

Finalmente, en el caso de encuestas de transporte público el formulario de características del vehículo debiera registrar la siguiente información: número serial de identificación, hora de encuesta, línea o recorrido, sentido del viaje, cantidad de ocupantes.

El formulario de encuesta, en tanto, debiera registrar información como la siguiente: número serial de identificación, origen, destino y propósito del viaje, frecuencia de viaje, otros modos utilizados, nivel de ingreso, edad y sexo, y si viaja en grupo (en este último caso se debe indicar el número de acompañantes).

El número total de encuestas a realizar estará determinado por tres condiciones: la primera es que permita disponer de la información suficiente para caracterizar en forma adecuada los viajes en el área de interés; la segunda es que permita calibrar los modelos de demanda que

se utilizarán para evaluar socialmente el proyecto, y la tercera es que su costo no supere los recursos disponibles para esta parte del estudio.

Información mínima (pasajeros y carga)

En el caso de viajes de pasajeros, la información mínima a consultar en la encuesta debe ser la siguiente:

- origen y destino del viaje (codificado al mayor nivel de precisión posible dadas las características del estudio, idealmente geocodificados, pero como mínimo a nivel de zona);
- propósito del viaje (se deberá haber definido previamente un listado de propósitos de interés para el estudio);
- sexo y edad del viajero (por observación directa);
- número de acompañantes (en el caso de automóvil), o tamaño del grupo (en el caso de viajes en transporte público)
- tipo de vehículo (marca, modelo y año por observación directa, en el caso de viajes en automóvil).

En el caso de viajes de carga, la información mínima a considerar es el origen, destino, tipo de carga transportada y número estimado de toneladas; por observación directa se deberá anotar el tipo de vehículo de acuerdo a alguna clasificación previamente establecida.

Información adicional (pasajeros y carga)

En el caso de pasajeros, puede ser de gran interés conseguir información adicional como la siguiente:

- ingreso personal y/o familiar del viajero (típicamente en rangos, previamente definidos y solicitando al viajero sólo señalar el rango en que se encuentra, para garantizar confidencialidad);
- otros datos socioeconómicos de potencial interés para la posterior modelación, tales como: ocupación, nivel de educación y frecuencia con que realiza el viaje;
- información relacionada con el hogar del viajero, tal como: número de automóviles, posesión de licencia de conducir, número de residentes en su hogar, relación con el jefe del hogar;
- información respecto a quién paga el viaje.

En el caso de transporte de carga puede ser interesante conseguir información sobre la cantidad de carga, frecuencia del transporte, si es que éste es habitual, y la ruta seguida o a seguir dentro del área geográfica del estudio.

Tamaño muestral

Para determinar el tamaño de la muestra en cada punto de encuesta puede utilizarse la siguiente ecuación (Ortúzar y Willumsen, 2001, Cap. 3):

$$n \geq \frac{p(1-p)}{\left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{p(1-p)}{N}}$$

Aquí n es el tamaño de la muestra, N es número de viajeros que cruza el punto de encuesta, p la proporción de viajeros con un destino determinado, e el error aceptable (como proporción) y z el valor de la variable Normal estándar para el nivel de confianza que se desee. Es fácil ver que dados N , e y z , el valor $p = 0.5$ produce el mayor (más conservador) valor de n . Tomando este valor y considerando $e = 0.1$ (esto es, un máximo error del 10%) y $z = 1.96$ (para el 95% de confianza), se llega a los valores de la Tabla 6.3.

TABLA 6.3
Tamaño muestral típico para encuestas O-D

FLUJO OBSERVADO (PASAJEROS/PERÍODO)	TAMAÑO MUESTRAL (%)
900 o más	10.0
700 a 899	12.5
500 a 699	16.6
300 a 499	25.0
200 a 299	33.3
1 a 199	50.0

Así, en el caso relativamente normal de flujos superiores a los 900 pasajeros/período, la fórmula indica que es suficiente con entrevistar a una muestra del 10% de los usuarios, en forma aleatoria.

Requerimientos de calidad

La información proveniente de las encuestas en terreno debe ser depurada, eliminando aquellas que tienen información incompleta o inconsistente, encuestas cuyos orígenes o destinos no pudieron ser geocodificados, y aquellas cuyos pares origen-destino (O-D) no debieran haber sido interceptados en una estación dada. La experiencia obtenida en países como Chile, muestra que la proporción de encuestas incompletas o mal asociadas a un punto no representa más del 10% del total en el caso interurbano; la mayor proporción de encuestas

perdidas se debe a la imposibilidad de georeferenciar los orígenes o destinos (lugares inubicables).

Una vez reducida la muestra al número de observaciones válidas, se puede calcular la tasa de muestreo efectiva (y la tasa de expansión) correspondiente a cada estación de encuesta, comparando las observaciones en cada categoría con el conteo independiente y continuado que se ha debido ir realizando en cada una. Si las encuestas se toman de forma continua a lo largo de cada período de medición, es posible obtener tasas de muestro para cada hora (o período inferior a éste si se estima necesario) y tipo de viajero. Ello permite manejar de mejor forma las diferencias en los patrones de viaje que se producen dentro de un mismo período, por ejemplo, en el pico laboral, o en hora valle de fin de semana.

Tratamiento de doble observación

Dentro de la etapa de validación, tradicionalmente se considera a la eliminación del potencial doble conteo de viajes que es característico de este tipo de encuestas. Sin embargo, en la actualidad esta etapa no se considera necesaria debido a que el método de construcción de matrices de viaje resuelve este problema en forma directa.

Formación de matrices

En esta parte se recomienda utilizar modelos de coeficientes de expansión muestral, ya que permiten eliminar las complicaciones derivadas del problema de doble conteo. De esta forma, suponiendo n_{ij} puntos de encuesta que interceptan al par (O-D) ij , el proceso de estimación requiere la siguiente información:

- p_{ij}^a la proporción de viajes del par ij que utiliza el arco a (donde existe una estación de encuesta);
- r^a : la tasa de muestreo en el arco a (por ejemplo, 10%).

Así, si s_{ij}^a son los viajes entre i y j encuestados en la estación de encuesta a , una estimación del número total de viajes entre este par estaría dada por la razón:

$$V_{ij} = \frac{s_{ij}^a}{p_{ij}^a r^a}$$

Sin embargo, como existen múltiples puntos de encuesta, un mejor estimador se obtiene al minimizar la suma ponderada (por los p_{ij}^a) de las diferencias de la estimación directa de V_{ij} para cada estación; esto produce el siguiente estimador óptimo del número de viajes entre i y j :

$$V_{ij} = \frac{\sum_{n_{ij}} \frac{s_{ij}^a}{r^a}}{\sum_{n_{ij}} p_{ij}^a}$$

Ajuste de matrices

Es posible que la matriz obtenida no tenga observaciones en algunas celdas aún cuando en principio el par O-D debiera haber sido interceptado, ya que:

- Para ese par O-D la tasa muestral es pequeña y el número de viajes a interceptar también, o
- Simplemente no se realizaron viajes entre ese par O-D en el período observado.

Además, cuando se están estimando matrices desagregadas por modo o período, es probable encontrar un mayor número de celdas sin observaciones.

Por otro lado, es importante verificar que las matrices estimadas sean consistentes con otra información independiente que esté disponible, típicamente aforos de tráfico. Así, ambos problemas se pueden resolver en forma conjunta ajustando las matrices estimadas mediante la información de los aforos, permitiendo que las celdas sin observaciones tengan una pequeña "semilla" (en lugar de un cero) y crezcan si es que efectivamente la información de los aforos así lo amerita.

Algunos aspectos prácticos de relevancia en este sentido, son:

- Los aforos de tráfico permiten incluso obtener matrices para diferentes sub-períodos, por ejemplo, segmentos de media hora de duración durante un período pico de tres horas.
- Es posible utilizar paquetes comerciales (como Emme/2, SATURN, TRIPS o TransCAD), que tienen rutinas específicas para realizar esta tarea, si bien con diferentes grados de sofisticación y refinamiento.
- La utilización de este enfoque, en su forma más tradicional, requiere confiar en la calidad de la estimación de los factores p_{ij}^a . Una manera de reducir la dependencia de su exactitud, es agrupar aforos en líneas de pantalla o corredores que reduzcan la posibilidad de errores en el mecanismo de elección de ruta.
- El proceso de ajuste de matrices a partir de conteos tiene, además, la virtud de eliminar los últimos elementos de doble-conteo que podrían haberse escapado al proceso de expansión de matrices.

- No obstante todo lo anterior, existe siempre el peligro de que el empleo de estas técnicas pueda servir para ocultar errores de base (redes no correctamente calibradas o matrices iniciales con alto nivel de error), y producir resultados que estén aparentemente bien condicionados, pues la técnica tiende a producir matrices que se ajustan bien a las redes y los aforos disponibles. Por esto, es recomendable reservar al menos un 5% de los aforos para validar las matrices y redes.
- Este enfoque de ajuste sólo se debe utilizar en la etapa final del proceso de estimación de matrices, para hacer las últimas modificaciones y correcciones.
- Finalmente, algunos paquetes comerciales permiten fijar partes de la matriz de manera que ésta no sufra correcciones a partir de los aforos de tráfico; esto es muy útil, pues permite “congelar” aquellas partes de la matriz que se consideren realmente bien observadas.

AFOROS VEHICULARES

Los estudios de volúmenes de tránsito se realizan con el propósito de conocer la cantidad de vehículos que pasa por un punto durante un tiempo determinado. Los volúmenes que generalmente interesan son los de horas de pico, diarios (días laborales y/o de fin de semana) y anuales. En particular interesa estimar el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), o Tráfico Medio Diario Anual (TMDA) en otros países.

Volúmenes de tránsito promedio diarios

Se define el volumen de tránsito promedio diario (TPD), como el número total de vehículos que pasa durante un periodo dado (en días completos), transformado en el equivalente al promedio diario. De acuerdo al número de días de este periodo, se presentan los siguientes volúmenes de tránsito promedio diario (en vehículos por día):

Tránsito diario promedio anual (TDPA): Representa el valor promedio de los volúmenes de tránsito que circulan en 24 horas durante un año. Se obtiene de la siguiente manera:

$$TPDA = \frac{TA}{365} \quad \text{donde: TA = Tránsito Anual}$$

Tránsito promedio diario mensual (TPDM): Representa el valor promedio del tránsito diario, obtenido con base en el tránsito de un mes. Se obtiene de la siguiente manera:

$$TPDM = \frac{TM}{30} \quad \text{donde: TM = Tránsito Mensual}$$

Tránsito promedio diario semanal (TPDS): Representa el valor promedio del tránsito diario, obtenido con base en el tránsito de una semana. Se obtiene de la siguiente manera:

$$TPDS = \frac{TS}{7}$$

donde: TS = Tránsito Semanal

Volúmenes de tránsito horario

De acuerdo con la hora seleccionada, se definen los siguientes volúmenes de tránsito horarios (en vehículos por hora).

Volumen horario máximo anual (VHMA): Es el máximo volumen horario que ocurre en un punto o sección de un carril, o de una calzada, durante un año determinado. En otras palabras, es la hora de mayor volumen de las 8,760 horas del año.

Volumen horario de máxima demanda (VHMD): Es el máximo número de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril, o de una calzada, durante 60 minutos consecutivos. Es el representativo de los periodos de máxima demanda que se pueden presentar durante un día en particular.

Volumen horario de proyecto (VHP): Es el volumen de tránsito horario que se utiliza para determinar las características geométricas de la vía.

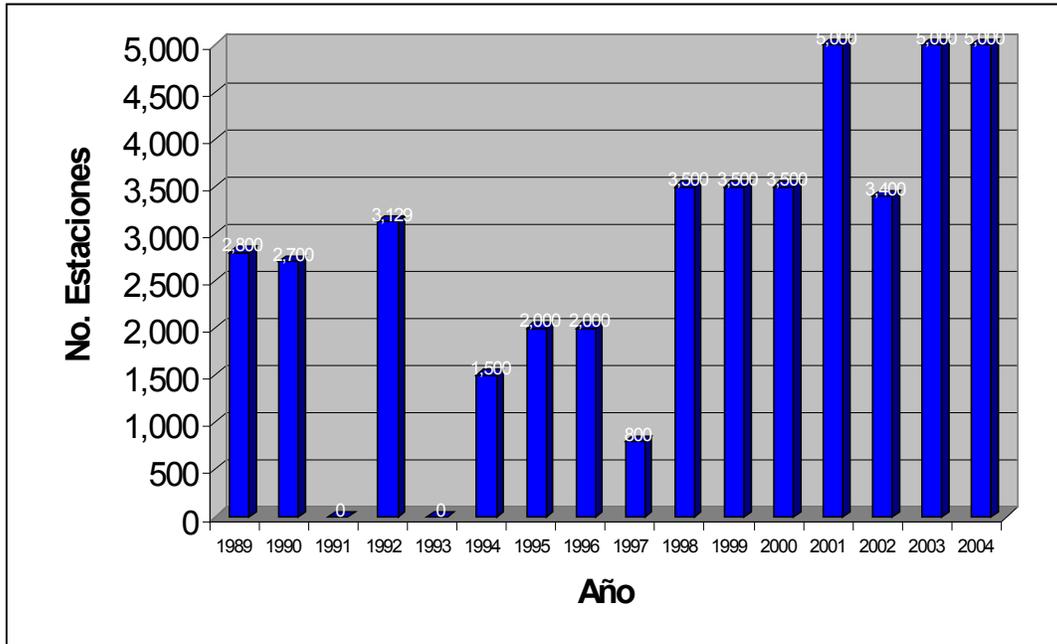
En la mayor parte de las carreteras de cuota interurbana interesa estimar el TDPA porque este puede convertirse muy directamente en recaudación diaria promedio y, por ende, total del año.

La SCT, a través de la Dirección General de Servicios Técnicos, realiza conteos todos los años a fin de tener conocimiento del volumen y tipo de vehículos que circulan en la red de carreteras y con ello determinar el grado de ocupación y las condiciones en que opera cada segmento de la red federal. Esta información se puede obtener de manera impresa a través de las publicaciones Datos Viales de esta Dirección General y de manera electrónica en la página web: <http://dgst.sct.gob.mx>.

Los conteos son obtenidos a través de estaciones de aforo con clasificación vehicular en periodos de siete días, distribuidos en forma estratégica por la red carretera nacional pavimentada.

De acuerdo con estas publicaciones, el número de estaciones utilizadas en el periodo 1989-2004 se presenta en la Figura 6.5.

FIGURA 6.5
Número de estaciones de aforo usadas entre 1989-2004



Fuente. Elaboración propia con datos de las publicaciones Datos Viales de la SCT

Los datos son agrupados por entidad federativa, donde cada estado cuenta con un mapa índice que indica el número que se le asigna a cada carretera para su localización en los listados de información. El contenido de cada uno de los listados se indica en la Tabla 6.4.

Si bien para el caso de las autopistas concesionadas y las operadas por CAPUFE no se conoce el TDPA de manera precisa, sí existe información sobre los volúmenes diarios y mensuales.

TABLA 6.4
Contenido de los listados de información de las publicaciones de datos viales

CAMPO	CONTENIDO
LUGAR	Contiene los nombres de los puntos generadores, tales como ciudades, poblaciones y entronques
Km.	Kilómetro del punto generador antes referido
TE (Tipo de Estación)	Considerando el sentido en que crece el kilometraje en la carretera, el número "1" indica que el aforo fue efectuado antes del punto generador; el "2" que fue realizado en el punto generador; el "3" que el aforo se llevó a cabo después del punto generador
SC (Sentido de Circulación)	El número "1" indica que los datos corresponden al sentido de circulación en que crece el kilometraje del camino; "2" al sentido en que decrece el kilometraje; "0" a ambos sentidos
TDPA	Es el tránsito diario promedio anual del año registrado en el punto generador

CAMPO	CONTENIDO
CLASIFICACION VEHICULAR	Se refiere a los tipos de vehículos que integran al tránsito; ésta se proporciona en porcentaje del TDPA, de acuerdo a la siguiente simbología: A Automóviles B Autobuses C2 Camiones Unitarios de 2 ejes C3 Camiones Unitarios de 3 ejes T3S2 Tractor de 3 ejes con semi-remolque de 2 ejes T3S3 Tractor de 3 ejes con semi-remolque de 3 ejes T3S2R4 Tractor de 3 ejes con semi-remolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes Otros Considera otro tipo de combinaciones de camiones de carga
K'	Factor para determinar el volumen horario del proyecto; el dato que se proporciona es aproximado y se obtiene a partir de relacionar los volúmenes más altos registrados en la muestra del aforo semanal y el TDPA.
D (Factor Direccional)	Este factor se obtiene de dividir el volumen de tránsito horario en el sentido de circulación más cargado entre el volumen en ambos sentidos a la misma hora

Fuente. Datos Viales 2004. SCT

Es común que para las carreteras urbanas no exista información de volúmenes para periodos largos como, por ejemplo, un año. Por lo tanto, es necesario contar con estaciones maestras de aforo permanente o periódico, que permitan determinar factores de expansión y ajuste aplicables a otros lugares que tengan comportamientos similares y en los cuales sólo se efectúe una medición de aforos en períodos cortos.

El ajuste que se usa con mayor frecuencia consiste en transformar un aforo de 24 horas de un día y mes específicos (volumen de tránsito diario, TD_i) a un volumen de tránsito promedio diario, (TPD_i), mediante la siguiente expresión:

$$TPD_i = TD_i (F_m) (F_d)$$

donde:

F_m = factor de ajuste mensual

F_d = factor de ajuste diario

Estos factores se obtienen de la siguiente forma:

$$F_m = \frac{TPDA}{TPDM} \quad \text{y} \quad F_d = \frac{TPDS}{TD}$$

donde:

TDPA = Tránsito diario promedio anual

TPDM = Tránsito promedio diario mensual

TPDS = Tránsito promedio diario semanal

TD = Tránsito diario

Existen diversas formas de obtener los conteos de volúmenes de tránsito, para lo cual se ha generalizado el uso de aparatos de medición de diversa índole. Estas formas incluyen:

- Aforos manuales a cargo de personas, los cuales son particularmente útiles para conocer los volúmenes por carriles individuales y su composición vehicular.
- Aforos por combinación de métodos manuales y automáticos, tales como el uso de contadores mecánicos accionados manualmente por observadores.
- Aforos reobtenidos mediante dispositivos mecánicos, los cuales automáticamente contabilizan y registran los ejes de los vehículos.
- Aforos con utilización de cámaras de video.
- En la Figura 6.6 se muestra un formato para realizar un estudio de aforos manuales.

El período de conteo no debe comprender condiciones en las que se presenten eventos especiales, a menos que se desee estudiar específicamente esa situación. Algunos de los períodos más usados son los siguientes:

Conteos de fin de semana: Cubre el período comprendido entre las 6:00 p.m. del día viernes y las 6:00 a.m. del día lunes.

Conteo de 24 horas: Comprende cualquier período de 24 horas, exceptuando la mañana del lunes y la tarde del viernes, ya que en estos últimos casos existe una gran variación en el comportamiento del tránsito.

Conteos de 7 días: Comprende conteos de 24 horas durante 7 días consecutivos del año, siempre y cuando las condiciones del tránsito se consideren normales.

Conteos de 3 días: Comprende conteos de 24 horas durante tres días consecutivos, preferiblemente martes, miércoles y jueves, de una semana cualquiera.

Conteos de 16 horas: Se realizan normalmente en el período 6:00 a.m. – 10:00 p.m.

Conteos de 12 horas: Se realizan normalmente en el período 7:00 a.m. – 7:00 p.m.

Conteos en períodos pico: Comprenden los períodos de mayor demanda del tránsito.

Conteos en períodos largos: Utilizan contadores mecánicos (electrónicos) de tipo permanente.

FIGURA 6.6

Formato para realizar un estudio de aforos manuales

AFOROS DE TRÁNSITO													
Carretera:						Aforador:							
Ubicación:						Fecha:							
Estación:						Periodo:							
Sentido:						Hoja:		de					

HORA	A	B2	B3	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9 ó más	TOTAL
.00												
.15												
.30												
.45												
.00												
Subtotal:												

HORA	A	B2	B3	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9 ó más	TOTAL
.00												
.15												
.30												
.45												
.00												
Subtotal:												

HORA	A	B2	B3	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9 ó más	TOTAL
.00												
.15												
.30												
.45												
.00												
Subtotal:												

HORA	A	B2	B3	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9 ó más	TOTAL
.00												
.15												
.30												
.45												
.00												
Subtotal:												

A AUTOMÓVIL	C2 CAMION DE 2 EJES	C6 CAMION DE 6 EJES
B2 AUTOBUS DE 2 EJES	C3 CAMION DE 3 EJES	C7 CAMION DE 7 EJES
B3 AUTOBUS DE 3 EJES	C4 CAMION DE 4 EJES	C8 CAMION DE 8 EJES
	C5 CAMION DE 5 EJES	C9 CAMION DE 9 EJES O MÁS

Los contadores automáticos se utilizan para obtener conteos vehiculares en lugares situados a mitad de cuadra o en tramos continuos a campo abierto. En México, los más utilizados son los contadores neumáticos, conformados de una manguera flexible que se coloca en forma transversal sobre la vía, la cual transmite los impulsos de aire ocasionados por la presión al paso del vehículo. Por cada dos impulsos de aire se registra un vehículo. Más tarde es necesario corregir esta estimación de acuerdo con el porcentaje de vehículos de tres y más ejes. Para ello es necesario hacer una clasificación manual, por observación, durante un

período relativamente corto, a menudo cuando se visita el sitio, para confirmar su funcionamiento y descargar el aforo.

Existen otras tecnologías para desarrollar este tipo de aforos, por ejemplo el uso de lazos de inducción, contadores ópticos, láser, etc., que son más confiables en sus resultados, duran más y resisten mejor a los cambios de tiempo. Pero ellos son más usados en sitios permanentes, ya que requieren una mayor inversión en su compra e instalación, descargando la información en forma regular a una base central mediante conexión telefónica celular o radio.

7. ESTIMACIÓN DEL VALOR SUBJETIVO DEL TIEMPO

CONCEPTO DE VST

La teoría en que se basa la valoración del tiempo de viaje tiene como supuesto básico que cada individuo asigna sus recursos con el fin de maximizar su satisfacción personal o utilidad directa.

Un segundo supuesto importante consiste en reconocer que el tiempo constituye un recurso fundamental del que todos los individuos están dotados en la misma cantidad fija (24 horas diarias). De esta manera, pueden asignarlo en distintas formas con el fin de realizar diferentes actividades y esto tiene diversas consecuencias respecto de sus finanzas y el nivel de utilidad que ellos perciben.

No obstante, a diferencia del dinero (que es otro recurso básico) el tiempo no puede ser almacenado y sólo puede ser transferido entre diferentes actividades que sean intercambiables en un momento dado.

Un tercer supuesto fundamental de la teoría, es que distintas asignaciones del recurso tiempo a las actividades que enfrenta un individuo tienen distinto valor y este puede ser medido en dinero. Por esto, las transferencias antes mencionadas tienen valor monetario; esto es, las personas estarían dispuestas a aumentar las horas de trabajo, reduciendo horas de ocio, a cambio de un salario. Del mismo modo, pueden estar dispuestas a usar un modo o una ruta más lenta si es más barata, o a pagar una mayor tarifa por un viaje más rápido.

La función de utilidad directa que los individuos desean maximizar depende, en general, de su gasto en bienes (consumo), del tiempo gastado en realizar distintas actividades (entre ellas trabajar) y de los tiempos y tarifas correspondientes a viajar en alternativas de transporte (modos, rutas) mutuamente excluyentes. Esta función está sujeta a: (i) una restricción de presupuesto monetario; (ii) una restricción de presupuesto temporal; (iii) un conjunto de restricciones de tiempo mínimo para realizar cada actividad.

Se puede decir también que el valor del tiempo depende de la "calidad" del mismo. Puede ser más valioso ahorrar tiempo que es particularmente oneroso (difícil) como esperas en colas, viajar de pie en un autobús muy lleno, etc. En ese sentido los tiempos de viaje en condiciones cómodas se pueden evaluar en una cifra menor que los tiempos gastados en situaciones incómodas.

Al maximizar una aproximación lineal de la utilidad directa sujeto a las restricciones, se puede obtener una expresión para la, así denominada, "utilidad indirecta condicional" (con base a la cual se supone que el individuo elige una determinada alternativa de transporte), V , que sólo depende en forma lineal de los atributos o características de cada alternativa (por ejemplo, tiempo y costo).

En la aplicación empírica de este modelo a la estimación del valor subjetivo del tiempo de viaje (VST), los valores de los coeficientes (pesos) de las variables tiempo y costo corresponden a las utilidades marginales de estos atributos. Así, la razón entre estos coeficientes corresponde a la tasa marginal de sustitución entre el tiempo percibido (por ejemplo, de viaje en el vehículo) y el costo, a utilidad constante, y puede interpretarse como el valor subjetivo del tiempo ahorrado en viajar por la alternativa en consideración (Gaudry et al, 1989⁸). Esto es, si la función de utilidad tiene la forma lineal tradicional (similar al costo generalizado de viaje con signo negativo):

$$V = \theta_t \text{Tiempo} + \theta_c \text{Costo} +$$

entonces el valor subjetivo del tiempo se estima sencillamente como $VST = \theta_t/\theta_c$.

Si la variable costo de viaje se especifica dividida por el ingreso (o más comúnmente la tasa salarial, w), a fin de tomar en cuenta que al aumentar el ingreso el costo del viaje debiera adquirir menos importancia, el valor subjetivo del tiempo queda dado por: $VST = w (\theta_t/\theta_c)$, y en este caso la razón entre los parámetros de tiempo y costo representa el VST como porcentaje del ingreso.

De la misma forma, funciones de utilidades distintas, por ejemplo incorporando parámetros con variaciones sistemáticas en los gustos como se explica en el capítulo 8, darán como resultado VSTs que dependen no sólo de los parámetros de tiempo y costo, sino – potencialmente al menos – de las características socioeconómicas y condiciones del viaje de los individuos encuestados.

Cabe destacar, finalmente, que de acuerdo a esta teoría es razonable suponer que se debieran cumplir, en general, las siguientes proposiciones:

- Dado que el coeficiente del costo de viaje (tarifa) es igual a menos la utilidad marginal del ingreso (por ser la variable dual de la restricción monetaria de presupuesto), su valor debiera decrecer con el ingreso.
- Dado que el coeficiente de la variable tiempo de viaje representa la diferencia entre el valor del tiempo dedicado a viajar en la alternativa y el valor del tiempo de ocio, es lógico esperar que: (i) su valor aumente si las condiciones del viaje son más desagradables, y (ii) su valor sea mayor para individuos más ocupados (dado el mayor valor alternativo del tiempo de ocio).

Además, la teoría supone que el individuo puede transferir libremente tiempos ahorrados en una actividad a otras (por ejemplo, tiempo ahorrado en viajar, a aumentar su tiempo libre), lo que no siempre se cumple en la práctica, ya que distintos individuos pueden enfrentar distintas restricciones adicionales para realizar tales transferencias. Por lo tanto, el valor del coeficiente

⁸ Gaudry, M.J.I., Jara-Díaz, S.R. y Ortúzar, J. de D. (1989) Value of time sensitivity to model specification. *Transportation Research* 23B, 151-158.

de la variable tiempo también será menor mientras mayores sean las restricciones que el individuo enfrente para utilizar el tiempo ahorrado como tiempo libre.

El modelo planteado y las consideraciones económicas adicionales mencionadas, proveen una sólida base micro-económica para modificar la forma tradicional en que se ha estimado el valor del tiempo de viaje, manteniendo la validez de utilizar la razón entre los coeficientes de las variables tiempo de viaje y costo directo en la función de utilidad indirecta como base de dicho cálculo.

La diferencia estriba en que el nuevo enfoque postula realizar un conjunto de segmentaciones del modelo, de acuerdo a las características de los viajeros considerados y las condiciones en que se realizan sus viajes, estimando valores del tiempo para cada segmento.

Este procedimiento debiera mejorar la calidad de las estimaciones realizadas en general, pero también es razonable suponer que pudiera tener algún impacto en el caso de estimaciones efectuadas en países en desarrollo, donde las diferencias en las características socio-económicas de las personas y en las condiciones de viaje en distintas alternativas de transporte son especialmente notorias. Además, es posible analizar empíricamente si los valores de los coeficientes de la función de utilidad estimados para cada segmento planteado son estadísticamente diferentes en todos los casos.

Una primera variable importante a considerar en la segmentación, como representante de las características individuales, es el ingreso. De acuerdo a la teoría, éste debería afectar solamente al valor del coeficiente del costo. Sin embargo, existe la posibilidad de que los individuos de mayor ingreso, dado que tienen en general más oportunidades de realizar actividades diferentes, tengan mayores demandas sobre el tiempo disponible. En tal caso, también sería necesario segmentar la variable tiempo por categoría de ingreso.

Finalmente, debieran considerarse segmentaciones según las siguientes características adicionales:

- Circunstancias en que se desarrolla el viaje, especialmente orientado a cubrir diferencias entre modos o rutas (y extensivo a los tiempos de espera). La segmentación se basa, en este caso, en que el tiempo ahorrado en el viaje debiera tener mayor o menor des-utilidad dependiendo de la comodidad y medio ambiente en que este se realice. Por ejemplo, viajar por una ruta altamente congestionada, con muchas paradas y partidas (y, en general, bajo tensión), o por una ruta altamente peligrosa, es más desagradable que viajar por una ruta expedita y segura.
- Naturaleza de las restricciones de tiempo que afectan al viaje, que están asociadas al propósito del mismo y al período en que éste se realiza. Esta segmentación se basa en que las distintas circunstancias anteriores pueden estar relacionadas con diferentes posibilidades de ahorrar tiempo útil (esto es, que sea utilizable en otras actividades).

- Tipo de persona; esta segmentación pretende capturar diferencias en las alternativas disponibles para usar el tiempo ahorrado en viajar, pero se relaciona también con la facilidad para transferir o reprogramar actividades entre períodos. Variables potencialmente interesantes en este sentido son el sexo, edad y ocupación del viajero.

PREFERENCIAS REVELADAS

En este caso se debe recolectar información sobre viajes actuales. Las preferencias reveladas (PR) corresponden, precisamente, a las elecciones observadas de una muestra de viajeros. Así, lo más importante en este caso es realizar mediciones lo más precisas posibles sobre los niveles de servicio (variables como tiempo de viaje, espera y tarifa) de la alternativa elegida y de todas las posibles alternativas disponibles para un conjunto de viajeros seleccionados, segmentando de acuerdo a los aspectos mencionados en el numeral anterior.

Es importante elegir cuidadosamente el área de estudio para la realización de un trabajo de esta naturaleza. En efecto, se debe procurar que exista variabilidad y diferencias de alguna importancia en los tiempos y costos de viajes por las distintas alternativas para los viajeros considerados. Esto no es siempre fácil de lograr en la práctica.

Por este motivo, parece adecuado plantear la realización de un buen estudio nacional sobre el tema en lugar de buscar estimar VST con datos – posiblemente de menor calidad dadas las típicas restricciones de tiempo y presupuesto – correspondientes al estudio de un proyecto específico.

El tamaño de la muestra debe ser tal que permita estimar un modelo adecuado con estos datos; se ha encontrado en la práctica que muestras no inferiores a las 300 observaciones por estrato suelen ser suficientes (Ortúzar y Willumsen, 2001). Los modelos a utilizar y la forma de estimarlos, se discuten en detalle en el Capítulo 8 de este documento.

PREFERENCIAS DECLARADAS

En este caso a diferencia del anterior, la consideración clave es el diseño adecuado del experimento; esto involucra la elección de un contexto, la selección de un grupo de alternativas y variables, y también de sus posibles niveles de variación.

Las preferencias declaradas (PD) corresponden a elecciones por parte de una muestra de viajeros, por alternativas no existentes en la actualidad (o, por alternativas en que se destaquen variables secundarias o latentes que no es posible medir en la práctica, como seguridad o comodidad). En este sentido, lo más importante es conseguir que los participantes en el experimento “jueguen” seriamente, esto es, que se involucren en el problema y revelen – a través de sus respuestas – sus verdaderas preferencias. Por esto, una condición fundamental del método, es conseguir una experiencia realista y adaptada a la situación de cada viajero.

Así, en este caso el problema no es de medición, sino de diseño. La experiencia internacional en este tema muestra que la etapa de diseño consume más del 60% de los recursos dedicados a la recolección de datos de PD; tareas importantes de esta etapa son:

- Definición del contexto, y selección de las variables de interés y sus niveles de variación esperados; para esto puede ser necesario realizar uno o más grupos focales con personas pertenecientes a los distintos estratos de interés.
- Diseño preliminar del cuestionario, pre-test y revisión; esta etapa debiera permitir detectar errores flagrantes en el diseño, así como inconsistencias u otros problemas que tengan como resultado disminuir el realismo de la experiencia;
- Prueba del cuestionario con grupos focales, a fin de detectar problemas más finos, incluso relacionados con la forma y lenguaje utilizados para plantear las distintas situaciones hipotéticas a los encuestados; la experiencia muestra que en esta parte del trabajo el apoyo de profesionales como psicólogos (para la conducción y análisis preliminar de los grupos focales) y lingüistas (para la selección de la forma más adecuada de plantear las preguntas y redactar las cartas de motivación), puede ser invaluable.
- Prueba piloto en terreno, con una muestra reducida (por ejemplo 50 casos), en que no sólo se verifica la calidad de diseño del cuestionario sino que la forma más apropiada de aplicarlo en terreno.
- Revisión, rediseño y preparación de la encuesta definitiva; en esta fase se puede – además – verificar la recuperación de los parámetros utilizando una muestra simulada (Ortúzar y Willumsen, 2001, Cáp. 3).

Una vez contactados los individuos (lo cual es normalmente caro), se aprovecha para plantearles no una, sino una serie de situaciones de elección. Esto toma tiempo, por lo que no es posible pensar en efectuar este tipo de experimentos a la vera del camino directamente; de otra forma se puede correr el enorme riesgo de recibir respuestas apresuradas, sin la debida ponderación que se busca en este caso. Esta, desgraciadamente, parece ser la forma usual de llevar a cabo este tipo de experimentos en México, lo cual lleva a dudar fuertemente de la calidad de los resultados obtenidos.

Normas de buen diseño y ejemplos de experiencias exitosas en distintas partes del mundo se pueden encontrar en dos referencias básicas (Louviere et al, 2000; Ortúzar, 2000⁹). No obstante, es importante señalar algunos elementos clave:

- Si bien el rango de alternativas a ser presentadas es normalmente fijo, dado el contexto del estudio, es importante tener cuidado de no omitir opciones realistas que pudieran ser utilizadas en la práctica.

⁹ Louviere, J.J., Hensher, D.A. y Swait, J.D. (2000) *Stated Choice Methods: Analysis and Application*. Cambridge University Press, Cambridge.

- El número y naturaleza de los atributos que definen a las alternativas también debe elegirse con el fin de asegurar respuestas realistas; los atributos más importantes (por ejemplo, tiempo y costo de viaje) deben estar presentes, y con valores que parezcan sensatos a los viajeros; no obstante, si se piensa usar más de cuatro atributos puede ser necesario dividir el experimento en dos partes, ya que se sabe que si hay muchos atributos, la dificultad del problema de elección llega a ser tal que puede detonar un mecanismo de selección más sencillo (Caussade et al, 2005¹⁰). Así, en una primera parte se puede incluir al costo y a un máximo de tres atributos adicionales, y en la segunda al costo y a otros tres atributos; la estimación conjunta de un modelo considerando ambos experimentos, resulta en valores consistentes de todos los atributos.
- La selección de la métrica para la mayoría de los atributos es clara (tiempo en minutos, etc.), pero pueden existir factores que requieran una consideración más cuidadosa, como comodidad, seguridad o confiabilidad. Así, por ejemplo, la primera puede hacer referencia a la tasa de ocupación y/o tipo del vehículo, y la última podría ser presentada como una distribución de tiempos de viaje en diferentes días.
- Con relación al número de niveles de variación de los atributos, hay dos aspectos de interés: (i) en virtud de que variables con más niveles pueden ser percibidas como más importantes por los encuestados, es preferible un diseño relativamente “balanceado” en este sentido; (ii) si se desea verificar la existencia de efectos cuadráticos, las variables deben tener al menos tres niveles de variación.
- Finalmente, el número de alternativas, atributos y niveles de variación, tiene una repercusión clara en el número de situaciones de elección que deben ser presentadas a los entrevistados para estimar un modelo adecuado; este número también aumenta si se desea estimar no sólo “efectos principales” (esto es, un modelo lineal en los parámetros), sino que modelos con variables que interactúan entre sí. Desgraciadamente, si este número (o cualquiera de los anteriores) crece sobre un determinado umbral, la complejidad del experimento, y por ende la fatiga y molestia (carga cognitiva) que produce contestarlo correctamente, también crece y puede dañar seriamente los resultados. Caussade et al (2005) estudiaron a fondo este problema, ratificando la conclusión de que no es conveniente presentar simultáneamente más de tres alternativas, que es preferible utilizar un máximo de cuatro atributos y que el número de situaciones de elección ideal está cercano a las 9 ó 10; así, si el diseño exige presentar al encuestado más de 10 situaciones de elección se debe recurrir a un “diseño de bloques”; en este caso se separa el total de situaciones en dos o más grupos, que son presentados a distintos individuos. Es importante que ambos subconjuntos de elecciones sean contestados por similar número de viajeros para evitar sesgos en los resultados.

Una discusión adicional sobre éstos y otros elementos asociados al diseño de experimentos de PD puede encontrarse en Ortúzar y Willumsen, 2001, cap 3).

¹⁰ Caussade, S. Ortúzar, J. de D., Rizzi, L.I. y Hensher, D.A. (2005) Assessing the influence of design dimensions on stated choice experiment estimates. *Transportation Research* 39B, 621-640.

En cuanto a la aplicación del cuestionario diseñado en terreno, esto requiere también enorme cuidado y los posibles problemas debieran ser detectados durante la encuesta piloto. Elementos importantes para conseguir una buena tasa de respuesta son: una presentación atractiva, una carta introductoria motivadora, un buen sistema de recuperación de las encuestas completas (por ejemplo, si se utiliza un sobre prefranqueado, es preferible usar un sello postal atractivo y no un franqueo automático que da la sensación de apuro y poco interés), un premio o incentivo (en países como Chile se ha encontrado que una lotería, en que se sortea un viaje atractivo entre todas las encuestas completas devueltas antes de una determinada fecha, funciona muy bien y tiene un costo muy razonable) y, por supuesto, un diseño que permita responder el cuestionario en la forma más simple posible.

En los puntos de encuesta, que debieran coincidir con aquellos escogidos para recolectar la EOD (ver Capítulo 6), se debe detener típicamente al 10% de los viajeros y efectuarles una encuesta de segmentación (en principio idéntica a la encuesta origen-destino mencionada anteriormente), en que se consulte al menos origen, destino y propósito del viaje, pero que puede incluir datos como rango de ingreso, edad, sexo, educación, ocupación y tipo de vehículo.

Los tres primeros datos sirven para determinar el cuestionario de PD que debe ser entregado (esto es, uno adaptado a las condiciones específicas del viaje); este debe ser adecuadamente foliado para no perder la información de segmentación.

Posteriormente, se debe comparar la distribución de todas las características socioeconómicas y de viaje de la muestra de segmentación, con la de las encuestas PD retornadas (típicamente alrededor del 20 a 30%), para verificar que no existan sesgos; de haberlos, se deben realizar más encuestas de PD hasta conseguir una distribución similar a la de la encuesta de segmentación (que es perfectamente aleatoria si los encuestadores han sido entrenados correctamente).

El proceso descrito permite ver claramente que la preparación e idoneidad de los encuestadores puede, efectivamente, jugar un papel preponderante en la calidad de los resultados de un ejercicio de esta naturaleza.

Una vez obtenidos los datos, la estimación de modelos es análoga a la del caso de PR, y se discute en el Capítulo 8 de este documento.

VST PARA CARGA

En este caso existen dos formas posibles de estimar un VST. La primera, que ha dejado progresivamente de ser utilizada debido a su dificultad y alto grado de subjetividad, se conoce en la literatura como “método del factor de costo”. Consiste en calcular los costos de

transporte en primer lugar, para luego determinar qué ítems de costo varían con el tiempo de viaje, y es aquí donde radica la dificultad/subjetividad del método.

En efecto, en muchas funciones de costo de transporte (o funciones logísticas de costo) sólo la tasa de interés del capital asociado al transporte (“inventario sobre ruedas”) está directamente relacionada con el tiempo de viaje; otras razones para que el tiempo de viaje tenga un valor son la caducidad de los bienes transportados y la necesidad de mantener inventarios de seguridad, para prevenir una interrupción del proceso productivo.

En particular, logísticas del tipo “just in time” implican un alto estándar de requerimiento para los tiempos de viaje y su confiabilidad por parte del sistema de transporte; si este falla, se dispara la necesidad de realizar un costoso envío de emergencia.

En términos más generales, un aumento del tiempo de viaje debido a la congestión durante algún envío puede implicar que ciertos factores de producción (personal, vehículos) no puedan ser utilizados para realizar otros viajes; pero, de la misma forma, una disminución del tiempo de viaje podría liberarlos para otros viajes.

Finalmente, para el transportista el tiempo de viaje tiene valor por el lado de adquirir una buena o mala reputación respecto a velocidad y puntualidad, que afecte su posición competitiva.

Como es claro, entonces, la decisión sobre qué ítems de costo van a variar con el tiempo de viaje es no sólo difícil sino subjetiva; además, no es fácil distinguir entre los impactos de tiempo de viaje propiamente como tal y la confiabilidad del mismo.

La segunda forma de derivar VST para el tiempo de viaje (y que permite, si se desea, también encontrar el valor de la confiabilidad del tiempo de viaje), es usando modelos de elección discreta (de modo o de ruta), estimados mediante información de preferencias (reveladas o, más típicamente, declaradas).

En este caso, sin embargo, el diseño experimental tiene algunas dificultades adicionales sobre el caso de pasajeros, a saber:

- ¿Quién toma la decisión? La mayoría de los estudios se enfoca en las elecciones de embarcadores y operadores, y no de los chóferes (de camión, por ejemplo), aunque estos últimos tienen algún grado de flexibilidad a la hora de elegir la ruta o cambiar de ruta si ocurre algún evento inesperado. No obstante, la elección de modo está en las manos de los gerentes.
- Heterogeneidad, en términos de tamaño y valor del envío, que obliga a segmentar (por modo y posiblemente por tipo de carga) y a diseñar un escalamiento adecuado (vg. valores por tonelada transportada).
- Parte importante de la información necesaria para estimar un buen modelo (en particular la información de costos logísticos) puede ser confidencial, y por ende existen

muy pocos datos disponibles sobre elecciones observadas y los factores que influyen en las decisiones; lo cual refuerza la práctica de hacer estudios de PD para estos efectos.

Si este es el caso, resulta conveniente efectuar entrevistas en el lugar de trabajo con el apoyo de microcomputadores, a los gerentes de operación (en el caso de grandes empresas) o al gerente (en el caso de empresas pequeñas), de empresas de transporte de carga.

La entrevista debe comenzar preguntando datos generales de la empresa (marco de referencia) y detalles operacionales; esto sirve para clasificar la empresa (vg. fleteros y operadores de carga propia, por tamaño de la flota, etc.).

Luego se debe pedir enfocarse en un envío típico, solicitando detalles sobre éste (tipo de producto, distancia, costo, importancia de la puntualidad en la entrega, etc.) e indicar la ruta escogida.

Con estos datos se puede diseñar un experimento de PD con atributos como: tiempo de viaje, costo de viaje, información sobre demoras (por ejemplo, con señalización variable) y posibilidad de una demora inesperada de 30 min. o más.

Posteriormente es conveniente preguntar si existe una ruta alternativa (por ejemplo, si la primera era por autopista, una ruta que no lo sea) y cuáles serían los tiempos y costos que se experimentarían si se enviara la carga por ella; también se debe preguntar las dos razones más importantes para seleccionar la ruta elegida.

Finalmente, se debe pedir completar un ejercicio tiempo/costo de preferencias declaradas, basado parcialmente en la información anterior.

Con estos datos se pueden estimar VST que consideren tipo de carga, longitud del viaje y tipo de operador, tal como en el caso de transporte de pasajeros.

DISTRIBUCIÓN DE VST'S

Existe amplia evidencia respecto a que el VST varía con las características de los individuos en la población estudiada. Para encontrar esta distribución se puede recurrir a diversas metodologías. La más compleja considera la estimación de modelos de tipo logit mixto (ML), en que se acepta la posibilidad de que los coeficientes de las variables tiempo de viaje y costo (en la versión más general), distribuyan en forma aleatoria en la población; esto, sin embargo, conlleva una serie de problemas de interpretación que aún no se han resuelto de forma satisfactoria en la comunidad científica.

Una versión más simple consiste en modelar la situación en estudio con un modelo más tradicional, como el logit multinomial (MNL), o el logit jerárquico (NL), que suponen parámetros fijos para todos los individuos, incorporando la posibilidad de "variaciones

sistemáticas en los gustos”, a través de la especificación de funciones de utilidad en que las variables de nivel de servicio (tiempo y costo) interactúan con variables socio-económicas, dando lugar a la estimación de VST diferente para distintos estratos poblacionales (por ejemplo, varones de ingreso medio en familias sin acceso a auto con nivel de educación medio).

Esto se logra simplemente especificando funciones de utilidad lineales de la forma (Ortúzar y Willumsen, 2001, pág. 261):

$$V_{iq} = \left(\alpha_0 + \sum_l \alpha_l s_{lq} \right) t_{iq} + \left(\beta_0 + \sum_l \beta_l s_{lq} \right) c_{iq} + \dots$$

donde:

s_{lq} son variables mudas referidas a estratos l de una o más características socio-económicas (por ejemplo, edad, sexo, ingreso, etc.) del individuo q .

En el capítulo siguiente se discute en detalle la especificación y estimación de los distintos modelos mencionados en esta sección.

PROYECCIONES DE VST EN EL TIEMPO

En la literatura especializada se ha discutido muy poco el tema de cómo cambia el VST en el tiempo. La limitada evidencia disponible sugiere la existencia de una relación no lineal entre VST e ingreso y, de hecho, esto se ha utilizado para sugerir ajustes del VST en el tiempo dependiendo de cambios anticipados en el ingreso.

En Inglaterra, por ejemplo, tradicionalmente se ha supuesto que el VST es directamente proporcional al ingreso y que, por lo tanto, una corrección adecuada del VST en el tiempo consistía en escalarlo en proporción al aumento esperado del ingreso.

Sin embargo, los resultados del último (y muy completo) estudio del tema en el Reino Unido en 1995, que son consistentes con lo encontrado previamente en otro gran estudio en Holanda, sugieren que el ajuste no es directamente proporcional sino que la elasticidad VST-ingreso es del orden de 0.5.

Este último resultado es consistente con la relación de raíz cuadrada propuesta por Waters (1993) en su meta estudio basado en resultados correspondientes a diferentes países desarrollados¹¹. En efecto, en ese estudio se propone utilizar la siguiente fórmula:

$$VST_t = (I_t / I_{t-1})^{0.5} VST_{t-1}$$

¹¹ Waters, W.G. (1993) The value of travel time savings and the link with income: implications for public project evaluation. *Working Paper ITS-WP-93-18*, Institute of Transport Studies, University of Sydney.

donde I es ingreso y t el instante de tiempo (notar que la fórmula también se puede aplicar en un año determinado, para obtener el VST de un grupo particular de ingreso conocido el ingreso promedio y el VST de la población). Así, si se espera que el ingreso aumente cuatro veces entre el año base y el de diseño, el VST futuro sería dos veces superior al del año base.

CONSIDERACIONES DE LA PRÁCTICA INTERNACIONAL

La estimación de valores subjetivos del (ahorro) tiempo es de gran importancia no sólo para hacer estudios de carreteras de cuota sino también para la evaluación socio-económica de proyectos de transporte. Es por ello que la mayor parte de los países desarrollados realizan con una cierta periodicidad estudios de este tipo a nivel nacional.

Estos estudios a menudo se realizan cada 10 ó 15 años, con el objeto de obtener valores subjetivos del tiempo y valores de equidad para la evaluación, bajo una cantidad de condiciones diferentes. Algunos de los estudios más importantes han sido realizados en Gran Bretaña, Holanda y Nueva Zelanda en los cuales se han logrado importantes avances teóricos y prácticos. También se han realizado importantes estudios en Chile y Brasil.

En estos estudios se ha encontrado, por ejemplo, que los VST pueden variar con:

- Región del país
- Nivel de ingreso
- Propósito de viaje
- Diseño de la carretera (o del medio de transporte)
- Calidad de la carretera y su superficie de rodado; gradiente, número de calzadas
- Desplazamientos largos o cortos

Si bien estas distinciones a menudo son útiles, no es posible obtenerlas si se realiza un estudio de PD y/o PR para cada proyecto.

Dado que la aplicación de técnicas de PD y PR para este tipo de estudios es delicada y compleja, el número de especialistas capaces de abordar estos estudios es limitado y conocido.

No existen razones por las cuales sea necesario realizar estudios de VST para cada proyecto. Por el contrario, parece muy deseable y recomendable realizar un estudio bastante completo y de muy buen nivel, que permita ofrecer los VST's para cada región de un país y utilizar estos valores en todos los estudios de carreteras de cuota y su evaluación, al menos por unos 10 años.

8. MODELOS LOGIT DE ELECCIÓN

NATURALEZA DE LOS MODELOS

Los modelos de elección discreta utilizados para predecir la demanda en el caso de transporte se basan en la teoría de la utilidad aleatoria (ver por ejemplo, Ortúzar y Willumsen, 2001, Cap. 7). En esta teoría, la utilidad U_{iq} de la alternativa A_i para el individuo q está representada por la suma de una componente “representativa”, “sistemática” u observable, V_{iq} , más un término de error ε_{iq} .

La primera componente incluye todos los atributos considerados por el modelador (variables de nivel de servicio y características socio-económicas de los individuos) y es una función, típicamente lineal como se discutió en el Capítulo 7, de los parámetros θ a ser estimados. El segundo término se debe a la incapacidad del modelador para considerar todas las variables que influyen en la decisión del individuo, y a la existencia de otros elementos tales como errores de medición, idiosincrasias e incluso percepciones erróneas.

Es posible derivar distintos modelos de elección dependiendo de las hipótesis que se hagan respecto a la distribución de los términos de error. Una adecuada revisión de los modelos disponibles en esta línea está disponible en castellano en Ortúzar (2000¹²).

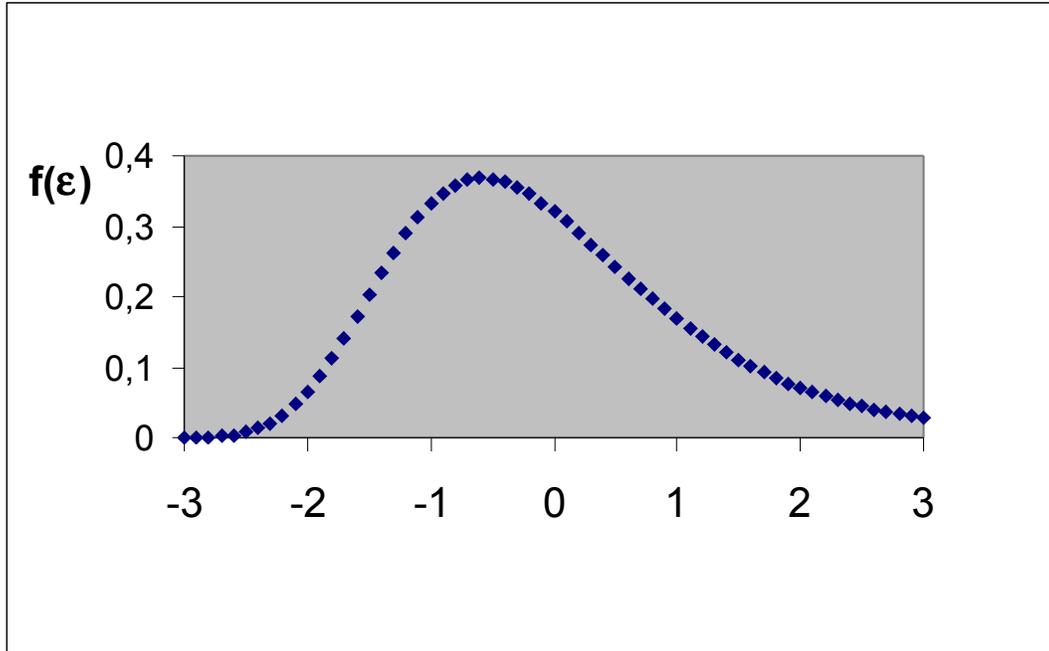
No obstante, dentro de este contexto teórico los modelos más ampliamente usados durante los últimos 30 años han sido el modelo logit multinomial (MNL) y el modelo logit jerárquico (NL). El primero asume que todas las alternativas son independientes y que los errores ε_{iq} distribuyen idéntica e independientemente (IID) Gumbel con la misma varianza desconocida σ^2 .

Esta distribución de probabilidad es muy similar a la distribución Normal pero tiene una importante ventaja en este caso: es cerrada respecto a la suma algebraica, esto es, el máximo de dos variables Gumbel independientes y con igual varianza, también distribuye Gumbel. La Figura 8.1 muestra la forma de la distribución que se caracteriza, además, por que la media

está dada por $\eta + \frac{\gamma}{\beta}$, donde γ es la constante de Euler ($\gamma \approx 0.577$), η es la moda y β el factor de escala de la distribución.

FIGURA 8.1
Función de densidad Gumbel para $\beta = 1$ y $\eta = -0.577$

¹² Ortúzar, J. de D. (2000) *Modelos Econométricos de Elección Discreta*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago.



El modelo tiene una forma cerrada particularmente simple, y eso explica en parte su gran popularidad:

$$P_{iq} = \frac{\exp(\beta V_{iq})}{\sum_{A_j \in A(q)} \exp(\beta V_{jq})}$$

donde $A(q)$ es el conjunto de alternativas disponibles para el individuo q y el parámetro β está inversamente relacionado con la varianza desconocida de los errores a través de la expresión:

$$\beta^2 = \frac{\pi^2}{6\sigma^2}$$

Es importante señalar que en la aplicación práctica del modelo el factor de escala β no es estimable y debe normalizarse (típicamente suponiéndolo igual a uno); esto no tiene consecuencias en los resultados. De hecho, todos los modelos de elección discreta tienen un grado de "identificabilidad" en este sentido.

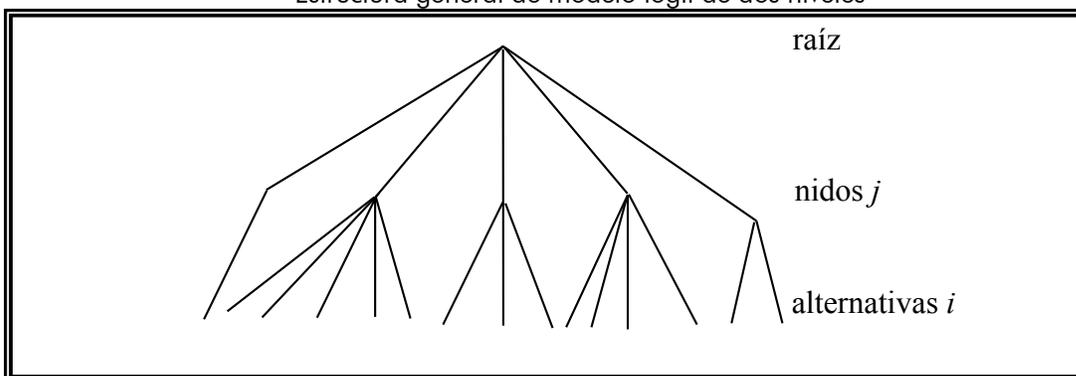
Dadas las hipótesis requeridas para generar el modelo, éste puede comportarse incorrectamente en ciertas instancias; en particular, esto ocurre si las alternativas están correlacionadas, si la hipótesis de igual varianza de los errores no se sostiene o si hay variaciones en los gustos (esto es, si los parámetros $\underline{\theta}$ de la función de utilidad varían en la población).

El modelo NL, por otro lado, fue desarrollado con el fin de relajar la hipótesis de independencia entre todas las alternativas; para esto se modela la “similaridad” entre opciones agrupadas en nidos o jerarquías, a través de la correlación de sus componentes de error. Esto permite distintos patrones de sustitución al interior de y entre los nidos.

Debido a su simpleza computacional y teórica, el NL se transformó en una herramienta sumamente útil en contextos tales como elección modal incluyendo varios modos de transporte público, o en elecciones conjuntas de destino y modo de transporte. En estos casos ciertamente ocurre que algunas alternativas son más similares entre sí que otras y el MNL podría conducir a malos resultados.

La Figura 8.2 presenta una estructura de árbol NL que es totalmente general para los efectos de esta presentación. Aún cuando el modelo no tiene límites respecto a la cantidad de nidos en serie o paralelo que puedan postularse, la estructura es lo suficientemente general como para que todas las conclusiones que se puedan extraer sean extensibles a mayor número de niveles.

FIGURA 8.2
Estructura general de modelo logit de dos niveles



La especificación más popular del modelo logit jerárquico en la práctica es con dos niveles y diferentes parámetros de escala λ_j en cada uno (Figura 8.2), cuya forma funcional está dada por:

$$P_{ij} = \frac{\exp(\lambda_j V_{i/j}) \cdot \exp \beta \left\{ \frac{1}{\lambda_j} \log \left(\sum_{i \in j} \exp(\lambda_j V_{i/j}) \right) \right\}}{\sum_{i \in j} \exp(\lambda_j V_{i/j}) \cdot \sum_{j'=1}^m \exp \beta \left\{ \frac{1}{\lambda_{j'}} \log \left(\sum_{i \in j'} \exp(\lambda_{j'} V_{i/j'}) \right) \right\}}$$

En esta expresión nuevamente aparece un problema de “identificabilidad”, ya que no es posible estimar a β y λ simultáneamente. Lo que si se puede estimar es su razón ϕ , por lo que

la expresión anterior normalmente se escribe haciendo a $\beta = 1 = 1$ y reemplazando a λ por $1/\phi$.

El modelo NL y sus condiciones estructurales (ver Anexo), permiten modelar un amplio rango de procesos de elección, tales como localización y modo de transporte, o contextos multimodales que sugieren distintos grados de sustitución (respuesta a políticas) dentro y entre nidos.

Un último modelo de la familia logit, reconocido como el modelo del futuro, pero aún en etapa de desarrollo, es el modelo logit mixto (ML). En este caso la función de utilidad de la opción A_j para un individuo q en la situación t , está dada por:

$$U_{jqt} = \theta_q X_{jqt} + \varepsilon_{jqt}$$

donde, como antes, X_{jqt} es un vector de variables observables, pero ahora θ_q es un vector de coeficientes no observados para cada individuo, que varía en forma aleatoria de acuerdo a sus gustos. Igual que en el MNL, ε_{jqt} es un término aleatorio no observado, idéntica e independientemente distribuido (IID) Gumbel, e independiente de θ_q y de X_{jqt} .

Así, esta especificación es igual a la de un MNL, excepto que los coeficientes θ_q no son fijos sino que varían en la población; la varianza en θ_q induce correlación en la utilidad sobre opciones y situaciones. En el Anexo se describe este modelo y sus propiedades en mayor detalle.

Previo a su utilización en predicción de demanda, cualquiera sea el modelo logit que se decida utilizar debe ser calibrado para que reproduzca lo más cercanamente posible las condiciones observadas en el contexto a ser modelado. En el Anexo se presenta, con bastante detalle, la forma de estimar los parámetros de este tipo de modelos cuando se dispone de información desagregada, esto es, a nivel de una muestra de personas.

No obstante, en muchas ocasiones se dispondrá de valores para los parámetros que definen la función de utilidad (V) o costo generalizado, como el valor subjetivo del tiempo, y la calibración consistirá sólo en estimar el factor de escala β y las constantes específicas de cada alternativa en competencia.

Si se dispone de datos agregados, esto es, proporciones de viajeros usando cada alternativa (por ejemplo, distintos modos o distintas rutas), los parámetros del modelo se pueden calibrar usando regresión lineal tras aplicar la conocida transformación de Berkson-Theil¹³:

$$\log\left(\frac{P_1}{1-P_1}\right) = \beta(CG_2 - CG_1) + \beta \cdot \delta$$

¹³ Ortúzar y Willumsen (2001, op. cit., pág. 208).

en que P_i es la proporción de mercado de la alternativa i , CG_i su costo generalizado, β el factor de escala y δ la constante específica de la alternativa 2 suponiendo que la primera alternativa no tiene constante (es la alternativa de referencia). Si hay más de dos alternativas la expresión anterior es un poco más complicada.

9. MODELOS DE ASIGNACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se discuten diferentes aspectos de los modelos de elección de ruta y asignación de matrices a la red. Este es el submodelo más importante en la mayor parte de los estudios complejos sobre carreteras de cuota, es decir, donde se hace necesario representar una red de arcos viales que permitan conectar orígenes y destinos.

En este capítulo mostramos cómo las rutas que los conductores escogen para viajar entre dos puntos difieren y las razones para ello. De estas razones se desprenden diferentes tipos de modelos de asignación, con una o más categorías de usuarios. Se presentan, también, técnicas para la calibración y validación de estos modelos dentro del contexto de modelación de carreteras de cuota.

PRINCIPIOS DE ASIGNACIÓN DETERMINÍSTICA Y ESTOCÁSTICA

Si consideramos una red de carreteras en una situación dada, con costos y tiempos en cada segmento, existirá siempre una ruta más corta (en términos de costos generalizados) para cada par O-D. Asignar a todos los viajeros entre O y D a esa ruta, constituye el método de asignación de tráfico más sencillo y recibe el nombre de "todo-o-nada", ya que sólo una ruta es usada para cada par O-D.

Los paquetes computacionales son muy rápidos para determinar estas rutas mínimas y realizar esta asignación sencilla. Sin embargo, hay un par de problemas con este sencillo método. El primero, es que podemos terminar asignando más tráfico a una carretera que su capacidad. El segundo, aún más importante, es que los conductores no se comportan de esa manera en la práctica.

De hecho, es común observar que diferentes conductores pueden elegir distintas rutas para unir dos puntos A y B. Esta dispersión de rutas puede deberse a una o más de las siguientes razones:

- Diferencias en los objetivos que cada uno tiene al elegir ruta; por ejemplo un conductor quiere minimizar tiempos mientras que otro desea minimizar distancias y costos.
- Diferencias en las percepciones de los atributos de las distintas rutas. Las personas no saben estimar tiempos y distancias con gran exactitud, y por lo tanto pueden cometer errores en sus apreciaciones, aún cuando todos quisieran lograr lo mismo. Imperfecciones en la información disponible de cada individuo son parte de este problema.
- Congestión en uno o más arcos hace que las personas busquen alternativas para evitar cuellos de botella.

La primera de estas razones puede modelarse identificando los diferentes grupos de usuarios que aproximadamente compartan objetivos en la selección de ruta. Estos tipos (o clases) de usuarios pueden tener distintos costos de operación (autos, autobuses, camiones de distinto tamaño) o simplemente valorizar los ahorros de tiempo de viaje de diferente manera. Esta distinción genera modelos de asignación de tráfico con múltiples clases de usuarios.

La segunda razón requiere, en principio, modelar estas imperfecciones en la información disponible¹⁴. Para ello se pueden emplear modelos estocásticos que reconocen que los costos de cada segmento no son percibidos con exactitud.

La tercera razón tiene relación con las restricciones de capacidad y la congestión. A medida que algunas rutas se congestionan (sus volúmenes se acercan a la capacidad de las mismas), los tiempos de viaje por ellas crecen y hacen más atractivas otras rutas alternativas.

A medida que crece la tasa de motorización los problemas de congestión, que predominan ahora en las ciudades, se irán extendiendo a la red interurbana de carreteras.

Estos modelos se encuentran descritos con algún detalle en Ortúzar y Willumsen (2001). Aquí nos referiremos sólo a sus aspectos prácticos con respecto a las carreteras de cuota.

MODELOS DE ASIGNACIÓN ESTOCÁSTICOS

Hay dos familias de modelos estocásticos disponibles en los paquetes computacionales existentes. La primera se basa en métodos de simulación de Monte Carlo¹⁵ mientras que la segunda en métodos proporcionales de elección entre rutas alternativas.

Los métodos de Monte Carlo suponen que los usuarios perciben una distribución de costos para cada arco, en lugar de un solo valor. Por ello, el método de Burrell por ejemplo, realiza un muestreo aleatorio de esas distribuciones y efectúa varias asignaciones simples (todo-o-nada), cada una con una muestra diferente de costos para cada uno de los arcos.

Con esto, se obtienen diferentes rutas para cada par O-D en cada caso y por lo tanto una dispersión de viajes sobre ellas.

Los métodos proporcionales identifican puntos de elección de rutas (nodos donde rutas se separan) y asignan tráfico a cada ruta potencial en proporción a sus costos generalizados relativos. Estos métodos usan diferentes heurísticas para identificar un número manejable de rutas potenciales ya que estas son, en principio, un número muy grande.

¹⁴ En la actualidad, esto es mientras no exista información en tiempo real acerca de todas las rutas alternativas, un usuario conoce sólo relativamente bien las condiciones de las últimas rutas que tomó en el pasado y debe asumir que estas condiciones no han cambiado.

¹⁵ Estos métodos utilizan números aleatorios o pseudo aleatorios para representar la variabilidad de la realidad. De allí el nombre Monte Carlo, como referencia a la aleatoriedad de los números de una ruleta.

A pesar de sus atractivos, no recomendamos el uso de métodos estocásticos para la modelación de carreteras de cuota. Las razones para ello son:

- Los métodos estocásticos, en particular los proporcionales, son muy sensitivos a la forma en que se codifica la red pudiendo generarse comportamientos patológicos difíciles de racionalizar.
- Los métodos de simulación, al usar números aleatorios, producen resultados que dependen, en principio, de la semilla aleatoria utilizada.

Por estas dos razones, aunque estos métodos producen una dispersión de rutas que parece realista, hacen la interpretación de los resultados difícil y poco confiable. Es por ello que se recomienda utilizar métodos de asignación de equilibrio con múltiples usuarios para producir la dispersión de rutas de interés.

ASIGNACIÓN DE EQUILIBRIO DEL USUARIO

La asignación de equilibrio trata de modelar condiciones en que los viajeros tratan de encontrar sus mejores rutas en cada caso. Continúan su búsqueda hasta que encuentran la mejor ruta (esto supone que se busca esta ruta óptima con alguna regularidad, por ejemplo diariamente al trabajo durante la semana laboral). Wardrop expresó esta búsqueda como su Primer Principio:

En las situaciones de congestión se logran condiciones de equilibrio cuando ningún viajero puede reducir sus costos de viajar cambiándose de ruta.

Si todos los viajeros perciben los costos en la misma forma (por ejemplo, dentro de una categoría de usuario), este principio puede presentarse como:

En las situaciones de congestión se logran condiciones de equilibrio cuando todas las rutas en uso para cada par O-D tienen el mismo costo y las que no se usan tienen un costo igual o mayor.

Es posible demostrar que este equilibrio de Wardrop tiene ventajosas propiedades en cuanto a convergencia de algoritmos a una solución única. Para ello se requiere que la función flujo-costos generalizado sea monotónicamente creciente.

Si definimos la función flujo-costo generalizado para el arco a y volumen V_a como

$$c_a(V_a)$$

δ_{ijr}^a toma el valor 1 si la ruta r entre i y j pasa por el arco a , y cero si no pasa, entonces el volumen en el arco a en función de la matriz de viajes T_{ijr} viene dado por

$$V_a = \sum_{ijr} \delta_{ijr}^a T_{ijr}$$

El costo de viajar por la ruta r se puede expresar como

$$C_{ijr} = \sum_a \delta_{ijr}^a c_a(V_a)$$

Se puede demostrar que encontrar la solución de equilibrio de Wardrop es equivalente a resolver el siguiente programa matemático:

$$\text{Minimizar} \quad Z\{T_{ijr}\} = \sum_a \int_0^{V_a} c_a(v) dv$$

Sujeto a las restricciones:

$$\sum_r T_{ijr} = T_{ij}$$

y

$$T_{ijr} \geq 0$$

Este programa matemático tiene una solución única si la función flujo-costo es monótonicamente creciente (no baja el costo al subir el flujo). Es esta propiedad, la unicidad de la solución al equilibrio de Wardrop, que hace particularmente atractivo este tipo de modelo de asignación.

Las imperfecciones en la información disponible para los usuarios y la presencia de viajeros sin experiencia en una zona, son los factores más importantes que impiden la consecución del equilibrio en la práctica. Sin embargo, las soluciones de equilibrio pueden ser la mejor aproximación disponible, en particular si se cuenta con al menos seis (6) y preferentemente diez (10) ó más tipos de usuarios.

ASIGNACIÓN CON DIFERENTES CLASES DE USUARIOS

La extensión del equilibrio de Wardrop a múltiples clases de usuarios es relativamente sencilla y disponible en todo paquete computacional moderno.

Recomendamos utilizar al menos seis tipos de usuario de automóviles, uno de los cuales debe incorporar a aquellos viajeros cuyos costos de transporte son cubiertos por la empresa en que trabajan. Se recomienda emplear al menos cuatro categorías de vehículos de carga, al menos dos de los cuales representen empresas pequeñas (hombre-camión) con una baja disponibilidad a pagar cuota para utilizar una mejor carretera.

Se recomienda asignar estas 10 categorías simultáneamente; es decir, no se recomienda pre-asignar el transporte de carga independiente del resto del tráfico para luego asignar a los automóviles.

Sin embargo, se podrá pre-cargar a los autobuses de larga distancia si fuera necesario.

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE ASIGNACIÓN

La calibración de la red de carreteras y la asignación, se debe hacer utilizando una combinación de técnicas de depuración de redes y experiencia del modelador. Existen siempre varios arcos, en la realidad, cuya inclusión en la red de modelación no es necesariamente obvia; por ejemplo, muchos arcos de la red secundaria de México. Debe recordarse que para obtener buenos flujos representativos a un nivel de la red (red primaria por ejemplo), es necesario incluir en el modelo el nivel inferior también. Pero esto no siempre es posible ni práctico.

La tarea de calibrar una red de carreteras requiere:

- Asegurarse que todos los arcos necesarios se encuentran representados
- Utilizar la mejor y más realista función de flujo-tiempo de viaje
- Adoptar una versión realista de los costos de operación de los distintos vehículos
- Representar los costos adicionales de las cuotas/peajes correctamente, es decir, como un costo monetario y no una demora adicional en tiempo
- Asegurarse que se utilizan suficientes categorías de usuarios y que estas tienen un VST apropiado en el modelo
- Estar seguros que las matrices utilizadas son realistas, y si han sido obtenidas de otros modelos (distribución, elección modal) que no sean los errores en los modelos los que impidan la calibración de la red.

La tarea final de calibrar el modelo de asignación requerirá comparar los volúmenes que resulten de los modelos con los observados en la práctica. Estos podrán agregarse en líneas pantalla o cordones pero el test final y más difícil, es la comparación con flujos arco por arco. Esto es razonable ya que serán los flujos en cada arco de la carretera de cuota los que determinarán la recaudación futura.

Ponemos especial énfasis en emplear la experiencia de los modeladores de las empresas consultoras para producir redes balanceadas antes de aplicar cualquier método de corrección de matrices, o de calibración de redes como el método de Hookes & Jeeves¹⁶. Existen varias técnicas para depurar estas redes antes de la calibración; estas incluyen:

- Cargar la red con una matriz unitaria (un viaje en cada celda) para determinar cuántos pares O-D usan cada arco; esto permite un primer test de conectividad y de elección de rutas.
- Comparar los tiempos de viaje en el modelo con los valores obtenidos en las observaciones independientes; corregir por flujo actual si es necesario.
- El uso de formatos gráficos es muy importante en el proceso de depuración de la red. Se deben utilizar las facilidades de los paquetes comerciales como Emme/2 para desplegar árboles y rutas mínimas entre puntos, para confirmar también que la conectividad utilizada es razonable.
- Todos los paquetes modernos cuentan con un editor interactivo de redes lo que facilita enormemente las tareas de depuración de los arcos de las mismas.

Una vez depurada la red tanto como sea posible y asignándole a ella las relaciones flujo-tiempo de viaje y costos de operación que corresponda, será necesario probar la asignación de la matriz, idealmente observada, del año base; es decir, todavía sin la nueva carretera. Una vez obtenida esta asignación se debe comparar flujos y tiempos de viaje con observaciones independientes del año base.

Una manera sencilla de mostrar los resultados es consignar en un gráfico las observaciones en el eje horizontal y los resultados del modelo en el vertical, ajustando una recta de mínimos cuadrados a los puntos correspondientes. Esto puede hacerse fácilmente en Excel para flujos y tiempos de viaje.

Es importante que la recta muestre, en orden de importancia:

- Un valor de la pendiente muy cercano a uno para mostrar que no hay sesgos
- Un valor del intercepto muy cercano a cero
- Un buen valor de R2, por ejemplo mejor que 0.7

La comparación de volúmenes de tráfico en arcos, puede hacerse sobre la base de flujos horarios. Hay dos indicadores utilizados frecuentemente en este campo: GEH¹⁷ y RMSE.

¹⁶ Álvarez, R. (1995) Calibración de redes de transporte: comparación de los métodos Binivel y Hookes & Jeeves. *Actas del Séptimo Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. Santiago.

¹⁷ <http://www.answers.com/topic/geh>

El indicador GEH tiene la ventaja de tomar en cuenta el error relativo y de no depender de valores nulos que pueden aparecer, por ejemplo, en celdas de una matriz de viajes. Se define como:

$$GEH = \sqrt{\frac{(O_i - E_i)^2}{0,5 \cdot (O_i + E_i)}}$$

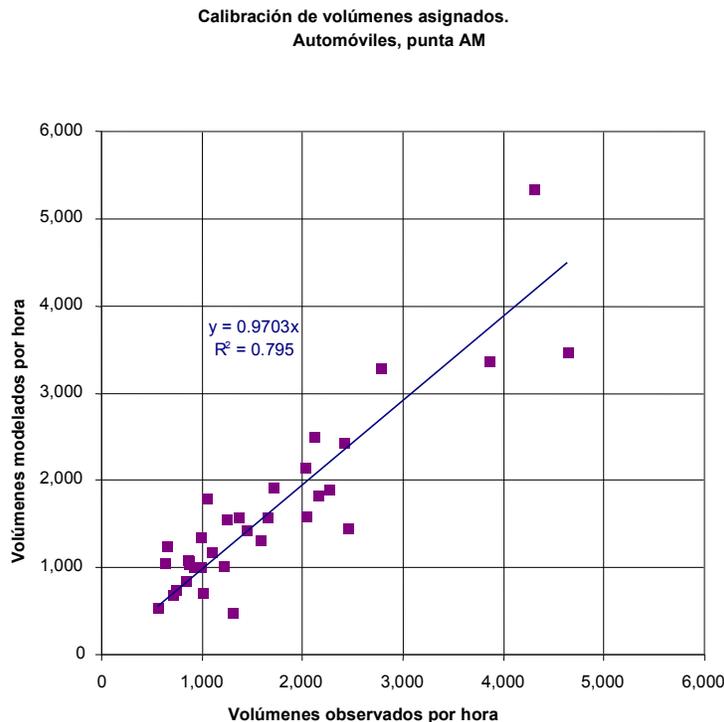
donde:

O_i : valores observados de una variable, por ejemplo conteos horarios en un arco i

E_i : valores modelados o estimados de la misma variable, por ejemplo volumen horario en el arco i

La Figura 9.1 ilustra un gráfico para volúmenes modelados y observados. La comparación de volúmenes muestra un R^2 de 0.795 y una pendiente de 0.97.

FIGURA 9.1
Comparación de volúmenes observados y modelados



Generalmente se acepta que un modelo de asignación de tráfico estará satisfactoriamente calibrado si:

- Al menos el 60% de los arcos tienen un GEH inferior a 5.0.
- El 95% de los arcos tienen un GEH inferior a 10.0.
- Todos los arcos tienen un GEH inferior a 12.0
- En las comparaciones en líneas de pantalla se espera un GEH inferior a 4.0

El indicador %RMSE (Percentage Root Mean Square Error, o raíz cuadrada del error cuadrático porcentual) se aplica a la red completa de observaciones. Se define como:

$$\%RMSE = 100 \sqrt{\frac{\frac{\sum (E_i - O_i)^2}{Nobs - 1}}{\frac{\sum O_i}{Nobs}}}$$

donde Nobs es el número de observaciones (aforos en este caso).

Generalmente se requiere que %RMSE sea inferior a 30%.

VALIDACIÓN DE MODELOS DE ASIGNACIÓN

La validación de los modelos requiere comparar las salidas de los mismos con datos que no hayan sido utilizados en la calibración. En ese sentido, el modelo de asignación que ha sido calibrado de la manera señalada no ha utilizado directamente los aforos de tráfico, sólo los ha usado para guiar la calibración y comparar sus resultados.

Sin embargo, para asegurar el proceso, es preferible separar un 10% de los aforos y comparar los resultados del modelo con ellos separadamente, realizando así una validación más rigurosa.

Los mismos valores críticos señalados más arriba deberían cumplirse con este 10% de los aforos.

10. MODELOS DE ELECCIÓN DE MODO Y DESTINO

MODELOS CONJUNTOS DE ELECCIÓN: FRECUENCIA, DESTINO Y MODO DE VIAJE

En los últimos años ha sido posible constatar que, particularmente en el caso interurbano, la mejor práctica ha dejado de usar al “viaje” como unidad básica de modelación, prefiriéndose el uso de “tours” (definidos como una serie de viajes encadenados que comienzan y terminan en la misma localización). Un enfoque basado en tours provee una representación del comportamiento de los viajeros de mayor calidad en varios de los componentes de un sistema de modelación de la demanda y oferta de transporte. De hecho, como ventajas específicas del enfoque basado en tours (EBT) se han citado las siguientes¹⁸:

- El EBT modela la elección de destino y de modo de transporte en función de las condiciones de la red, tanto de la ida como la vuelta del tour, en tanto que en el enfoque basado en viajes (EBV) se modela cada porción en forma independiente.
- El EBT modela la elección de modo de transporte para todo el tour; así, si una persona maneja hacia su destino, es altamente probable que maneje de vuelta a su hogar; esta relación se ignora en el EBV.
- El EBT asegura la consistencia modal de viajes no basados en el hogar; por ejemplo, viajes en auto de esta naturaleza sólo pueden ser efectuados por viajeros que previamente hayan viajado en auto a su destino.

Por otro lado, la principal desventaja de usar tours como unidad de medida en modelos predictivos es la poca familiaridad asociada al uso de este enfoque en la práctica nacional. Una segunda desventaja potencial (aunque debiera transformarse en una ventaja a la larga), es que este enfoque exige que los datos de la encuesta origen-destino sean de mayor calidad y contengan información más completa sobre el viaje realizado.

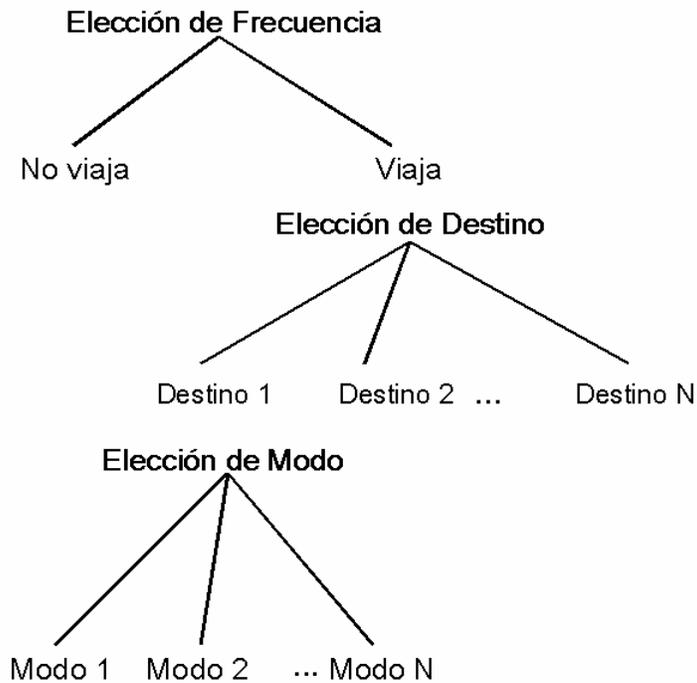
Por lo tanto, se recomienda continuar utilizando a los viajes como unidades fundamentales y esperar a que la metodología de tours pruebe su valor, no sólo en estudios de demanda, sino también para carreteras de cuota.

En los modelos de elección de destino (o modelos de distribución de viajes) se pueden incorporar una serie de variables de tamaño, como se explica más adelante, a fin de tratar los efectos de atracción de distintos tipos de zonas, aplicando métodos de pivoteo para ajustar las matrices del año base.

La Figura 10.1 presenta un esquema del sistema de modelación propuesto. En los siguientes numerales se discute cada componente en particular.

FIGURA 10.1
Modelo jerárquico de elecciones de viaje

¹⁸ Gunn, H.F., Fox, J. y Mijjer, P. (2001) Extended tour representations for travel demand models. *Proceedings 2001 European Transport Conference*. Cambridge, Inglaterra, Septiembre 2001.



MODELOS DE GENERACIÓN O FRECUENCIA DE VIAJES

Si es necesario modelar la generación de viajes (por ejemplo, en casos en que se sospeche que el tráfico inducido podría ser importante), se recomienda utilizar un modelo de elección de frecuencia de tipo logit jerárquico. Varios estudios de transporte interurbano en Europa utilizan esta técnica. Este enfoque de modelación, que se encuentra resumido en Ortúzar y Willumsen (2001, págs. 153-154), comienza por calcular la probabilidad de que cada individuo elija hacer (o no) un viaje con un propósito dado en un período determinado. A continuación, el volumen total de viajes se obtiene multiplicando el número de individuos de cada tipo por sus probabilidades de hacer un viaje, y también es posible estimar la probabilidad de que algunos individuos realicen más de un viaje.

En cualquier caso, previamente es necesario examinar con cuidado un problema potencialmente importante, en este sentido, asociado a los datos disponibles (encuestas de interceptación). El problema consiste en que las encuestas de interceptación, a diferencia de las encuestas en hogares, sólo registran los viajes hechos pero – obviamente – ignoran la posibilidad de que haya personas que no realizan viajes. Esta falla debe ser corregida si se desea modelar correctamente la generación de viajes, y para esto se necesita contar con datos adicionales que permitan detectar (al menos el porcentaje de) personas que no hayan realizado viaje alguno en los corredores correspondientes a los viajes encuestados. Se ha encontrado que al incorporar esta corrección, las diferencias en la modelación son significativas, pero el procedimiento de ajuste no se puede realizar si no se cuenta con datos adicionales, típicamente un censo de población reciente.

Si V es la utilidad de hacer un viaje (se asume que la utilidad de no viajar es cero, sin pérdida de generalidad), la probabilidad de viajar está dada por:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \exp(-V)}$$

donde V se expresa típicamente como una función lineal de parámetros θ desconocidos (obviamente esta función puede ser más compleja, por ejemplo no lineal, y esto es parte integrante del proceso de búsqueda de la mejor especificación):

$$V = \sum_k \theta_k X_k$$

en que X son datos sobre ingreso, tasa de motorización, tamaño familiar y accesibilidad. La última variable debe incorporarse de forma consistente con la teoría de maximización de la utilidad que sustenta al modelo y para esto, se debe ocupar la utilidad máxima esperada (logsuma) del modelo de elección de destino.

En este caso, como se trataría de una estructura de tipo logit jerárquico, el parámetro (estructural) que multiplica a esta variable debe estar entre cero y uno, y esto sirve como diagnóstico interna de la consistencia del modelo.

El modelo así planteado es particularmente adecuado para tratar datos medidos a nivel individual (desagregados); no obstante, también se puede estimar con datos agregados (medidos, por ejemplo, a nivel zonal), en cuyo caso las probabilidades P representan proporciones de viaje.

Para modelar frecuencias de viaje superiores a uno, se puede utilizar una estructura jerárquica en que en cada nivel se elige entre hacer más viajes en el período, o parar en el número actual (modelo "stop-go"). Sin embargo, como posiblemente existan fuertes diferencias entre la posibilidad de sólo hacer un viaje (por ejemplo, al día) versus la posibilidad de realizar más de uno, se ha encontrado normalmente preferible modelar separadamente la primera elección.

La aplicación del modelo es extremadamente simple; si, por ejemplo, la probabilidad de hacer un viaje es p (en el primer modelo), y la probabilidad de elegir la opción "go" (hacer más viajes) es q en cada etapa subsiguiente, es fácil demostrar que el número de viajes esperado es simplemente: $p/(1 - q)$.

En varios estudios realizados en Europa y Australia, se han encontrado coeficientes para el parámetro estructural de la accesibilidad que varían entre 0.07 y 0.33, para diferentes propósitos de viaje.

Es importante destacar que, previo a esta modelación, los estudios europeos más exitosos han planteado la necesidad de calibrar otros dos modelos que constituyen elementos clave del sistema de modelación, particularmente en el caso de viajes interurbanos: un modelo de posesión de licencia de conducir, y un modelo de posesión de automóvil. El primero calcula la probabilidad de que el hogar de una persona esté dentro de una categoría de posesión de licencia (por ejemplo: nadie tiene licencia; el jefe del hogar tiene licencia; más de un adulto tiene licencia). En estudios europeos, se han utilizado modelos de tipo MNL con variables socioeconómicas y de localización.

El modelo de posesión de automóvil se estima condicional en el anterior, y típicamente plantea la probabilidad de que el hogar del viajero tenga 0, 1 ó más, o incluso 2 ó más autos, en el caso de hogares con múltiples licencias. También se basa en variables socioeconómicas y de localización. La operación de ambos modelos en forma conjunta, da como resultado la distribución de probabilidades para posesión de licencia de conducir y posesión de automóvil, y esa eventualmente constituye una de las entradas para el modelo de elección de frecuencia antes comentado.

MODELOS AGREGADOS DE DISTRIBUCIÓN DE VIAJES

El enfoque tradicional a la distribución de viajes entre diferentes destinos ha seguido las líneas de un modelo gravitacional. Este modelo se usa aún hoy en la mayor parte de las aplicaciones tanto urbanas como interurbanas.

El modelo gravitacional surgió originalmente como una analogía a las leyes de la física y su aplicación inicial fue a los desplazamientos interurbanos. Los viajes se supusieron proporcionales al producto de las poblaciones de las ciudades e inversamente proporcionales a alguna función de la distancia entre ellas.

Más adelante se desarrollaron versiones más generales del modelo gravitacional, su versión contemporánea es:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(c_{ij})$$

donde:

T_{ij} es el número de viajes entre cada par O-D ij

O_i y D_j son los viajes totales originados en i y con destino en j .

A_i y B_j son parámetros de balanceo para asegurarse que las restricciones de viajes totales se cumplen.

La función $f(c_{ij})$ es una función de separación espacial, que puede tomar las formas:

$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij})$	función exponencial
$f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}$	función potencia (n)
$f(c_{ij}) = c_{ij}^n \exp(-\beta c_{ij})$	función combinada, Tanner o Gamma

Este modelo puede calibrarse a partir de encuestas domiciliarias o matrices O-D observadas mediante alguno de los procedimientos descritos en esta metodología.

Este Manual recomienda el empleo de modelos agregados de distribución y su aplicación sólo en aquellos casos en que pueda esperarse un número significativo de cambios en los destinos de viaje como resultado de la nueva carretera de cuota. En todo caso, la contribución de la redistribución de viajes al tráfico y recaudación de la autopista debe mostrarse separadamente.

A continuación entregamos algunos antecedentes sobre la posible aplicación futura de modelos desagregados de elección de destino.

MODELOS DESAGREGADOS DE ELECCIÓN DE DESTINO

En algunos países se está reemplazando este enfoque tradicional por la estimación de modelos de elección basados (en lo posible) en datos a nivel individual. Incluso en ciertas aplicaciones a nivel interurbano no se modela la elección de destino como tal, sino que se supone la existencia de ciertos destinos a ser visitados (ej: parientes, contactos de negocios) y lo que realmente varía es la frecuencia con que se realizan los viajes, el modo y la ruta.

En cualquier caso, un elemento clave a considerar en el desarrollo de modelos de elección basados en datos de interceptación es la necesidad de tomar en cuenta el método de muestreo utilizado. Como se sabe, la probabilidad de que un viaje sea interceptado depende de su longitud; por ende, la distribución de longitudes de viaje en una encuesta de interceptación debiera estar sesgada. En efecto, la probabilidad de ser observado tiene dos componentes: (i) la probabilidad de que la persona se comporte de una manera determinada (elija una ruta, hora, modo y destino), y (ii) la probabilidad de que, dado este comportamiento, la persona sea entrevistada.

En muchos casos la probabilidad de ser observado no depende del comportamiento; por ejemplo, es razonable suponer que todos los tipos de comportamiento de los miembros de una familia serán observados en una encuesta a hogares. En este caso, la probabilidad de ser observado en la encuesta es uniforme para la muestra y puede omitirse del proceso de maximización de verosimilitud conducente a la estimación de parámetros en un modelo de

elección. Sin embargo, en el caso de encuestas de interceptación se debe incluir la probabilidad de ser observado, ya que no es uniforme (la elección de un destino lejano tiene mayor probabilidad de ser observada que la de un destino cercano).

Para corregir los efectos del método de muestreo, se deben ocupar procedimientos especiales en la modelación que dependen de las circunstancias específicas (por ejemplo, si se conoce o no la proporción verdadera que elige cada alternativa ¹⁹).

Si es necesario modelar la distribución de viajes, en este manual se recomienda estimar modelos separados de elección de destino y modo de transporte, para los distintos propósitos, períodos y zonas del estudio. En todos los casos el modo auto-chofer sólo estará disponible para individuos con licencia de conducir cuyo hogar posea un automóvil; en general, el resto de los modos estará universalmente disponible, a no ser que la estación más cercana sea considerada inaccesible desde la localidad de origen del encuestado.

Por otro lado, las alternativas en el caso de los destinos son, en principio, todas las zonas del área de estudio; así, suponiendo dos o tres medios de transporte (auto, autobús, avión), se puede ver que el número de combinaciones de modo y destino es alta; obviamente no todos los pares O-D tendrán todos los modos disponibles, y esto también se verá afectado por la segmentación de acuerdo al tamaño del área de estudio (la disponibilidad depende de la distancia de viaje). Además, se deben considerar los distintos propósitos y las diferentes categorías de personas; por ejemplo, si hubiera tres propósitos, tres categorías y 100 zonas, se tendrían 900 opciones por variación de política.

Los atributos de este tipo de modelos incluyen variables de atracción y variables socioeconómicas, además de las típicas variables de accesibilidad, como costo y tiempo de viaje; en el caso de viajes en transporte público, los niveles de servicio deben incluir el tiempo de viaje, tiempo de acceso, frecuencia, etc., además de informar sobre el número de transferencias. Las variables de atracción difieren de acuerdo al propósito del viaje; ellas indican el grado en que la actividad correspondiente a cada categoría está disponible en la zona de destino (ej: trabajo, educación). Los modelos asumen que, dada una cierta accesibilidad, el número de viajes a un determinado destino es proporcional a esta disponibilidad.

Ejemplos de variables de atracción son las siguientes:

- para viajes al trabajo: empleo total en la zona
- para viajes de estudio: matrículas disponibles en la zona
- compras, etc: tamaño de la población de la zona, número de empleos en el sector servicios en la zona, número de empleos en el sector comercio.

¹⁹ Fox, J., Kouwenhoven, M., Daly, A.J. y Gunn, H.F. (2004) Using road-side interviews to model employer's business and non-home-based travel in the West Midlands. *Proceedings 2004 European Transport Conference*. Estrasburgo, Francia, Octubre 2004

Adicionalmente, se suele ocupar otras variables de atracción, tales como densidad de población y empleo, y presencia de un centro, o que la zona corresponda a una ciudad importante, ciudad intermedia, etc. Este tipo de variables permite añadir una dimensión cualitativa a los criterios meramente cuantitativos anteriores. Las variables socioeconómicas son, en principio, todas las que se hayan medido.

Los modelos de elección de destino y modo de transporte tienen forma logit jerárquica. Las variables explicativas indican la utilidad de las combinaciones destino-modo; la elección de modo varía con la elección de destino y viceversa. La salida de estos modelos es la probabilidad de elegir ciertos modos y destinos de acuerdo al origen, propósito y categoría socioeconómica del viajero.

Las probabilidades resultantes de los modelos de frecuencia de viajes se deben reducir a la misma división de propósitos y categorías de los modelos de elección de destino y modo de transporte, obteniéndose frecuencias de viaje relacionadas con categoría, propósito y zona de origen. Estas se deben multiplicar por las probabilidades de elección anteriores, de forma que cada combinación modo-destino se pondere por el número de veces que la combinación ocurra.

Los resultados de lo anterior son flujos de pasajeros entre las zonas de origen y destino para los diferentes propósitos de viaje. Una forma interesante de verificar la bondad de los modelos estimados es comparar la agregación de estos flujos con las matrices de viaje construidas a partir de los datos de terreno (ver Capítulo 6).

11. TRÁFICO INDUCIDO

EXISTENCIA E IMPORTANCIA DEL TRÁFICO INDUCIDO

El fenómeno del tráfico inducido se mira aquí exclusivamente desde la perspectiva de las carreteras de cuota, ya que en otros contextos puede tener distintas interpretaciones. El tráfico inducido para una carretera de cuota es demanda que no aparecía como demanda potencial (in-scope) en la observación de la matriz de viajes del año base. Así, se refiere a viajes que antes se hacían a otros destinos (redistribución) o a viajes que son completamente nuevos, bien sea por un aumento en la frecuencia de los viajes, a consecuencia de un aumento en la actividad económica, o a cambios en los patrones de usos del suelo.

La demanda inducida puede ser una componente importante en una carretera de cuota, afectando la proyección total de los ingresos y la evaluación socio-económica del proyecto. La necesidad de modelar estos impactos depende de la escala del proyecto y su impacto en los costos generalizados de viaje.

Algunos proyectos de cuota tienen un impacto significativo en las condiciones de accesibilidad y, por ende, en los tiempos de viaje entre ciertos orígenes y destinos. En estos casos, es de esperar que la nueva infraestructura dé lugar no sólo a cambios de ruta y/o de modo entre orígenes y destinos, sino también a un cambio en el origen o destino de los viajes.

Esto puede suceder, especialmente, cuando la nueva alternativa no sólo supone una mejora de las condiciones de viaje con relación a las rutas alternativas, sino que efectivamente constituye una alternativa completamente nueva. Este es muchas veces el caso de puentes o túneles que permiten el acceso a áreas que anteriormente estaban relativamente aisladas debido a la existencia de barreras físicas (río, lago, montaña).

Como consecuencia de una mejora importante en las condiciones de acceso, los individuos pueden empezar a viajar más: generación pura de viajes. Esto puede darse cuando una reducción del tiempo de viaje permite una actividad adicional y/o más frecuente, por ejemplo, viajes de negocios por el día, en lugar de tener que pernoctar; regresar a casa para almorzar, etc. El origen y el destino pueden ser los mismos, pero el número de desplazamientos por día o por mes aumenta.

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN

En términos generales, la estimación del tráfico inducido es menos robusta que la estimación de tráfico que cambia de ruta. Quizás por ello, las instituciones financieras rara vez aceptan el tráfico inducido como una componente del Caso Base. Sin embargo, a menudo puede tener importancia, si bien está asociado a un mayor grado de incertidumbre.

Para estimar la componente de viajes generados puros, es necesario recurrir a modelos de generación de viajes que sean sensitivos a la accesibilidad. Estos no se encuentran disponibles

en la mayor parte de los casos. Aún más, el uso de preferencias declaradas no es muy sólido cuando se enfrenta al viajero a preguntas hipotéticas sobre el número de viajes al día/mes, que haría bajo ciertas condiciones de costo de viaje; es muy difícil ponerse exactamente en ese contexto en forma aislada del resto de la familia.

Para la redistribución de viajes, se puede usar un modelo gravitacional convencional o un modelo de elección de modo y destino, como se discute en el Capítulo 10. En todo caso, para apoyar las estimaciones de tráfico inducido es conveniente complementar la modelación con ejemplos de otros casos conocidos y bien documentados.

Por ejemplo, en los gráficos siguientes se ilustran los cambios que, en términos de tiempo, tendrían lugar con la construcción de un nuevo puente en una ciudad canadiense. La Figura 11.1 muestra los tiempos de viaje a un punto situado al norte del río, el cual tiene muy malas condiciones de acceso. Por otro lado, la Figura 11.2 presenta las isócronas una vez construido el puente, en que se destaca el cambio significativo en tiempos del viaje. En este proyecto se estimó que los ahorros de tiempo eran de 30-40 minutos para pasar al otro lado del río.

FIGURA 11.1
Tiempos de viaje entre un punto situado al norte del río y el resto de la ciudad, antes de la construcción de un nuevo puente

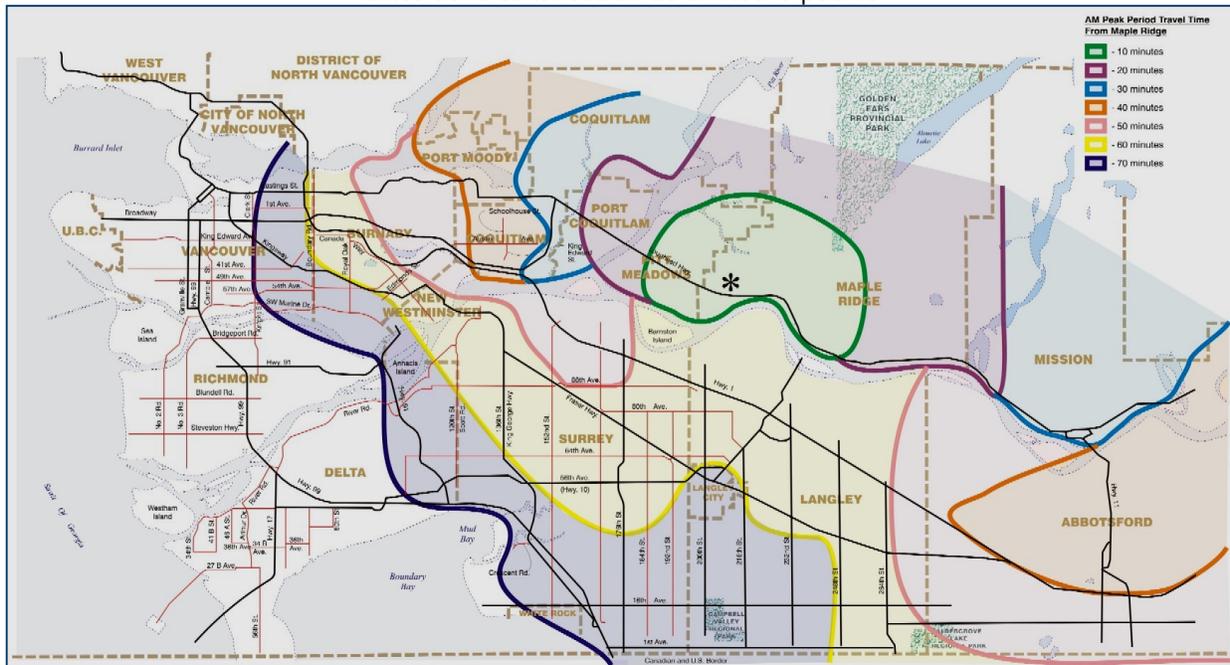
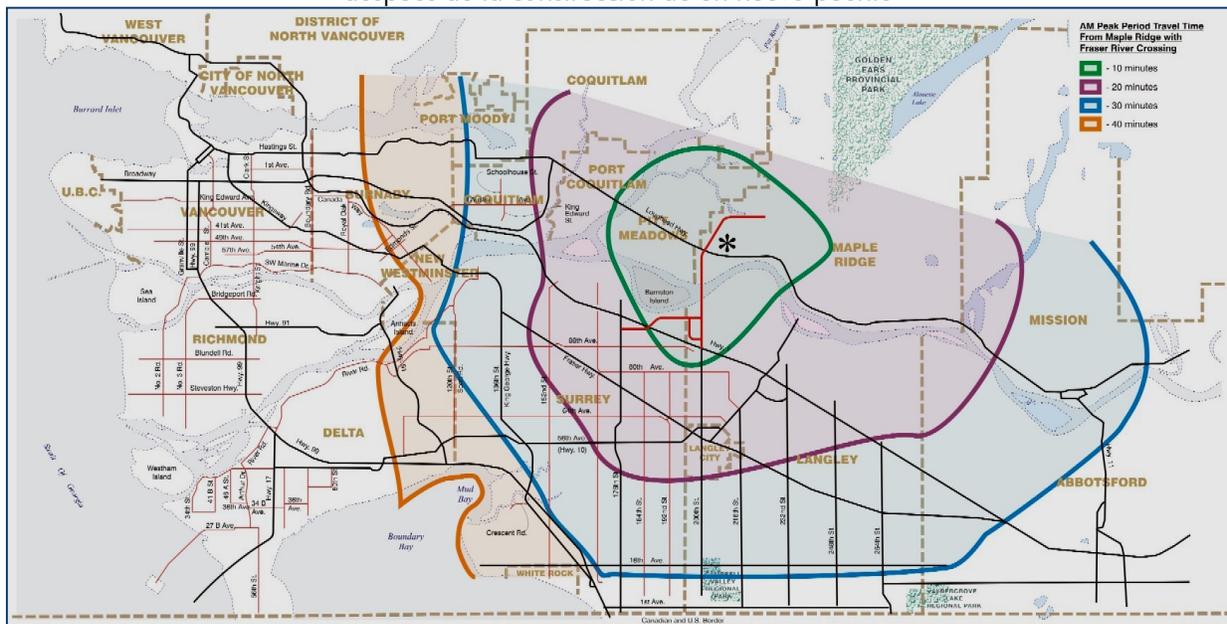


FIGURA 11.2
 Tiempos de viaje entre un punto situado al norte del río y el resto de la ciudad,
 después de la construcción de un nuevo puente



Reducciones dramáticas en el tiempo de recorrido, por ejemplo de la escala anterior, conducen inevitablemente a un cambio en las decisiones de los pobladores de ambas áreas, a uno y otro lado del río, con relación a donde ir a comprar, trabajar o fijar el lugar de residencia.

Se esperaría que los cambios en destinos ocurrieran más rápidamente para los viajes opcionales (compras, recreacional), pero en un cierto plazo la gente también debería responder a la nueva accesibilidad cambiando de trabajo o lugar de residencia.

El impacto que puede tener el efecto de redistribución en términos de ingresos es bastante significativo y de allí que aunque sea difícil su estimación, es importante tenerlo en cuenta en combinación con un análisis de riesgo de la estimación. Más adelante en el informe, se habla de los métodos que se pueden emplear para modelar la 'redistribución' y para tratar la evaluación de riesgo.

Para tener una idea de lo importante que puede ser el tráfico redistribuido como componente del tráfico total, en la Tabla 11.1 se han incluido cuatro ejemplos de proyectos donde se ha tratado de contabilizar este efecto, unos años después de su puesta en servicio.

TABLA 11.1
Ejemplos de redistribución de viajes

Proyecto	Período desde puesta en servicio (Años)	Porcentaje del tráfico total atribuido a redistribución	Comentarios
Severn Crossing, Reino Unido.	Menos de 1	39%	Estimación basada en entrevistas a nuevos usuarios. Un 39% de los entrevistados afirma hacer el viaje porque existe el puente.
Confederation Bridge, Canadá.	4	37%	Estimación basada en análisis de datos de tráfico recogida por el concesionario.
2 nd Tagus Crossing, Portugal.	3	73% máximo	Este 73% puede ser alto. Quizá porque se considera que todo el tráfico redistribuido utiliza el nuevo puente. Sin embargo, puede que haya nuevos viajes utilizando un puente existente que antes estaba muy congestionado.
Forth Road Bridge, Reino Unido.	1	38%	Este 38% se refiere al tráfico extra registrado cuatro meses después de la entrada en servicio. Los incrementos observados durante los primeros cuatro meses se registraron como <i>ramp-up</i> .

Fuente. Steer Davies Gleave

12. MODELOS DE CRECIMIENTO Y TRANSICIÓN

MODELOS DE CRECIMIENTO SIMPLES BASADOS EN SERIES HISTÓRICAS

La mayor parte de los modelos de crecimiento del tráfico de carreteras de peaje en cualquier parte del mundo se basan en relaciones obtenidas sobre la base de series históricas de tráfico.

Estas tienen dos ventajas. En primer lugar muestran cómo se relacionó el tráfico con otros factores independientes, en su mayor parte relacionados con el crecimiento de la economía.

En segundo lugar, las series históricas muestran también la tendencia vegetativa de crecimiento del tráfico en un país o región. Esta información sirve para dar respaldo adicional a las estimaciones de crecimiento futuro.

Los modelos de crecimiento tratan de relacionar el crecimiento de la demanda potencial (in-scope) con factores como el crecimiento de la economía, tasas de motorización, población, etc.

Como la variable dependiente que aparece en las series históricas de aforos tiene un tamaño diferente dependiendo del sitio, lo normal es estimar modelos que relacionen:

- Índices de aforos (por ejemplo aforo en 1995 = 100) con índices de la economía, población, etc.
- Porcentajes de crecimiento de los aforos con porcentajes de crecimiento de la economía, población etc.

En general se obtienen modelos del tipo:

$$IndAforo = \alpha(IndPIB)^{\beta} \gamma(IndPob)^{\eta} \text{ etc.}$$

Donde el indicador *Ind* refleja un índice.

Los mecanismos convencionales para obtener modelos con una buena bondad de ajuste son aplicables en estos casos.

MODELOS BASADOS EN OTROS FACTORES

Se pueden utilizar también modelos basados en tasas de generación de viajes, cómo los mencionados en el Capítulo 10.

Esto es menos común, excepto en el caso urbano donde la aplicación de este tipo de modelos es más frecuente debido al tipo de encuesta domiciliaria que se realiza en esos casos.

Uso COMBINADO DE MODELOS DE CRECIMIENTO

A menudo es conveniente utilizar más de un modelo de crecimiento en forma complementaria. Por ejemplo, emplear un modelo basado en crecimiento del PIB y contrastarlo con otro modelo puramente tendencial.

Cabe destacar también la necesidad de tratar separadamente las grandes inversiones en actividad económica y desarrollos inmobiliarios que puedan esperarse, ya que se pueden traducir en crecimiento adicional al tendencial. Las fechas para estos proyectos de inversión y sus impactos adicionales deben documentarse también.

En cualquier caso, es necesario recordar que estos modelos se aplican a la demanda potencial y no directamente a la capturada por la carretera de cuota. Esta demanda potencial futura debe asignarse a la red para cada año de modelación para tomar en cuenta la evolución de la congestión y cambios en la red que compite con la nueva carretera.

PERÍODOS DE TRANSICIÓN Y MADURACIÓN, Y SU MODELACIÓN

Los modelos de captura asumen que los usuarios ya han logrado establecer con cierta confianza cuáles son los beneficios de utilizar la carretera de cuota para cada uno de sus desplazamientos. Por cierto que esto no ocurre a partir del primer día en que se abre la carretera al uso pagado.

Tomará algún tiempo para que los usuarios potenciales exploren las posibilidades que la nueva carretera les ofrece y verifiquen si la cuota que es necesario pagar se justifica.

Este período de transición, también llamado de maduración (en inglés ramp-up) puede durar desde un par de meses hasta un año o más. Los factores que regulan este tiempo son:

- La frecuencia con que los usuarios utilizan las rutas existentes antes de la apertura de la carretera de cuota. A mayor frecuencia, menor tiempo de maduración.
- La bondad relativa de la nueva carretera, esto es, cuánto significa en ahorros de tiempo. Si se trata de un puente o túnel que ofrece ahorros significativos, el período de maduración puede ser corto; para una carretera será algo más largo. Pero a mayor ventaja, menor tiempo de maduración.
- Esfuerzo previo en hacer conocer las ventajas de la carretera, ya sea mediante técnicas de marketing, información entregada en las casetas de peaje, estaciones de servicio, etc. En muchos casos, es posible acortar significativamente el período de transición simplemente con una buena estrategia de mercado, que prepara mensajes apropiados a cada segmento de la demanda.

- El apoyo de los medios de comunicación. Este es a menudo gratuito y responde sólo a una buena relación entre el concesionario y los periodistas que pueden cubrir ese tipo de noticia.

Como los ingresos obtenidos durante los primeros meses de una concesión son muy importantes en su retorno financiero, a menudo vale la pena invertir en el desarrollo de una buena estrategia de mercado para acortar significativamente este período.

Una estrategia a menudo efectiva, y a veces requerida por los términos del contrato de concesión, es abrir la carretera sin cobro por unos días. Esto permite a los usuarios potenciales conocer las ventajas de la misma y a los operadores identificar más claramente a los segmentos de demanda de interés. Se puede informar también mediante folletos entregados gratuitamente en las plazas de peaje.

Dada la cantidad de factores que determinan la duración del período de transición, la mejor forma de estimar su duración es con referencia a los períodos de transición de otras carreteras similares en el país. Estas carreteras, y sus períodos de transición, deben estar suficientemente bien documentados para que se pueda demostrar la validez de la analogía.

Cabe señalar que existe a menudo un período de transición no siempre bien explotado. Este es la apertura parcial de tramos de la carretera, con o sin cobro. Si no es posible cobrar, al menos se puede aprovechar el período como una oportunidad para iniciar las tareas de mercadeo. Si es posible cobrar, estos ingresos deben estimarse separadamente utilizando los mismos modelos anteriores, pero representando la red exactamente como estará en el momento de su apertura parcial.

Por cierto que no debe perderse la oportunidad de introducir en el mercado un mayor conocimiento de la carretera parcial y cómo será en el futuro.

13. DESARROLLO DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN FUTURA

USO DE ESCENARIOS EN ESTIMACIONES DE DEMANDA

Lo único cierto acerca del futuro es que no será como esperamos. El futuro es incierto y por ende tratar las proyecciones de tráfico y recaudación como si fueran el resultado de una ciencia o técnica exacta, es un error. No obstante, es posible reducir la incertidumbre utilizando modelos más apropiados y cuidadosamente calibrados. Ese es uno de los objetivos fundamentales de esta metodología.

Se sabe por experiencia que el factor más importante en la estimación del crecimiento de la demanda es el crecimiento de la economía, en particular el Producto Interno Bruto (PIB) nacional o regional. Se sabe también que las estimaciones del crecimiento de este PIB son difíciles y generalmente poco acertadas en países emergentes como México, y que además varían con cierta frecuencia en respuesta a factores externos tales como precios del petróleo, insumos básicos o simplemente cambios en las condiciones de competencia internacional o consumo doméstico.

Así, siempre es posible obtener las “mejores” estimaciones de crecimiento futuro, pero se sabe que las mismas estarán obsoletas en unos meses.

Este es, por tanto, el mayor factor de incertidumbre y por ello la mejor forma de tratarlo es preparando una serie de escenarios o futuros posibles y comprobar cómo se comportará el tráfico y la recaudación de la carretera en esas condiciones.

Un escenario es un conjunto de especificaciones, externas a la carretera propuesta, que definen los aspectos más importantes de su desarrollo futuro. En ese sentido, un escenario suele estar definido por factores como:

- Crecimiento de la economía regional y nacional
- Crecimiento y localización de la población
- Crecimiento y cambios en las actividades económicas relevantes para el tráfico potencial: un nuevo puerto, apertura de una mina o yacimiento, etc.
- Cambios en la red que compite con la nueva carretera: nuevos libramientos, intersecciones, etc., tarifados o no.

Pudiera ser importante considerar también otros factores, como la apertura de nuevos mercados por tratados de libre comercio, restricción al uso de vehículos particulares, introducción de legislación más restrictiva sobre horas máximas de conducción de camiones y autobuses, etc.

El consultor debe estar alerta a estas posibilidades, identificarlas y estimar, con ayuda de especialistas, su impacto esperado y cuándo pueden ocurrir.

PREPARACIÓN DEL ESCENARIO ESPERADO

El escenario esperado, a veces llamado “tendencial” aunque no siempre lo sea, es el más importante y crítico de los escenarios a definir. El escenario esperado refleja el consenso de la opinión de los especialistas en cuanto al futuro. Debe reflejar el futuro más probable, definido en términos de los factores mencionados.

Es importante que éste y los otros escenarios sean consistentes. Es decir, si se espera un deterioro de la economía local, no es razonable esperar también un aumento significativo de la población; es probable que al menos parte de ella emigre en busca de mejores condiciones.

Por otro lado, si se espera una economía activa y pujante, es poco probable que no haya inversiones adicionales en infraestructura para apoyar este desarrollo.

El escenario esperado debe estar bien definido y claramente documentado en los estudios base para la concesión de una nueva carretera de cuota. Asimismo, servirá de base para que los candidatos a la concesión lo actualicen, hagan sus propios supuestos y realicen sus propias estimaciones de tráfico y recaudación.

El escenario esperado debe contener una lista de proyectos que, se prevé, generen grandes cambios en la actividad económica y de inversiones en infraestructura. En el primer caso, se debe estimar los impactos sobre los movimientos de carga y pasajeros.

En el caso de la lista de proyectos de infraestructura, éstos deben tener al menos sus características de capacidad, trazado y velocidad de circulación.

Además, debe consignarse la fecha en que se espera que las nuevas actividades económicas e inversiones de infraestructura, comiencen a operar.

PREPARACIÓN DE ESCENARIO PESIMISTA Y OPTIMISTA

Los escenarios pesimista y optimista reflejan condiciones posibles, pero menos probables, que el escenario esperado.

El escenario pesimista debe reflejar un menor crecimiento de la economía (al menos -0.5% al año) y un crecimiento de la población y la infraestructura competitiva consistente con esto.

El escenario optimista es el complemento del anterior; mayor crecimiento económico y de población, y al mismo tiempo mejor infraestructura competitiva.

Ambos escenarios diferirán también en las fechas en que ciertos proyectos entrarán a operar.

MODELACIÓN

Se aplicarán los modelos de crecimiento para cada uno de los escenarios y se prepararán nuevas redes, las que en general diferirán también para cada escenario.

Se correrán entonces los modelos de tráfico y recaudación para cada uno de esos escenarios. Cuando un evento importante (por ejemplo, apertura de una nueva carretera o proyecto de inversión mayor) caiga en una fecha entre los horizontes de modelación, será necesario correr los modelos con y sin ese proyecto en los años anteriores y posteriores al mismo para permitir una interpolación de resultados.

14. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Un estudio de carreteras de cuota tiene poco valor si sus resultados no son comunicados en forma clara y transparente, de manera que la DGDC y otros usuarios potenciales del mismo puedan sacar sus conclusiones.

Este capítulo hace algunas sugerencias sobre como presentar resultados de manera que esta comunicación mejore.

Cabe señalar que el uso cuidadoso del idioma español será una contribución importante a la comunicación de resultados.

De la misma forma, el uso del color es altamente deseable en toda la información que se presente en forma gráfica y posiblemente en algunos cuadros para ayudar a su comprensión. El uso del color debe ser consistente a lo largo del informe. Si se usa el color rojo para indicar camiones, este color debe ser usado siempre con camiones. Las gráficas también deben ser apropiadas, utilizando barras cuando corresponda, y líneas tendenciales cuando sea el caso.

PRESENTACIÓN SEGMENTADA DE RESULTADOS

Como hemos visto, una de las mejores formas de permitir un adecuado tratamiento del riesgo y la incertidumbre es presentar los resultados del modelo en forma segmentada. Esto es, mostrar qué componentes del tráfico contribuyen al tráfico y la recaudación total.

Como un ejemplo, la Figura 14.1 es un gráfico de este tipo, que ilustra como contribuyen al tráfico total distintos elementos:

- La demanda base capturada de otras carreteras
- El crecimiento de esa demanda en el futuro
- La contribución que podría capturarse del ferrocarril y el transporte aéreo
- El tráfico que cambia de destino (redistribución)
- El tráfico generado puro, esto es, nuevos viajes.

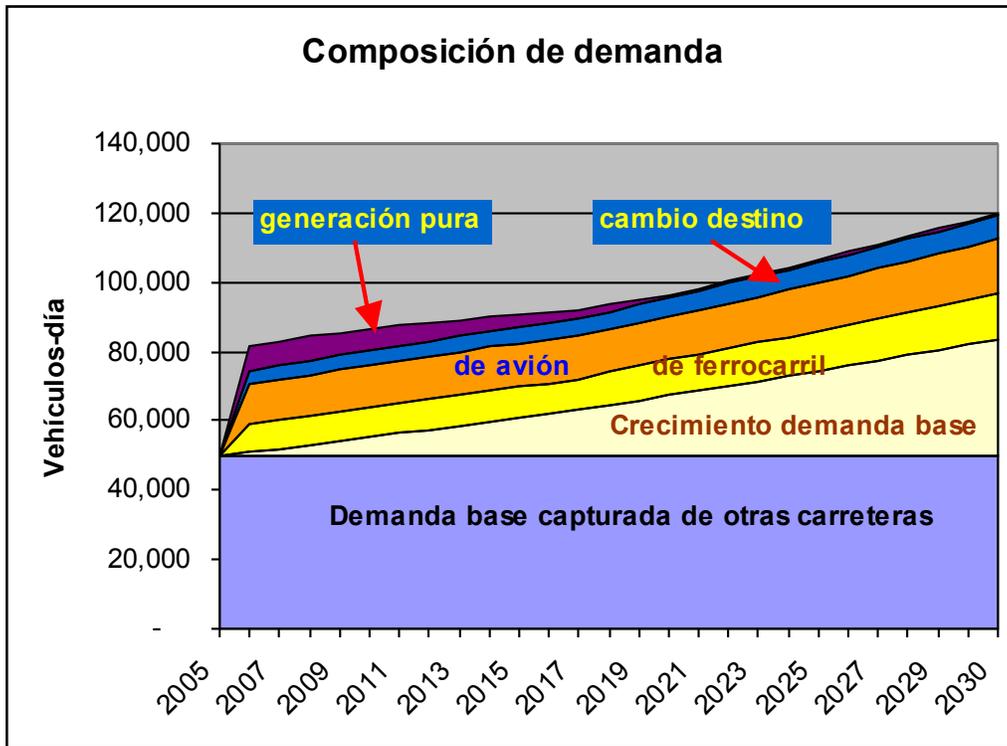
El consultor deberá asignar diferentes grados de confianza a estas estimaciones, y los inversionistas, concesionarios potenciales y entidades financieras les asignarán sus propias estimaciones.

Por cierto que una gráfica de este tipo debe ir acompañada de tablas que contengan las cifras que salen del modelo. Es deseable desagregar también los resultados en función de:

- Tipo de vehículos
- Viajes urbanos y de larga distancia
- Días de semana y fines de semana

■ Peaje electrónico y convencional

FIGURA 14.1
Presentación segmentada de la demanda por una carretera de cuota



PRESENTACIÓN DE TABLAS DE TRÁFICO

Se debe tener especial cuidado en la presentación de las tablas de tráfico y recaudación, indicando claramente si se trata de tráficos horarios, diarios, clasificado por tipo de vehículo, recaudación en pesos de qué año, con o sin impuestos, etc. El principio es que cada tabla debería ser en lo posible completa, y no requerir mayor lectura del texto para comprenderla.

Vale la pena destinar esfuerzo a entregar tablas en un formato adecuado, que facilite su lectura. Las columnas deben estar bien alineadas, los números a la derecha. Las cifras no deben entregar una falsa precisión (por ejemplo, precisiones de un vehículo por día cuando el modelo no puede garantizarlo). Las cifras de tráfico deben redondearse al menos a las centenas y posiblemente a las décimas, dependiendo de la calidad del modelo y los datos.

El uso del punto decimal y la coma para miles en cifras, debe seguir el estándar de México y no mezclarse en el texto con otros estándares.

PRESENTACIÓN DE GRÁFICOS DE DEMANDA

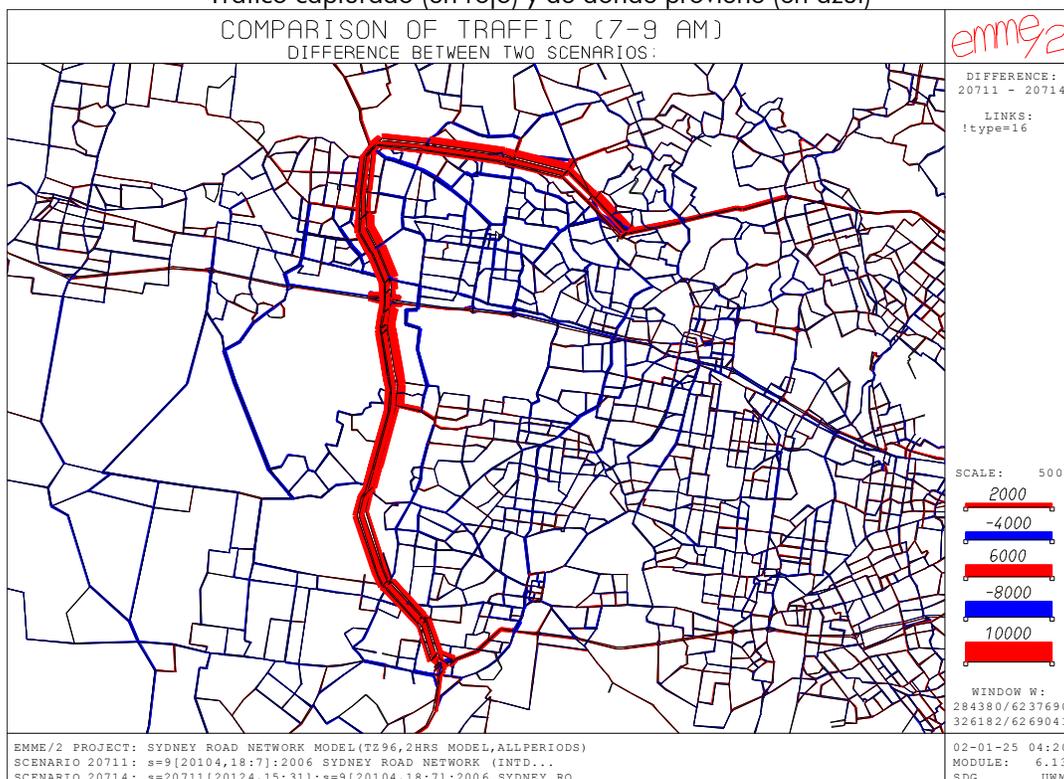
Es deseable mostrar líneas de deseo (desagregando por segmento sólo si es necesario) que ilustren de dónde proviene la demanda capturable y capturada por la nueva autopista de cuota.

CONDICIONES CON Y SIN PROYECTO

Es necesario hacer comparaciones de los niveles de tráfico con y sin el proyecto. Es decir, mostrar niveles de tráfico (estos salen de los paquetes como Emme/2, TransCAD, SATURN, ESTRAUS) con y sin el proyecto para un año futuro.

Se puede mostrar así, gráficamente y utilizando colores apropiados, de dónde proviene el tráfico capturado. Se muestra un ejemplo en la Figura 14.2.

FIGURA 14.2
Tráfico capturado (en rojo) y de donde proviene (en azul)



TASAS DE CAPTURA

La tasa de captura indica qué porcentaje del tráfico potencial de la nueva autopista será capturado (atraído) por la misma. En los modelos sencillos, del tipo Logit, para casos de

puentes internacionales y libramientos simples, la tasa de captura se calcula directamente del modelo.

Para los problemas que requieren el uso de redes de carreteras, la tasa de captura es un resultado de la aplicación del modelo, pero no queda calculada explícitamente y es necesario estimarla. Hay dos formas de mostrar esa tasa de captura.

La primera consiste en trazar una (o más) línea(s) pantalla que intercepte(n) la carretera y otras alternativas. El flujo total sobre la nueva autopista, dividido por el flujo total que cruza la línea pantalla, mostrará una versión de la tasa de captura.

El problema con este método es que algunos de los volúmenes interceptados por la línea de pantalla en carreteras competitivas realmente no son demanda potencial de la nueva autopista, por tener orígenes y destinos que no la hacen atractiva; por ejemplo, viajes cortos locales.

Un mejor indicador de la tasa de captura es correr el modelo con y sin cobro de cuota. En este caso la tasa de captura está dada por la razón entre el tráfico en la autopista cuando se cobra cuota y el tráfico cuando es considerada libre.

15. RECAUDACIÓN Y ANUALIZACIÓN

ANUALIZACIÓN DE RESULTADOS

Generalmente los resultados de los modelos de tráfico están dados en vehículos por hora para un determinado día del año. Para calcular el valor del Tráfico Medio Diario Anual (TMDA) y la recaudación anual, es preciso generar factores para convertir la hora promedio del día (u hora pico) en total diario, media semanal, mensual y anual.

Para el cálculo de estos factores, es fundamental disponer de datos de tráficos diarios observados (conteos automáticos de tráfico) durante todos los días de un año reciente, para una o más carreteras dentro del ámbito del estudio. Aunque no siempre es posible contar con series históricas para varios años, es conveniente asegurarse que el valor del factor represente las condiciones de tráfico para más de un año.

El proceso de cálculo de los factores de anualización debe ser lo más preciso posible a fin de minimizar el nivel de error. Dado que estos factores se aplican a menudo de una manera multiplicativa, un error del 10% en el factor implica un error del 10% en la proyección de los ingresos.

El procedimiento a aplicar para el cálculo de los factores de anualización depende de si se han modelado uno o más períodos de tiempo a lo largo del día. En carreteras rurales los tráficos no suelen variar mucho a lo largo del día y por tanto basta con modelar una hora promedio diaria, la cual se multiplica por 24 horas y por el total de los días del año para calcular la recaudación anual.

$$\text{Recaudación} = \text{Flujo Hora Promedio} * 24 \text{ horas} * 365 \text{ días}$$

En proyectos de cuota en áreas urbanas, lo más común es que la demanda no se distribuya de manera uniforme a lo largo del día y por lo tanto es preciso modelar distintas horas del día (períodos pico y fuera de pico).

La Figura 15.1 ilustra el perfil horario típico de una vía urbana. En este caso, para representar las variaciones de tráfico a lo largo del día se definieron los siguientes cuatro períodos:

- A + C: Son los períodos pico
- B: Mediodía
- D: Noche y madrugada
- E: Fin de semana

La Figura 15.2 muestra la evolución del tráfico a lo largo del año, incluyendo períodos donde no se ha contado con aforos por alguna falla de los contadores automáticos.

FIGURA 15.1
Perfil de tráfico horario de una vía urbana en día laboral

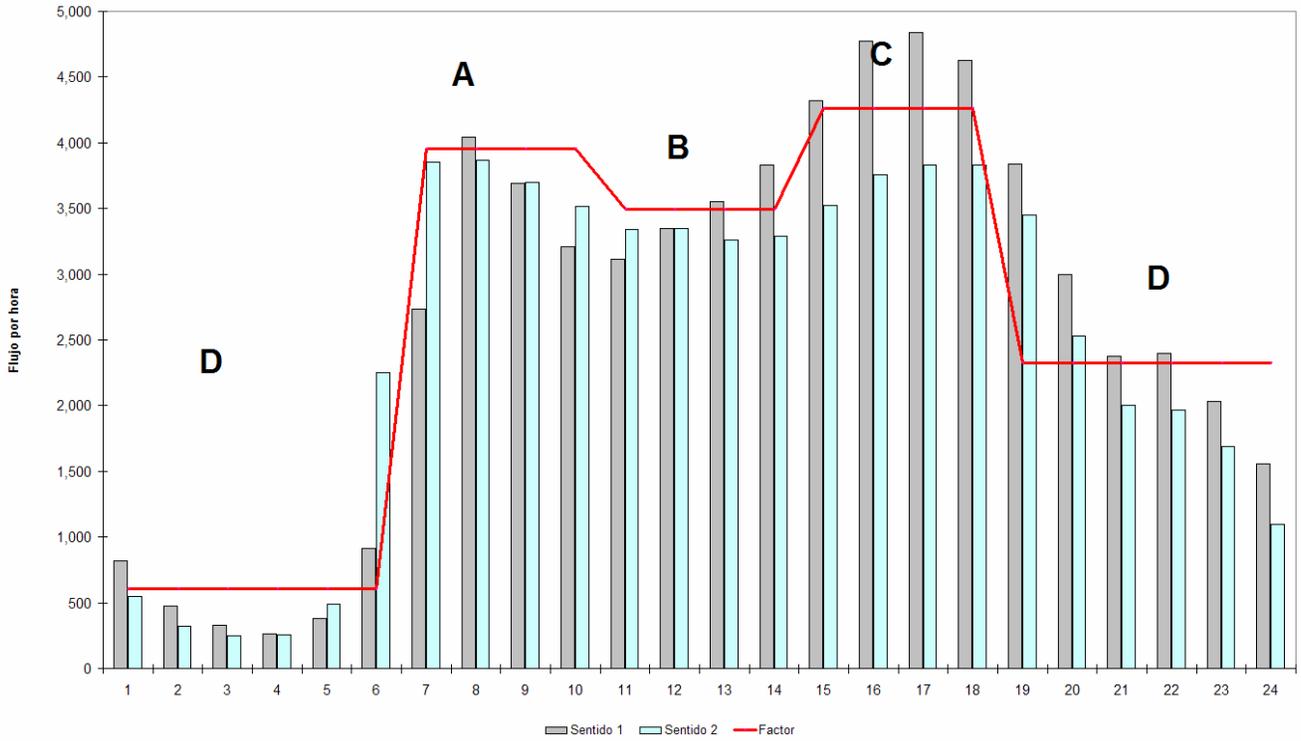
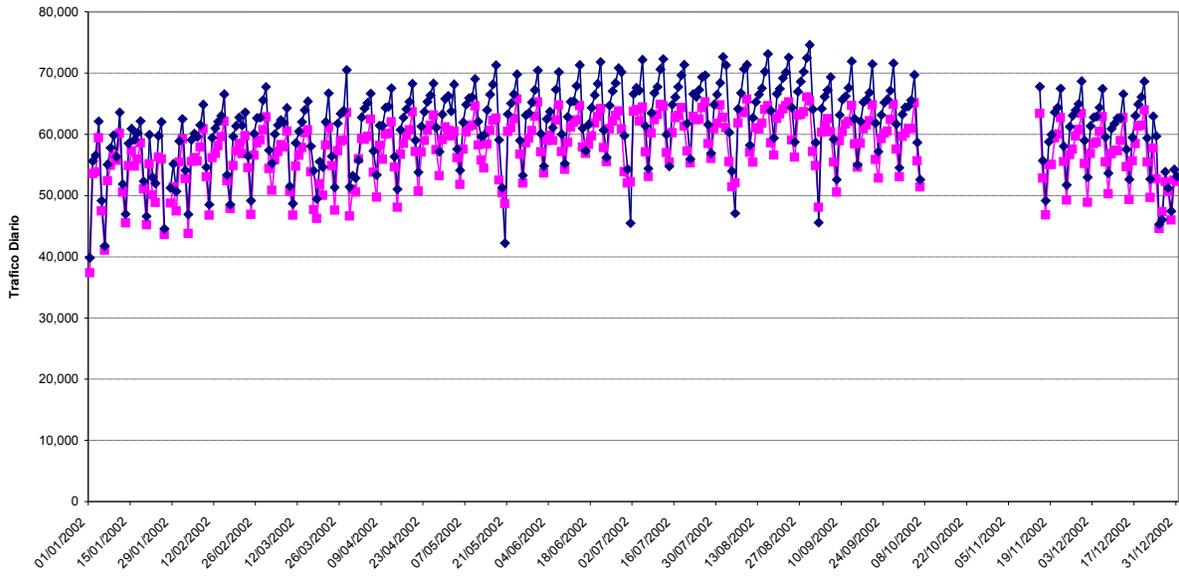


FIGURA 15.2
Datos de tráfico diarios durante un año



En este caso, a partir de datos de los tráficos diarios a lo largo de un año se puede calcular el número de horas correspondientes a cada período, para así calcular los ingresos anuales. En

la estimación del número de horas hay que tener en cuenta los valores observados en fin de semana y días festivos.

La Tabla 15.1 presenta un ejemplo de cálculo de los factores de anualización derivados para el caso anterior.

TABLA 15.1
Factores de anualización—autopista de cuota urbana

PERÍODO	CÓDIGO	FACTOR (NÚMERO DE HORAS)	TRÁFICO MEDIO HORARIO	TRÁFICO TOTAL POR PERÍODO
A+C	Pico	1757	4108	7,217,094
B	Medio	1004	3493	3,507,229
D	Noche	3263	1467	4,786,837
E	Fin de semana y feriados	2736	2260	6,183,360
Total año (x)		8760		21,694,520
TMDA (x/365)				59,437

La recaudación total se obtiene simplemente multiplicando el tráfico anual por el valor del peaje. Si el peaje fuese distinto en cada período, sería necesario calcular los ingresos por período.

CONVERSIÓN DE TRÁFICO EN RECAUDACIÓN BRUTA (CON IVA) Y NETA

En la estimación de los ingresos de una carretera de cuota, es importante hacer varias correcciones para derivar los ingresos netos de la concesión. En este sentido, es importante tener en cuenta como se trató el Impuesto al Valor Agregado (IVA) en la modelación y las posibilidades de pérdidas de ingresos.

Así, en la modelación de los tráficos captados por una carretera de cuota considerando el efecto del pago de IVA y con relación al valor del peaje utilizado (con o sin IVA), es necesario distinguir dos tipos de usuarios:

- El conductor de vehículo particular privado; y
- El conductor de vehículo comercial (camiones)

En el caso de los vehículos particulares, generalmente en el modelo se aplica el valor del peaje con IVA, pues éste refleja el costo real percibido por el usuario. Dado que la mayoría de los usuarios privados no tienen posibilidad alguna de reclamar un impuesto, el pago con IVA se percibe como el costo verdadero.

No obstante, aún cuando el operador recibe el total del peaje más IVA, el impuesto se debe descontar para el análisis financiero.

En el caso de los usuarios comerciales, generalmente es posible que por lo menos una cierta proporción del impuesto pueda ser reclamada. En ese caso, su comportamiento será

determinado por el valor neto del peaje. Para reflejar esto, una práctica común es asumir que los vehículos pesados no pagan IVA. En este caso, la recaudación por pago de la cuota es el valor neto.

PÉRDIDAS DE INGRESOS

En los sistemas de peaje manual es difícil evitar pagar peaje y por tanto la pérdida de ingreso por vehículos infractores es muy baja.

No obstante, en el caso de utilizar sistemas de peaje electrónico la estimación de los ingresos que resulta de multiplicar el tráfico total estimado por el peaje, representa la recaudación bruta. Para tener la recaudación neta se deben aplicar factores que permitan descontar las pérdidas posibles de ingresos.

Entre las principales causas de pérdida de ingresos en los sistemas de peaje electrónico se tienen las siguientes:

- Fallas técnicas del sistema
- Errores en el registro de una transacción
- Existencia de un número de usuarios que no pagan (deudores).

Los valores a aplicar para ajustar los ingresos dependen de la proporción de usuarios que estén registrados como clientes de la concesión. La tasa de pérdida de ingresos tiende a ser baja si existe una elevada proporción de adherentes al sistema.

Así, si está previsto que la nueva carretera de cuota funcione con un sistema electrónico de flujo libre, es necesario descontar del ingreso bruto la proporción correspondiente a pérdida de ingresos debido a: fallas técnicas, usuarios que no pagan, etc. Aún cuando la magnitud de la pérdida dependerá del esquema exacto del peaje adoptado, un análisis de "benchmarking" de autopistas de cuota con sistema electrónico sugiere que es necesario aplicar una reducción del orden del 1 al 5%. Los valores inferiores se justifican cuando existe un buen sistema de fiscalización, cobro de multas y recaudación. Los más altos, cuando estos sistemas no están disponibles.

OTROS AJUSTES

En la mayoría de los estudios de carreteras de cuota, el proceso de modelación no incluye a los autobuses y las motocicletas. En consecuencia, se deben multiplicar los ingresos estimados por un factor que permita estimar el verdadero valor de los ingresos netos.

Para el cálculo de dicho factor es necesario estimar cuál sería la proporción de autobuses y motocicletas a partir de datos de conteos clasificados.

Adicionalmente, del ingreso total es preciso descontar los vehículos exentos tales como vehículos de policía, ambulancias, vehículos militares, etc.

16. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGO

Una forma complementaria de permitir el análisis de riesgo, es el análisis de la sensibilidad del modelo y la recaudación futura a factores claves como la sensibilidad a la cuota, al crecimiento de la economía y la población, etc. También debe presentarse la sensibilidad del modelo a algunas de sus entradas clave como el Valor Subjetivo del Tiempo.

El análisis de sensibilidad debe estar condicionado a una identificación inicial de los riesgos de tráfico e ingreso del proyecto. Esta identificación debe comenzar al principio del estudio, pero debe completarse al finalizar las corridas del escenario esperado. Si aparecen riesgos adicionales a los descritos como mínimos más abajo, estos deben dar lugar a análisis de sensibilidad complementarios.

ANÁLISIS MÍNIMOS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad que se considera como mínimo es:

- Sensibilidad a la cuota (tarifa) y determinación de la tarifa que genera el ingreso máximo
- Sensibilidad al crecimiento de la economía
- Sensibilidad al VST
- Sensibilidad al año de implementación de proyectos clave.

Los análisis de sensibilidad se hacen normalmente alrededor del escenario esperado.

SENSIBILIDAD A LA TARIFA (CUOTA), TARIFA DE INGRESO MÁXIMO

Se debe correr el modelo de tráfico y recaudación para varios niveles de cuota, a fin de poder determinar cuál es la tarifa que genera el ingreso máximo. Esto tiene importancia para asegurarse que la concesión operará al lado izquierdo de esa tarifa, es decir, que todavía sería posible subir la tarifa y aumentar los ingresos. De lo contrario, el diseño de la cuota será perjudicial para la población ya que se podría reducir y aumentar los ingresos.

Este análisis permite también estimar la elasticidad de la demanda y el ingreso a cambios en la tarifa, un valor importante al tomar medidas de corto plazo como el reajuste de tarifas para compensar por la inflación.

SENSIBILIDAD AL CRECIMIENTO (PIB, POBLACIÓN, ETC.)

Parte de este análisis de sensibilidad ya ha sido hecho en la conformación de escenarios. Sin embargo, es deseable calcular la elasticidad de la demanda a variaciones en el PIB y para ello se debe correr el modelo con diferentes tasas de crecimiento de este índice (cambiando solamente a éste, a diferencia de los escenarios).

SENSIBILIDAD AL VST Y OTROS PARÁMETROS DE MODELACIÓN (EJ. FACTOR DE ESCALA)

El valor subjetivo del tiempo es siempre un parámetro cuyo impacto sobre la recaudación y el tráfico debe probarse en cada modelo. Se debe correr el modelo con un aumento del 20% para todos los VST, es decir para cada segmento. Además, debe repetirse el proceso para valores de 20% inferiores a los adoptados.

Los tres resultados deben presentarse en una sola tabla y gráfica para compararlos.

SENSIBILIDAD A PROYECTOS ALTERNATIVOS Y COMPLEMENTARIOS

Se debe correr el modelo cambiando los tiempos de puesta en marcha de proyectos competitivos y complementarios en al menos +/- 2 años.

IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS Y MITIGACIÓN

Se debe hacer una identificación inicial de los riesgos de tráfico del proyecto. Esta identificación debe iluminar todas las tareas de modelación y levantamiento de datos.

Además, en el momento del análisis de sensibilidad, se debe completar la identificación de riesgos y hacer una evaluación de cuales son los más importantes.

Es posible que algunos de estos riesgos sean mayores y requieran de alguna acción mitigadora a incluirse en los términos de la concesión.

17. RECONOCIMIENTOS

Los principales autores de ese estudio fueron Dr. Luis Willumsen, Profesor Juan de Dios Ortúzar, Jorge Ruiz Nakazone, Lucía Ferreira, mas aportes de otros profesionales de sus empresas.

Las recomendaciones que aquí se presentan se han beneficiado de los comentarios, críticas y sugerencias de numerosos profesionales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, entidades financieras y calificadoras de riesgo. En particular, las contribuciones de los Ingenieros Oscar De Buen, Director General de Desarrollo Carretero, Daniel Devesa, Juan José Erazo, Francisco Calvario y Néstor Valdez integrantes de la Dirección General de Desarrollo Carretero fueron determinantes del producto final.

ANEXO A

EL MODELO LOGIT: ASPECTOS TÉCNICOS

I EL MODELO LOGIT JERÁRQUICO

En contextos bidimensionales como el de la Figura 8.2, es posible definir la siguiente función de utilidad:

$$U(i, j) = U_j + U_{i/j}$$

donde i denota alternativas al nivel inferior y j el nivel superior (nido) al que pertenecen. En términos de utilidades representativas y términos estocásticos, la formulación queda como:

$$U(i, j) = V(i, j) + \varepsilon(i, j)$$

donde $V(i, j) = V_j + V_{i/j}$ y $\varepsilon(i, j) = \varepsilon_j + \varepsilon_{i/j}$

La definición de los errores estocásticos, que es clave en este caso, puede sintetizarse de la siguiente forma:

- Los ε_j y $\varepsilon_{i/j}$ son independientes para todo (i, j)
- Los errores $\varepsilon_{i/j}$ distribuyen independiente e idénticamente (IID) Gumbel con parámetro de escala λ
- Los errores ε_j distribuyen con varianza σ_j^2 y tal que la suma de U_j y el máximo de $U_{i/j}$ distribuye Gumbel con parámetro de escala β .

Estas hipótesis tienen como consecuencia la siguiente relación entre las varianzas de los errores:

$$Var(\varepsilon(i, j)) = Var(\varepsilon_j) + Var(\varepsilon_{i/j})$$

que, aprovechando que las distribuciones son Gumbel, queda como:

$$\frac{\pi^2}{6\beta^2} = \sigma_j^2 + \frac{\pi^2}{6\lambda_j^2}$$

llevando a
$$\frac{\beta}{\lambda_j} = \left(1 + \frac{6\sigma_j^2\lambda_j^2}{\pi^2}\right)^{-1/2}$$

Esta última ecuación implica la siguiente condición estructural para el modelo: $\beta \leq \lambda_j$. Si se

define al "parámetro estructural" $\phi_j = \frac{\beta}{\lambda_j}$, la condición anterior pasa a ser:

$$\phi_j \leq 1$$

y cuando $\beta = \lambda_j$ (esto es, $\phi_j = 1$), el nido colapsa quedando sus alternativas al nivel de la raíz; si esto ocurre en todos los casos, el NL colapsa al MNL pues no hay evidencia de correlación ($\sigma_j^2 = 0$). Por otro lado, si $\beta > \lambda_j$ (esto es, $\phi_j > 1$), la estructura jerárquica postulada es incompatible con la base teórica de esta formulación.

II EL MODELO LOGIT MIXTO

En este modelo, el vector de coeficientes θ_q para cada individuo se puede expresar como la suma de su media poblacional θ^* y desviaciones individuales η_q (que representan los gustos del individuo q en relación a los gustos promedio de la población):

$$U_{jqt} = \theta^* X_{jqt} + \eta_q X_{jqt} + \varepsilon_{jqt}$$

De esta forma, la parte no observada de la utilidad ($\eta_q X_{jqt} + \varepsilon_{jqt}$) está correlacionada sobre opciones y situaciones debido a la influencia de η_q . Es posible lograr patrones muy generales de correlación, variación de gustos y heteroscedasticidad, mediante una adecuada especificación de parámetros y variables.

Por ejemplo, una generalización heterocedástica del modelo NL se obtiene simplemente definiendo una variable muda para cada nido (que toma valor uno para todas las opciones en el nido y cero para alternativas fuera del nido), y aceptando que el coeficiente de cada variable específica al nido varíe en forma aleatoria; esto induce correlación en la parte no observada de la utilidad de las opciones en el nido (pero no induce correlación entre nidos).

Si se conocieran los valores de θ_q se podrían estimar fácilmente las probabilidades de elección dado que como los ε_{jqt} distribuyen IID Gumbel, se trataría de un modelo MNL. Si suponemos que los gustos varían en la población con una función densidad dada por $f(\theta/\tau^*)$, donde τ^* representa los parámetros de la distribución (por ejemplo, media y desviación estándar de los gustos de la población), la probabilidad de elección está dada por la integral de la probabilidad logit (para un valor dado de θ) ponderada por la función densidad de θ . Esto es:

$$P_{qit}(\tau^*) = \int \frac{e^{\theta_{qit} X_{qit}}}{\sum_{A_j \in \underline{A}(q)} e^{\theta_{qit} X_{qit}}} f(\theta/\tau^*) d\theta$$

Notar que hay dos tipos de parámetros en esta formulación. Por un lado está el vector de coeficientes θ_θ que representan los gustos del individuo. Por otro lado, la distribución de estos gustos en la población tiene parámetros τ^* que representan, por ejemplo, la media y covarianza de los parámetros θ en la población. El objetivo del modelo es estimar precisamente estos últimos.

Estimación de modelos

Se desea estimar los coeficientes θ_{kj} que aparecen en la definición de V_{ijq} ; para esto, como ya señalamos, se debe recurrir al método de máxima verosimilitud. Consideremos en primer lugar el caso simple en que la función de utilidad representativa V es lineal en sus parámetros. La idea detrás del método de máxima verosimilitud es la siguiente: aunque una muestra pueda provenir (o ser generada) de distintas poblaciones, existe una para la cual hay mayor probabilidad que esto ocurra.

Así, los estimadores máximo-verosímiles son el conjunto de parámetros que generarían más a menudo la muestra observada. Para ilustrar esta idea, consideremos una muestra de n observaciones de alguna variable z , provenientes de una población caracterizada por un parámetro desconocido θ (pudiendo ser éste la media, varianza, etc.) y denotémoslas por (z_1, z_2, \dots, z_n) .

Ya que z es una variable aleatoria, tiene una función densidad asociada que denotaremos por $f(z/\theta)$, puesto que depende de los valores de θ . Si todos los valores de z en la muestra son independientes (lo que es natural en la mayoría de los casos que nos interesan), podemos escribir la función de densidad como:

$$f(z_1, z_2, \dots, z_n/\theta) = f(z_1/\theta) \cdot f(z_2/\theta) \cdot \dots \cdot f(z_n/\theta)$$

La interpretación de esta función conjunta es que los z son variables y θ es fijo. Si ahora invertimos el proceso y suponemos que los z son conocidos y fijos, y θ una variable, se puede interpretar a la expresión anterior como una función de verosimilitud y no de densidad conjunta. Si se maximiza esa función respecto a θ , el resultado se llama estimador de máxima verosimilitud, ya que es el valor de θ que tiene mayor probabilidad de haber generado la muestra observada; esta idea puede ser extendida a varios parámetros.

Para maximizar la función de verosimilitud, se procede como es usual, esto es, derivando parcialmente respecto de los θ e igualando a cero. Normalmente se maximiza la función logaritmo de la verosimilitud puesto que es más manejable y tiene el mismo máximo. Para el MNL la función de verosimilitud se comporta bien y tiene un máximo único si la utilidad es lineal en los parámetros.

Recapitulemos:

$$P_{iq} = \frac{e^{V_{iq}}}{\sum_{A_j \in A(q)} e^{V_{jq}}}$$

- El modelo MNL está dado por la siguiente expresión:
- Las funciones de utilidad lineales en los parámetros tienen la siguiente forma:

$$V_{iq} = \sum_k \theta_{ki} x_{kiq}$$

Para una alternativa A_i dada, es posible que uno de los atributos x tome el valor uno para todas las observaciones q . En este caso, el coeficiente θ correspondiente se interpreta como una constante específica (específica a la opción A_i). No es posible especificar una constante como ésta para cada alternativa, ya que el modelo trabaja en base a diferencias. Esto se puede ver notando que el MNL se puede escribir como

y por lo tanto no es posible estimar N constantes si hay N opciones. Lo que se hace es fijar una de las constantes, como referencia con valor cero sin pérdida de generalidad, y las $N - 1$ restantes se obtienen del proceso de estimación.

El resto de las variables \underline{x} pueden ser:

- genéricas, si aparecen en la función de utilidad de todas las opciones y θ_{ik} se puede reemplazar por θ_k .
- específicas, si x_{ik} sólo aparece en V_i .

Notar que el caso más general es con sólo variables específicas, ya que las genéricas imponen una condición de igualdad de coeficientes que se puede probar estadísticamente.

Para estimar el modelo $P_{iq} = P_{iq}(V_{iq})$, en que $V_{iq} = V_{iq}(\underline{\theta})$, se requieren observaciones respecto a las variables \underline{x} y respecto a las elecciones C_q de una muestra de Q individuos. Estos valores de x_{ikq} son tanto respecto a la opción elegida, como al resto de las disponibles para cada individuo.

Si todas las observaciones de la muestra son independientes, la expresión para la función de verosimilitud es sencillamente la multiplicación de las probabilidades de escoger, de acuerdo al modelo, la alternativa efectivamente seleccionada por cada individuo. Así, si por ejemplo:

- el individuo 1 escoge la opción A_1
- el individuo 2 escoge la opción A_3
- el individuo 3 escoge la opción A_1
- el individuo 4 escoge la opción A_2 , etc.

entonces:

$$L = P_{11} \cdot P_{32} \cdot P_{13} \cdot P_{24} \dots$$

Ahora, si definimos la siguiente variable muda:

$$g_{jq} = \begin{cases} 1 & \text{si } q \text{ escoge } A_j \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

La función de verosimilitud puede escribirse, en general, como:

$$L = L(\theta) = \prod_{q=1}^Q \prod_{A_j \in \underline{A}(q)} P_{jq}^{g_{jq}}$$

Trabajando con su logaritmo, como es usual, se tiene que la función a maximizar es:

$$\ln L(\theta) = l(\theta) = \sum_{q=1}^Q \sum_{A_j \in \underline{A}(q)} g_{jq} \ln P_{jq}$$

Maximizando $l(\theta)$ es posible encontrar un conjunto de estimadores máximo verosímiles $\hat{\theta}$ que se distribuyen asintóticamente Normal $(\underline{\theta}, \underline{V})$, en que:

donde $E(\cdot)$ indica el operador valor esperado. Además, $-2l(\hat{\theta})$ distribuye asintóticamente χ^2 con Q grados de libertad.

Todo lo anterior implica que aun cuando pueda tener sesgo en muestras pequeñas, éste desaparece para muestras (Q) lo suficientemente grandes (cuánto es grande depende de cada problema, pero en general basta con conjuntos de datos entre 300 y 1000 observaciones).

Ahora bien, aun cuando se cuenta con una expresión explícita para la matriz de covarianza de los parámetros, \underline{V} , el cálculo de los parámetros es un proceso iterativo.

Sustituyendo la expresión de la función de utilidad en la ecuación del modelo MNL:

$$P_{iq}(\theta) = \frac{e^{\sum_k \theta_k x_{kiq}}}{\sum_{A_j \in \underline{A}(q)} e^{\sum_k \theta_k x_{kiq}}}$$

y derivando respecto a θ_k se puede probar que:

$$\frac{\partial l(\theta)}{\partial \theta_k} = \sum_{q=1}^Q \sum_{A_j \in \underline{A}(q)} \{g_{jq} - P_{jq}(\theta)\} \cdot x_{kjq} = 0 \quad k = 1, \dots, K$$

De aquí es fácil ver que si el conjunto de variables incluye una constante específica definida como:

$$x_{kjq} = \begin{cases} 1 & \text{para } j = q, \forall q \in Q \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

se cumple que:

$$\sum_{q=1}^Q g_{jq} = \sum_{q=1}^Q P_{jq}(\theta)$$

Por lo tanto, no es apropiado comparar la suma de probabilidades para una opción dada con el número total de observaciones que la seleccionaron, si el modelo incluye constantes específicas. Como tampoco es posible comparar las probabilidades individuales con los valores de g_{jq} , que no son 0 ó 1, no existe para estos modelos una medida de bondad de ajuste como el R^2 de regresión lineal (porcentaje de la variación total explicada por la regresión).

Con relación a $l(\theta)$ conviene mencionar los siguientes casos relevantes:

- $l(0)$ corresponde al modelo que denotaremos como alternativa equiprobable; en éste todos sus parámetros son cero, por lo que la probabilidad de elegir cualquiera para cada individuo es $1/Nq$ (en que Nq es el número de opciones que éste tiene disponibles).
- $l(C)$ corresponde al modelo de sólo constantes, que tiene la ventaja sobre el anterior de, al menos, replicar las proporciones de mercado observadas (también se conoce como modelo de market shares).

- $l^*(\hat{\theta})$ es la función de log-verosimilitud del modelo estimado.
- $l^* = 0$ es el máximo valor que puede tomar la función log-verosimilitud (ya que como $L(\theta) = \prod P_i$, su máximo valor es uno), y corresponde al que se conoce como modelo *completamente saturado*.

Anteriormente se mencionó que los parámetros $\hat{\theta}$ estimados por máxima verosimilitud, son asintóticamente Normales con matriz de covarianza \underline{V} . Debido a esto es posible, tal como en regresión lineal, calcular varios estadígrafos de interés en el proceso de seleccionar el modelo más adecuado.

El test t para la significancia de un parámetro θ_k

Los programas de estimación entregan, en convergencia, la matriz de covarianza $\underline{V} = \{\sigma_{kk}^2\}$ que contiene los errores estándar de los parámetros estimados. De este modo, si $\theta_k = 0$, se puede definir el valor t por:

$$t = \frac{\hat{\theta}_k}{\sigma_{kk}} \sim N(0,1)$$

Con esto es posible verificar si θ_k es significativamente distinto de cero. Notar que no es exactamente un test t , sino que una aproximación, para muestras grandes, en que t se prueba con la distribución Normal. Así, si $t > 1,96$ para $(1 - \alpha) = 95\%$, se rechaza la hipótesis nula $\theta_k = 0$ y se acepta que el atributo x_k tiene un efecto significativo.

Es interesante mencionar que muchas propiedades importantes de los modelos de elección discreta se pueden expresar como restricciones lineales de algún modelo más general, por ejemplo:

Atributos genéricos: Un modelo general (sin constantes específicas) para tres alternativas y dos atributos (tiempo y costo), podría ser:

$$\begin{aligned} V_a &= \theta_1 C_a + \theta_2 T_a \\ V_b &= \theta_3 C_b + \theta_4 T_b \\ V_t &= \theta_5 C_t + \theta_6 T_t \end{aligned}$$

Ahora supongamos que, por ejemplo, se piensa que los costos no tienen por qué ser percibidos en forma distinta por los individuos y que debieran especificarse como genéricos. Esta hipótesis puede plantearse como las siguientes restricciones lineales:

$$\begin{aligned} \theta_3 - \theta_1 &= 0 \\ \theta_5 - \theta_1 &= 0 \end{aligned}$$

dado esto, se puede especificar un modelo restringido donde el parámetro que pondera al costo es el mismo para todas las alternativas.

$$\theta_3 = \theta_5 = \theta_1 = \theta_c$$

Homogeneidad de una muestra: Es posible probar si los coeficientes de un modelo son apropiados para dos subpoblaciones (por ejemplo, a ambos lados de un río con pocos cruces). Para esto se especifica un modelo general con distintos coeficientes para las dos subpoblaciones y luego se prueba la igualdad de parámetros como restricciones lineales.

Para realizar estas pruebas se ocupa el test de razón de verosimilitud. Para llevarlo a cabo se debe correr en primer lugar el programa de estimación para el caso más general, obteniéndose parámetros $\hat{\theta}$ y una log-verosimilitud en convergencia $l^*(\hat{\theta})$. Luego se corre nuevamente el programa para el modelo restringido, obteniéndose parámetros $\hat{\theta}_r$ y una nueva función $l^*(\hat{\theta}_r)$.

Entonces, si el modelo restringido es una especificación correcta, el estadígrafo

$$LR = -2 \left\{ l^*(\hat{\theta}_r) - l^*(\hat{\theta}) \right\}$$

distribuye asintóticamente χ^2 con r grados de libertad, en que r es el número de restricciones lineales. Esto sólo es posible de aplicar cuando un modelo es una versión restringida de otro; si se desea comparar modelos distintos, se debe utilizar una muestra de validación (Ortúzar, 2000).

H_0 se rechaza si $LR > \chi_{g, del. 95\%}^2$ y esto quiere decir que el modelo restringido es erróneo. Con esta prueba se han estudiado, además, casos de no linealidad (ej.: tiempo de caminata) y variación de gustos (por ejemplo, en función del ingreso). Un caso especial de test de razón de verosimilitud es para ver si todos los componentes de $\underline{\theta}$ son iguales a cero. En el modelo equiprobable este test es, obviamente, de escasa ayuda, puesto que dicho modelo ni siquiera garantiza la reproducción de las proporciones de mercado de cada opción. Así, cualquier parámetro va a aportar algo en explicar la variabilidad de los datos.

En este sentido, una dócima más sería consistir en utilizar como modelo base o de referencia al modelo de sólo constantes (todas las variables explicativas exceptuando las constantes específicas son cero), en que si todos los individuos tienen disponibles todas las opciones se cumple la condición:

$$P_{jq}(A(q), \underline{\theta}) = ms_j$$

y ms_j es la proporción de mercado (*market share*) de la opción A_j .

En el caso del modelo equiprobable, que es más sencillo, si hay k parámetros en total y $l(0)$ es la log-verosimilitud del modelo equiprobable, entonces bajo la hipótesis nula $H_0: \underline{\theta} = 0$, se tiene que la razón de verosimilitud:

$$LR(0) = -2\{l(0) - l^*(\underline{\theta})\}$$

distribuye χ^2 con k grados de libertad. Una ventaja de este test es su gratuidad, en el sentido que no es necesario calcular $l(0)$ especialmente, ya que todos los programas de estimación parten su búsqueda del óptimo desde $\underline{\theta} = 0$. Sin embargo, el test es débil ya que si se rechaza (como siempre ocurre), sólo quiere decir que los parámetros $\hat{\underline{\theta}}$ explican mejor los datos que un modelo sin poder explicativo. Es obvio que para modelos con constantes específicas (en que al menos se reproducen las proporciones de mercado), el test no es apropiado.

Para realizar la dócima con el modelo de sólo constantes se requiere, en general, una corrida adicional del programa para calcular $l(C)$, excepto cuando todos los individuos tienen las mismas opciones, ya que en ese caso se cumple que:

$$l(C) = \sum_{j=1}^N Q_j \ln \frac{Q_j}{Q}$$

en que Q_j es el número de individuos que escoge A_j . H_0 se rechaza, igual que antes, si $LR(C) = -2\{l(C) - l^*(\underline{\theta})\}$ es mayor o igual que $\chi^2_{(k-c);95\%}$, en que k es el número total de parámetros y c el número de constantes específicas. Por otro lado, ya comentamos que no es posible tener un índice como R^2 en modelos de elección discreta. Sin embargo, es de interés contar con algún tipo de índice de bondad de ajuste que esté entre cero (no hay ajuste) y uno (ajuste perfecto), y que sirva para comparar modelos. El ideal sería que también estuviera relacionado con una distribución de probabilidad conocida a fin de posibilitar una adecuada dócima de hipótesis.

Un índice que cumple varias de estas características es:

$$\rho^2 = 1 - \frac{l^*(\hat{\underline{\theta}})}{l(0)}$$

Sin embargo, aunque se comporta bien en los límites (0 y 1), no tiene una interpretación intuitiva para valores intermedios; de hecho valores como 0.4 pueden constituir excelentes ajustes.

Como un índice de este tipo se puede calcular en base a cualquier hipótesis nula, es importante escoger la más apropiada. Se ha demostrado que el modelo equiprobable no es en general adecuado, y de hecho es fácil probar que el valor mínimo de ρ^2 , en modelos con

constantes específicas, varía con la proporción de personas que escogen cada opción (Ortúzar, 2000).

Afortunadamente, existe un ajuste sencillo que permite resolver estas dificultades y consiste en definir al índice en base al modelo de sólo constantes:

$$\bar{\rho}^2 = 1 - \frac{l^*(\hat{\theta})}{l(C)}$$

Este estadígrafo está entre 0 y 1, es comparable para distintas muestras y está relacionado con la distribución de χ^2 .

La estimación de modelos logit más complejos y poderosos, como el logit jerárquico (NL) o el logit mixto (ML), es progresivamente más difícil y requiere de software especializado cuya disponibilidad no es tan general como el utilizado para estimar el MNL. No obstante, la discusión anterior sobre índices de bondad de ajuste sigue siendo válida.

En el caso del NL, existen en la actualidad varios paquetes computacionales que hacen esta tarea en forma eficiente (estimación simultánea o de máxima verosimilitud completa), como ALOGIT, HieLoW y LIMDEP, pero tienen un costo de adquisición y manutención que no es despreciable.

Si bien es posible estimar el modelo en forma secuencial, como una serie de modelos MNL con el software estándar disponible para esa tarea, esto no es recomendable en la práctica ya que los resultados son sólo adecuados en el caso de muestras muy grandes. Una posibilidad, entonces, es utilizar software no profesional, disponible en la web como es el caso de BIOGEME²⁰, que permite no sólo estimar este modelo sino que funciones bastante más complejas, flexibles y poderosas como el NL.

En el caso del modelo logit mixto, u otras estructuras que no tengan una función analítica cerrada debido a la flexibilidad que otorga la matriz de covarianza general supuesta para los errores ϵ (como el modelo Probit, por ejemplo), se debe recurrir a técnicas numéricas para resolver la integral múltiple implícita en el problema de encontrar la alternativa de mayor utilidad.

Así, en estos casos se habla de máxima verosimilitud simulada, y es necesario utilizar técnicas especiales que involucran la generación de números aleatorios y la simulación de miles de instancias del problema para asegurar convergencia. No es del caso discutir el tema en este manual, pero una descripción de los problemas y métodos se puede encontrar en los textos de Ortúzar (2000, pág. 154-160) y Ortúzar y Willumsen (2001, pág. 275-279).

²⁰ <http://roso.epfl.ch/biogeme>

Finalmente, una acabada discusión de los temas involucrados en la estimación y uso de estos modelos en la práctica se puede encontrar en Sillano y Ortúzar (2005 ²¹).

²¹ Sillano, M. y Ortúzar, J. de D. (2005) Willingness-to-pay estimation with mixed logit models: some new evidence. *Environment and Planning* 37A, 525-550.