

## **MODELACIÓN DE LA DEMANDA POR VIAJES INTERURBANOS DE PASAJEROS EN LA MACROZONA SUR DE CHILE**

Tristán E. Gálvez P  
CITRA Ltda.  
Praga 534, Santiago, Chile  
FONOS : 209 7922 – 225 0049 / FAX : 2255991  
citra@terra.cl

Jorge Vera G.  
CIPRES Ingeniería Ltda.  
Víctor Hendrich 360, Santiago, Chile  
FONOS : 665 6223 – 665 6946 / FAX : 635 4335  
jorgeverag@cipres.cl

### **RESUMEN**

Este trabajo se inserta dentro del marco de los estudios estratégicos del transporte interurbano en Chile (ESTRASUR) y fue orientado a la especificación y calibración de modelos de demanda de pasajeros en la Macrozona Sur del país, constituida por las regiones VII, VIII, IX y X. Para enfrentar el problema, el enfoque metodológico se desarrolla bajo el supuesto tradicional de que los viajes de las personas pueden ser representados -de manera simplificada- mediante una secuencia de distintos procesos de decisión, que se inician desde el momento en que la gente decide viajar y terminan en la elección de destino y modo de transporte.

El trabajo reporta el procesamiento y validación de la información necesaria para realizar la calibración de los modelos. Dicha información es recabada a partir de fuentes tales como: las encuestas de viajes realizadas en la Macrozona el año 1993, información estadística de ventas de pasajes aéreos y ferroviarios, Plan Nacional de Censos de la Dirección de Vialidad e información de contadores automáticos de flujos vehiculares, información comunal del sistema de actividades y socioeconómica, además de mediciones específicas de flujos vehiculares y encuestas de preferencias (reveladas y declaradas), éstas últimas obtenidas en las temporadas de verano y normal del año 1997. Una vez procesada esta información, mediante un proceso exploratorio exhaustivo, basado en criterios de carácter econométrico y de consistencia lógica, se analizan las distintas formas funcionales, variables y segmentaciones, que permitirán representar de manera adecuada y a nivel agregado, la demanda de pasajeros por transporte interurbano en el área señalada anteriormente. Como resultado del trabajo, se obtiene una serie de modelos de Generación, Atracción y Distribución Conjunta de Viajes (Modelos de Demanda Directa) y de Partición Modal; todos ellos segmentados según temporada y propósito de viaje, y se presenta las principales conclusiones metodológicas derivadas del trabajo realizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Objetivos

El objetivo principal del este trabajo es presentar la especificación y calibración de modelos de demanda de transporte interurbano de pasajeros para la Macrozona Sur de Chile, los cuales fueron inicialmente desarrollados en un estudio de consultoría realizado por ASTRA Ltda. (2000). Dicho estudio se insertó en el marco de los estudios complementarios del proyecto ESTRASUR, desarrollado por SECTRA, cuyo objetivo general es el desarrollo y la implementación de un enfoque metodológico que se constituya en una herramienta adecuada para explicar y predecir el comportamiento y/o funcionamiento del Sistema de Transporte Interurbano de la Macrozona Sur. Se consideró inicialmente la calibración de los siguientes modelos de demanda de transporte de pasajeros, estratificados según temporada (verano y normal) y propósito de viaje:

- Modelos agregados de Generación y Atracción.
- Modelos agregados de Distribución doblemente acotados.
- Modelos agregados de Generación - Atracción - Distribución conjunta no acotados
- Modelos desagregados de Partición Modal.

Como un segundo objetivo específico del estudio, se consideró la formulación de hipótesis relativas al desarrollo económico y localización de actividades, que permitan predecir las variables explicativas de los modelos de demanda de viajes de pasajeros, para uno o varios cortes temporales futuros.

### 1.2. Descripción del Area de Estudio

Se ha definido la Macrozona Sur como la parte de Chile Continental situada entre las latitudes 34° 42' y 44° 05' sur, abarcando las regiones VII, VIII, IX y X del Territorio Nacional. El sistema de actividades de esta área se compone por sectores productivos que concentran parte importante de la producción nacional, particularmente en lo que a actividades forestales y agropecuarias se refiere. En términos de actividades de personas, esta área representa uno de los principales polos de atractivo turístico del país, en la medida que recibe prácticamente un 40% de los turistas y cuenta con un tercio de los establecimientos turísticos nacionales. Por otra parte, su ubicación espacial permite considerarla como un conjunto homogéneo y de continuidad espacial, por cuanto se encuentra suficientemente alejada del sector central de país y, con ello, de la atracción de la Región Metropolitana y, además, debido a sus condiciones naturales que la separan de la zona austral del país.

Según los antecedentes del Censo de 1992, con 4.300.497 habitantes, la Macrozona Sur alberga aproximadamente el 32% de la población nacional y, de ésta, un 68% vive en áreas urbanas; a nivel nacional dicho porcentaje es del 86%. En cuanto a su superficie, la Macrozona Sur cuenta con 166.109 km<sup>2</sup>, lo cual corresponde a un 22% del territorio chileno continental e insular.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Recopilación de Antecedentes

El paso inicial de la metodología fue la recopilación de los antecedentes sobre los cuales se debería realizar el trabajo. Ello incluyó no sólo caracterizar la oferta y la demanda de transporte, sino también recopilar antecedentes respecto del sistema de actividades y las características socioeconómicas de la población en la Macrozona Sur:

- La zonificación adoptada y la definición de las redes modales de transporte son comunes para el conjunto de estudios ESTRASUR.
- La información de viajes fue obtenida a partir de la encuesta realizada en la Macrozona Sur por CADE (1993).
- Dicha información fue complementada con conteos de flujo vehicular, estadísticas de transporte de pasajeros en avión y tren, y encuestas de Preferencias Reveladas y Declaradas.
- Respecto del sistema de actividades y las características socioeconómicas, la recopilación de información estuvo orientada principalmente a obtener valores respecto de las variables que intuitivamente permitirían explicar la atracción y generación de viajes, lo cual debería ser comprobado en la etapa de calibración y selección de modelos.

### 2.2. Construcción de Matrices de Viajes

A continuación se procedió a construir matrices de viajes para el año 1996, adoptado como año base para la calibración de modelos. El proceso comenzó con las matrices generadas a partir de la encuesta de 1993, las cuales fueron actualizadas mediante técnicas de maximización de entropía, utilizando el software SATME2, para lo cual fue necesario construir redes de simulación. Se usó datos sobre flujos viales en arcos de la red, estadísticas de transporte de pasajeros por ferrocarril y estadísticas de transporte de pasajeros por vía aérea. Las matrices finalmente obtenidas fueron segmentadas de acuerdo a los siguientes criterios:

- Por temporada: Normal y Verano (2 categorías)
- Según sean basados en el hogar (esto es, el origen del viaje o su destino es la zona de residencia del viajero), o no basados en el hogar (2 categorías)
- Por propósito de viaje: Laboral, Obligado y Opcional (3 categorías)
- Por modo de transporte utilizado: Tren, Avión, Bus y Automóvil (4 categorías)

Se obtuvo así finalmente 48 matrices, correspondientes a los cruces entre las categorías anteriores. Este número aumenta a 180 matrices si se cuenta además el total de cada segmentación como una categoría.

### 2.3. Modelos de Generación y Atracción de Viajes

El paso siguiente fue la calibración de modelos de Atracción y Generación de viajes. La metodología seguida en ambos casos fue similar. El objetivo central de la calibración de estos modelos consistió en intentar hallar relaciones funcionales entre el número de viajes que tiene por destino u origen una zona dada, obtenido de las distribuciones marginales de las matrices de viajes y ciertas variables o atributos de dicha zona.

Para hallar dichas relaciones funcionales se utilizó software estadístico de regresión lineal múltiple (Aptech Systems, 1994) sobre secciones cruzadas, esto es, se trabajó con datos para el conjunto de zonas del área en estudio para un año calendario dado. El gran número de variables obligó a efectuar un proceso exploratorio orientado a seleccionar, para cada una de las segmentaciones de viajes, aquellas variables con un mayor poder explicativo de la atracción o generación de viajes.

Los criterios principales de selección de variables fueron su significancia estadística, medida mediante el estadígrafo  $t$ , su validez desde el punto de vista intuitivo, y la sensatez de los signos y magnitudes de los coeficientes obtenidos.

Por otra parte, un examen de los modelos preliminares sugirió la conveniencia de agregar nuevas segmentaciones de viajes, para intentar superar algunos casos en que los modelos obtenidos habían sido globalmente insatisfactorios. Se definió así el propósito **no opcional** en temporada de verano, agregando los propósitos laboral y obligado; y el propósito **no laboral** en temporada normal, agregando los propósitos opcional y obligado.

A continuación se procedió a refinar los modelos obtenidos, probando especificaciones diferentes a la lineal. Las formas funcionales examinadas fueron las polinomiales y de tipo Box-Cox. Además, en los casos en que el modelo exploratorio presentaba heterocedasticidad, se calibró modelos de mínimos cuadrados generalizados. Finalmente, se llegó a recomendar las mejores segmentaciones de viajes y las mejores especificaciones de modelos para cada una de estas segmentaciones, en términos de formas funcionales y variables.

## 2.4. Modelos de Partición Modal

La siguiente etapa se orientó a la calibración de los modelos de partición modal. Para la calibración de modelos desagregados de partición modal se utilizó dos fuentes de información. La primera de ellas consiste en datos provenientes de encuestas de Preferencias Declaradas (PD), en las cuales los usuarios declaran la elección que harían ante alternativas hipotéticas de viaje. La segunda fuente se refiere a datos provenientes de encuesta de Preferencias Reveladas (PR), en las cuales se constata la elección de modo efectivamente hecha por el usuario para el viaje específico que se encuentra realizando en el momento de la encuesta.

Para la calibración se consideró dos temporadas: Verano y Normal. El levantamiento de los datos se realizó en los meses de Enero y Febrero de 1997 para la temporada de verano y Noviembre del mismo año para la temporada normal. Se distinguió además por propósito del viaje. La desagregación corresponde a la definida para los modelos de generación y atracción de viajes: laboral y no laboral para la temporada normal; y opcional y no opcional para la temporada de verano. Esto significa que para cada temporada se obtuvo tres modelos, incluido el global que no distingue propósito.

Utilizando software estadístico, fueron calibradas tres familias de modelos según los datos utilizados: datos de preferencias reveladas (PR), datos de preferencias declaradas (PD) y datos mixtos (PD y PR). Para los datos de PR se estimó modelos multinomiales con diversas especificaciones lineales, incluyéndose variables como hora de salida del viaje, su longitud, quien

paga el viaje, el ingreso familiar, el número de personas en el grupo que viaja, además del tiempo de viaje, costo y distancia de acceso al ferrocarril y al avión. También se probó especificaciones no lineales (tipo Box-Cox) para la función de utilidad, pero sólo en las variables que resultaron relevantes en los modelos lineales, que fueron el tiempo, el costo y la distancia de acceso. Adicionalmente se analizó formulaciones de tipo logit jerárquico, pero éstas no resultaron consistentes, o bien, no convergieron.

En el caso de la estimación con datos de PD se usó especificaciones lineales, dado que los diseños experimentales sólo permitían captar efectos de primer orden entre las variables y las preferencias de los individuos.

En la calibración con datos mixtos se utilizó el método de máxima verosimilitud aplicado a la función conjunta de datos de PR y de PD, con lo cual es posible determinar el estadístico t para el parámetro de escala entre las varianzas de las dos muestras. En este caso se probó especificaciones lineales y del tipo Box-Cox.

Estos procesos de calibración de modelos desagregados permitieron concluir que las variables relevantes en la elección del modo de transporte son el tiempo de viaje, el costo del viaje y la distancia de acceso y egreso; además del ingreso familiar y el tamaño del grupo de viajeros. A continuación se procedió a realizar la segunda etapa de la calibración, que corresponde a estimar los modelos agregados. Este proceso implica calcular un factor de escala para la utilidad y nuevas constantes modales. En esta etapa, los atributos de los modos corresponden a valores medios para viajes entre cada par de zonas, en lugar de valores específicos para cada viaje individual. Consistente con lo anterior, los datos sobre viajes en cada modo corresponden a las matrices origen-destino, en lugar de viajes individuales. Como estas matrices no distinguen los diversos servicios o clases del bus y del tren, se construyó una utilidad por modo agregado calculada como la máxima utilidad esperada entre todos los servicios o clases disponibles del modo, que corresponde a la logsuma o EMU.

La calibración se realizó a partir de los modelos desagregados calibrados con datos mixtos y especificaciones de la utilidad lineales y no lineales. Finalmente, se determinó que los mejores modelos de partición modal corresponden a los calibrados con datos mixtos y especificaciones de la utilidad no lineales.

## 2.5. Modelos de Distribución de Viajes

El paso siguiente fue la calibración de modelos de distribución, los cuales intentan relacionar el volumen de viajes en cada celda de la matriz origen-destino con el total de viajes que tienen origen en cada una de las zonas, el total de viajes que tienen destino en cada una de las zonas, y una medida de separación espacial de zonas, tal como la magnitud de los costos de transporte entre cada par de zonas. La calibración se realizó distinguiendo entre las categorías de viaje empleadas en los modelos anteriores, utilizando software estadístico. La fuente de datos empleada en el proceso de calibración corresponde a las matrices de viajes del año 1996, obtenidas como resultado de la actualización de la EOD de la Macrozona sur.

Los modelos de distribución calibrados corresponden a dos tipos: entrópicos doblemente acotados y gravitacionales con vectores de atracción y generación explícitos. En ambos casos se empleó la distancia como una primera medida del costo de viaje –aunque esto no permite analizar cambios en la distribución de viajes debidos a reducciones de tiempo de viaje o aumento de peajes– y se calibró modelos para cada propósito y temporada, comprobándose la influencia de esta variable en la distribución. Esto permitió ajustar el procedimiento de estimación de los parámetros para los modelos en que el costo de viaje corresponde a la logsuma de las utilidades de todos los modos disponibles para cada par origen-destino.

Tanto para los modelos entrópicos como para los gravitacionales, en la definición del costo generalizado de viaje, fueron probadas las distintas formas funcionales de la utilidad determinadas en la calibración y agregación de los modelos de partición modal.

De la estimación de los parámetros de los modelos de distribución entrópicos se obtuvo que los mejores resultados de ajuste corresponden a la especificación de la distancia como costo de viaje, pero por su poca utilidad fueron descartados. Los modelos con especificación de costo generalizado tienen indicadores de ajuste inferiores pero no deficientes, por lo que no es posible descartarlos sin realizar una validación de su capacidad para replicar las matrices observadas y su sensibilidad a las variables de servicio.

Para la calibración de los modelos gravitacionales se adoptó el Método de Mínimos Cuadrados, para lo cual el modelo se linealizó aplicando el logaritmo natural. En este caso, todos los indicadores de ajuste tienden a ser menores que los alcanzados con los modelos entrópicos. Aunque se probaron diversas especificaciones para la función que representa el costo – tipo potencia, tipo exponencial y combinada – no se consiguió mejorar el ajuste y, al igual que en el caso anterior, la especificación basada en la distancia es superior a la basada en la logsuma de las utilidades modales. De esta manera se estableció la conveniencia de utilizar modelos de tipo entrópicos, para validar la capacidad predictiva del uso secuencial de modelos de Generación, Atracción y Distribución de viajes, a fin de obtener resultados comparativos con las matrices de viaje calibradas según la desagregación de la demanda adoptada. También se estableció la conveniencia de utilizar en la modelación de la demanda modelos con especificación del costo generalizado equivalente a la logsuma con utilidad del tipo no lineal, en la medida que dichas especificaciones entreguen mejores ajustes de los modelos que otras.

## **2.6. Modelos de Generación, Atracción y Distribución Conjunta**

El último paso fue el correspondiente a la calibración de modelos de Generación, Atracción y Distribución Conjunta, cuya idea central es explicar y predecir la cantidad de viajes que se realizan entre cada par origen-destino de la Macrozona sur, en función de variables descriptivas a nivel comunal, como son las características socioeconómicas y del sistema de actividades, y una medida del costo de viaje entre cada par de zonas, tal como la distancia o el costo compuesto de viaje basado en la función de utilidad de los modelos de partición modal.

La idea central en la modelación fue que tanto la cantidad de viajes generados como los atraídos por una zona son función de las características socioeconómicas y las actividades que se localizan en ella. Adicionalmente el destino de cada viaje generado en una zona dependerá del costo que

implica viajar hasta dicho destino, como distancia, tiempo y dinero. Según lo anterior se intenta establecer relaciones funcionales entre la cantidad de viajes que se realizan entre cada par de zonas y las características de su sistema social y económico y el costo de viajar entre ellas.

La información socioeconómica empleada en la calibración de estos modelos corresponde a la misma que se utilizó para los modelos de generación y de atracción. Los datos del costo de viaje corresponden a la distancia entre cada par origen-destino y al costo generalizado, construido a base de las funciones de utilidad no lineales de los modelos de partición modal. La información de viajes se obtuvo de las matrices actualizadas al año 1996. La desagregación por propósito considerada en esta etapa correspondió a la misma usada en la calibración de los modelos de distribución y que se definió con los modelos de atracción y generación.

Para la especificación de los modelos se usó diversas formas funcionales, incluyendo aquellas variables socioeconómicas que resultaron relevantes en la calibración de los modelos de atracción y generación. Para la calibración se utilizó software estadístico. Los resultados intermedios obtenidos permitieron eliminar algunas variables que resultaron no significativas estadísticamente. Por otro lado, para definir el costo se utilizó la distancia y la logsuma de las utilidades del modelo de partición modal.

Además de las variables indicadas, fueron definidas variables mudas para captar el efecto de la división administrativa sobre los viajes y distinguir las zonas externas a la Macrozona. Es así como se definió una variable muda que indica si la zona es capital provincial, es capital regional, Santiago, el Norte, el extremo Sur, la V región o la VI región.

## 2.7. Validación y Selección de Modelos

La última etapa consistió en seleccionar los modelos a ser utilizados para fines predictivos. Para tales efectos, en una primera instancia se realizó una validación de todos los modelos que habían sido preseleccionados. Dicha validación se realizó sobre la base de la comparación de las matrices calibradas para la situación actual y los resultados de la aplicación directa de los modelos para el año de calibración, conforme a la desagregación de la demanda establecida. Esta comparación condujo a los siguientes resultados:

- Sistemáticamente, la aplicación de los modelos de Generación, Atracción y Distribución Conjunta presentaron mejores ajustes que los obtenidos con la aplicación secuencial de los modelos de Generación, Atracción y Distribución Doblemente Acotados.
- Como consecuencia de lo anterior, se estableció la conveniencia de utilizar, para fines predictivos, exclusivamente los modelos de Generación, Atracción y Distribución Conjunta, introduciendo algunas consideraciones y ajustes con el objeto de mejorar las predicciones.
- La principal consideración para fines predictivos, consiste en diferenciar la demanda exclusivamente a nivel de temporada y propósito de viaje, eliminando la distinción entre viajes basados y no basados en el hogar. Ello debido a que, prácticamente en la totalidad de los casos, los modelos obtenidos para viajes no

basados en el hogar presentan ajustes inferiores a los obtenidos para viajes basados en el hogar. Dicho efecto se supera al aplicar los modelos sin esta distinción.

Por otra parte, un análisis de las mayores diferencias entre las matrices calibradas y los resultados de la aplicación de los modelos seleccionados, sin distinción entre basados y no basados en el hogar, establece la conveniencia de introducir factores de ajuste, calculado como el cociente entre los viajes de la matriz calibrada y los viajes predichos por los modelos, para un total de 14 pares origen-destino, correspondientes a viajes de corta distancia con cierto grado de carácter suburbano. La introducción de dichos factores mejora sustancialmente las estimaciones, lográndose ajustes bastante satisfactorios y, por lo tanto, se recomienda incluirlos en las proyecciones futuras.

## **2.8. Proyecciones de Demanda**

Finalizado el proceso de validación y selección de modelos, para los modelos finalmente seleccionados, se realizó un análisis de sensibilidad con el objeto de verificar las elasticidades respecto de un grupo de variables de interés: población, costos de transporte y tiempo de viaje en tren.

El último paso del estudio consistió en estimar, usando los modelos seleccionados, proyecciones de la demanda por viajes en la MacroZona Sur para 5 cortes temporales futuros.

## **3. RESULTADOS**

A continuación se reporta un resumen de los principales resultados obtenidos en el trabajo. Ellos se refieren principalmente a las características de los modelos finalmente seleccionados para cada temporada (Normal y Verano), a la forma en que fueron satisfechas algunas interrogantes planteadas al inicio del estudio, a los resultados cuantitativos obtenidos y a las conclusiones metodológicas que es posible obtener de esta experiencia.

### **3.1. Demanda de viajes**

El primer paso del estudio fue lograr una buena estimación de la magnitud de la demanda por viajes interurbanos en la MacroZona Sur, para el año 1996, definido como base de proyección. Para ello se actualizó la encuesta de origen y destino de viajes realizada en la MacroZona Sur en 1993, utilizando las estadísticas de transporte de pasajeros por ferrocarril y por vía aérea, para el año 1996, así como extensos conteos de flujo de automóviles y buses en la red vial. Se distinguió tres propósitos de viaje: Laboral (al trabajo, del trabajo y por trabajo), Obligado (estudio, trámites y salud), y Opcional (compras, social, turismo y otros). Un resumen de los resultados obtenidos se presenta en el cuadro N° 1.

**Cuadro N° 1: Viajes por Día, según Temporada, Propósito y Modo de Transporte**

TEMPORADA	PROPÓSITO	AUTO	BUS	TREN	AVIÓN	TOTAL
VERANO	LABORAL	90.849	53.827	406	1.816	146.899
	OPCIONAL	122.905	179.506	4.054	1.884	308.349
	OBLIGADO	23.941	62.380	491	430	87.241
	TOTAL	237.695	295.713	4.951	4.130	542.489
NORMAL	LABORAL	83.636	83.989	895	2.113	170.633
	OPCIONAL	18.268	85.393	1.300	746	105.707
	OBLIGADO	19.027	113.861	852	173	133.913
	TOTAL	120.931	283.243	3.047	3.032	410.253

### 3.2. Agregación de la Demanda

Se obtuvo que la mejor desagregación de propósitos de viaje resultó diferente para cada temporada. Inicialmente se trabajó con tres propósitos de viaje: Laboral, Opcional y Obligado. Sin embargo, los mejores resultados fueron obtenidos, para temporada de Verano, agregando los propósitos laboral y obligado en un nuevo propósito denominado no opcional. Para temporada Normal, los mejores resultados fueron obtenidos agregando los propósitos opcional y obligado en un nuevo propósito denominado no laboral.

Se realizó además una extensa investigación para determinar la conveniencia incluir la distinción entre viajes basados y no basados en el hogar. Se esperaba que las variables explicativas de los viajes no basados en el hogar fueran diferentes a aquellas de los viajes basados en el hogar, de modo que al calibrar modelos independientes se obtendrían mejores resultados. Ello no fue así, por lo cual se decidió abandonar esta distinción, privilegiando los modelos globales que resultaron más simples y robustos.

### 3.3. Modelo de Partición modal

El modelo de partición modal finalmente elegido resultó ser función de las siguientes variables:

- Costo del viaje en cada modo dividido por el ingreso familiar y multiplicado por el número de viajeros
- Tiempo de viaje en cada modo
- Distancia de acceso al modo más la distancia de egreso de éste

Para calibrar este modelo se utilizó antecedentes recogidos sobre oferta de transporte, principalmente tarifas y tiempos de viaje en cada una de las redes correspondientes a los modos de transporte. Se realizó además encuestas de Preferencias Reveladas y de Preferencias Declaradas a los pasajeros de los diversos modos de transporte.

En el modelo de partición modal, las interrogantes principales se referían a la especificación de la función de utilidad. Los modelos finalmente elegidos son los siguientes:

$$\text{Temporada de Verano: } U = \alpha Cto^{\mu} + \beta TV^{\nu} + \gamma Acc^{\omega}$$

$$\text{Temporada Normal: } U = \alpha Cto^{\mu} + \beta TV^{\nu} + \gamma Acc$$

Donde

Cto : es el costo del viaje dividido por el ingreso familiar y multiplicado por el número de viajeros

Tv : es el tiempo de viaje,

Acc : es la distancia de acceso al modo más la distancia de egreso de este.

Los modelos finalmente seleccionados se muestran en el cuadro N° 2.

**Cuadro N° 2: Modelos Seleccionados de Partición Modal**

TEMPORADA	NORMAL				VERANO			
PROPÓSITO	LABORAL		NO LABORAL		OPCIONAL		NO OPCIONAL	
PARÁMETRO	ESTIMADOR	T-EST.	ESTIMADOR	T-EST.	ESTIMADOR	T-EST.	ESTIMADOR	T-EST.
TIEMPO	-0,027559	-2,2	-0,023654	-1,6	-0,059441	-1,4	-0,047793	-1,2
EXPONENTE DEL TIEMPO	0,7016	14,0	0,7872	10,5	0,5867	12,6	0,6272	6,4
COSTO*Nvi/IFAM	-0,066943	-4,0	-0,876589	-10,1	-0,000953	-1,5	-0,018116	-2,4
EXPONENTE DEL COSTO	0,5527	17,0	0,3411	22,2	1,3210	7,0	1,0103	15,3
ACCESO	-0,005041	-3,7	-0,012198	-7,9	-0,918934	-3,8	-0,606541	-1,7
EXPONENTE DEL ACCESO	1,0000	-	1,0000	-	0,0904	1,5	0,1923	1,4
PARÁMETROS DE AGREGACIÓN								
- FACTOR DE ESCALA	0,750619	7,96	0,423021	7,64	0,561869	5,03	0,565505	5,93
- CTE. BUS	-0,525702	-5,12	1,310248	13,09	-0,017091	-0,12	-0,394133	-3,21
- CTE. TREN	-4,823307	-24,75	-2,782314	-15,62	-3,263595	-23,19	-4,649097	-28,73
- CTE. AVIÓN	-1,936312	-6,86	-1,519974	-6,39	-2,380870	-10,31	-0,455231	-1,20

### 3.4. Modelos Conjuntos de Generación, Atracción y Distribución de Viajes

Estos modelos conjuntos entregaron mejores resultados que los obtenidos de modelos secuenciales independientes. Fueron calibrados para los mismos propósitos que el modelo de partición modal, y resultaron ser función de las siguientes variables:

- Número de hogares en la zona de origen
- Ingreso medio por hogar en la zona de origen
- Número de establecimientos para albergue en la zona de origen
- Índice de atractivo turístico en la zona de origen
- Número de hogares en la zona de destino
- Ingreso medio por hogar en la zona de destino
- Número de establecimientos para albergue en la zona de destino
- Índice de atractivo turístico en la zona de destino
- Distancia desde la zona de origen a la zona de destino
- Costo generalizado de transporte desde la zona de origen a la zona de destino

Existía originalmente la duda en relación a modelar estas etapas en forma conjunta o independiente. Luego de probar ambas alternativas, se obtuvo mejores resultados con los modelos conjuntos. Los modelos finalmente adoptados son del tipo siguiente:

$$\ln(T_{ij}) = K + \sum_m \delta_{ij} \cdot K_m + \sum_k \beta_k \ln\left(1 + \frac{G_k^i}{G_k}\right) + \sum_l \beta_l \ln\left(1 + \frac{A_l^j}{A_l}\right) + \beta_m \ln\left(\frac{U_{ij} + 10}{d_{ij} + 1}\right) \quad (1)$$

donde

$T_{ij}$  : son los viajes entre la zona i y j

$G_k^i$  : son las variables asociadas a la generación de viajes

$A_l^j$  : son las variables asociadas a la atracción de viajes

$U_{ij}$  : es la utilidad entre la zona i y j, obtenida como logsuma de las utilidades modales

$d_{ij}$  : es la distancia entre la zona i y j

$G_k$  : es la media para la variable de generación k

$A_l$  : es la media para la variable de atracción l

$\delta_{ij}$  : es una variable muda que indica si la zona es capital provincial, es capital regional, Santiago, el Norte, el extremo Sur, la V región o la VI región.

Los restantes parámetros son constantes a calibrar. Los resultados finales obtenidos se muestran en los cuadros N° 3 y N°4. Para mejorar el ajuste final de los modelos, se decidió agregar factores multiplicativos para algunos pares origen destino de corta distancia.

**Cuadro N° 3: Modelo final de Generación, Atracción y Distribución conjunta  
Temporada de Verano**

VARIABLES	OPCIONAL		NO OPCIONAL	
	PARÁMETRO	T-EST.	PARÁMETRO	T-EST.
UTILIDAD	0,961392	22,28514	1,039997	22,82
VARIABLES DE GENERACIÓN				
IHO*NHOG	0,45786	12,27	0,464729	11,46
NETOT	0,20004	4,36		
IBE	0,61262	5,62		
VARIABLES DE ATRACCIÓN				
IHO*NHOG	0,50757	14,17	0,522589	12,99
NETOT	0,21884	4,54		
IBE	0,64316	5,94		
CONSTANTES				
K	1,02886	15,69	2,58631	34,53
DESTINO CAPITAL PROVINCIAL	0,91891	5,34	1,36119	9,64
DESTINO CAPITAL REGIONAL	0,38334	2,63	0,76313	5,68
ORIGEN CAPITAL PROVINCIAL	1,09200	7,35	1,38447	9,73
ORIGEN CAPITAL REGIONAL	0,39659	2,82	0,76973	5,65
ORIGEN SANTIAGO	4,25444	30,88	2,51652	15,31
DESTINO SANTIAGO	4,35634	32,28	2,68241	17,40
DESTINO NORTE	3,00622	16,74	1,64292	6,62
DESTINO V REGIÓN	3,05438	18,16	1,62944	7,51
DESTINO VI REGIÓN	2,20317	12,17	1,04258	4,34
DESTINO EXTREMO SUR	3,13788	14,26	2,81700	7,48
ORIGEN NORTE	2,88990	15,11	1,30791	4,57
ORIGEN V REGIÓN	2,92014	18,83	1,44369	7,04
ORIGEN VI REGIÓN	2,14913	12,42	1,05002	5,30
ORIGEN EXTREMO SUR	3,23046	15,44	3,29189	8,96

**Cuadro N° 4: Modelo final de Generación, Atracción y Distribución conjunta  
Temporada Normal**

VARIABLES	LABORAL		NO LABORAL	
	PARÁMETRO	T-EST.	PARÁMETRO	T-EST.
UTILIDAD	1,22809	19,11	1,19503	17,02
VARIABLES DE GENERACIÓN				
IHO*NHOG	0,37968	5,37	0,59561	9,16
IBE			1,27926	7,57
NETOT	0,46150	6,01		
VARIABLES DE ATRACCIÓN				
IHO*NHOG	0,46604	6,56	0,62616	8,89
IBE			1,14248	7,00
NETOT	0,30043	4,08		
CONSTANTES				
K	1,68357	21,01	-0,16490	4,08
DESTINO CAPITAL PROVINCIAL	1,26632	6,13	1,74625	9,09
DESTINO CAPITAL REGIONAL	0,72883	4,40	0,20447	0,82
ORIGEN CAPITAL PROVINCIAL	1,32343	8,83	1,69782	10,43
ORIGEN CAPITAL REGIONAL	0,51303	2,92	0,31751	1,73
ORIGEN SANTIAGO	3,55011	16,04	5,00503	17,54
DESTINO SANTIAGO	2,83920	8,98	4,81819	17,68
DESTINO NORTE	3,07506	8,58	2,45397	4,24
DESTINO V REGIÓN	1,82188	2,74	3,56633	12,97
DESTINO VI REGIÓN	1,24379	3,08	1,68814	3,52
DESTINO EXTREMO SUR	2,68892	3,21	5,02571	12,73
ORIGEN NORTE	2,91621	6,30	3,53329	10,34
ORIGEN V REGIÓN	2,46007	5,23	3,51405	10,66
ORIGEN VI REGIÓN	1,74136	4,45	2,64046	9,27
ORIGEN EXTREMO SUR	3,92614	9,70	4,81790	12,46

### 3.5. Validación

Los modelos obtenidos fueron validados comparando las predicciones obtenidas con los flujos reales observados. El ajuste obtenido se muestra en el siguiente cuadro N°5.

**Cuadro N° 5: Indicadores de Ajuste entre Viajes Observados y Modelados  
Mediante Modelos Conjuntos, con Factores de Ajuste**

TEMPORADA	AGREGACIÓN	PROPÓSITO	CONSTANTE	PENDIENTE	R <sup>2</sup>
NORMAL	PROVINCIAL	LABORAL	92.433,00	0,7611	0,7892
		NO LABORAL	114,67	0,7890	0,7474
	COMUNAL	LABORAL	2,39	0,6589	0,3445
		NO LABORAL	2,86	0,7131	0,4877
VERANO	PROVINCIAL	NO OPCIONAL	235,01	0,9091	0,8384
		OPCIONAL	-3,33	0,7377	0,9485
	COMUNAL	NO OPCIONAL	4,68	0,8650	0,6032
		OPCIONAL	-1,18	0,8259	0,8096

### 3.6. Proyecciones

Las variables explicativas de los modelos fueron proyectadas a 5 cortes temporales: 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020. Para ello se utilizó, cuando estaban disponibles, proyecciones oficiales o aquellas adoptadas para el conjunto de estudios del proyecto ESTRASUR. Una excepción fue el índice de atractivo turístico, el cual se mantuvo constante. Los principales resultados agregados obtenidos se muestran en los cuadros N° 6 y N° 7.

**Cuadro N° 6: Proyección de viajes, Temporada Normal**

MODO	AÑO 1996	AÑO 2000	AÑO 2005	AÑO 2010	AÑO 2015	AÑO 2020	TASA ANUAL
BUS	282.472	359.622	484.810	632.729	780.619	972.309	5,3%
TREN	2.199	2.619	3.587	4.735	5.906	7.440	5,2%
AVIÓN	4.556	5.356	8.021	11.421	15.284	20.652	6,5%
AUTO	121.027	149.660	201.807	268.228	340.370	437.505	5,5%
TOTAL	410.253	517.256	698.225	917.112	1.142.179	1.437.905	5,4%
TASA ANUAL	-	6,0%	6,2%	5,6%	4,5%	4,7%	-

**Cuadro N° 7: Proyección de viajes, Temporada Verano**

MODO	AÑO 1996	AÑO 2000	AÑO 2005	AÑO 2010	AÑO 2015	AÑO 2020	TASA ANUAL
BUS	286.037	347.280	442.755	550.297	655.808	788.968	4,3%
TREN	3.227	3.861	4.992	6.290	7.604	9.283	4,5%
AVIÓN	8.827	10.566	17.815	26.150	34.656	45.201	7,0%
AUTO	244.399	293.704	374.069	465.729	554.579	665.688	4,3%
TOTAL	542.490	655.411	839.631	1.048.466	1.252.647	1.509.140	4,4%
TASA ANUAL	-	4,8%	5,1%	4,5%	3,6%	3,8%	-

## 4. CONCLUSIONES

Además de los resultados ya expuestos, del conjunto del estudio es posible extraer ciertas conclusiones metodológicas, principalmente como experiencia para futuros estudios de similar naturaleza. Un primer tópico se refiere a la construcción de matrices de viajes para la situación actual. Durante el estudio se debió enfrentar graves dificultades producto de la inconsistencia de la información proveniente de las diversas fuentes utilizadas, así como de ciertos vacíos de información.

En el caso del transporte aéreo y ferroviario, existen buenas fuentes de información acerca de los flujos entre terminales (aeropuertos o estaciones) pero que no indican el origen y destino real de los viajes ni el modo de transporte utilizado en el acceso y egreso, ni tampoco clasifican los usuarios según su nivel de ingreso, propósito de viaje y lugar de residencia. En futuros estudios, esta información faltante debiera ser recogida mediante encuestas realizadas en los terminales o mediante cuestionarios de autorespuesta a llenar durante el viaje, utilizando los datos sobre venta de pasajes para expandir la muestra.

El caso del transporte por carretera es aún más complejo, por la ausencia de información estadística confiable sobre flujos de pasajeros en los modos bus y automóvil. En el estudio se recurrió a encuestas realizadas en puntos de control en carreteras, para el caso de los automóviles,

y encuestas en terminales de buses. Esta modalidad provee información ineludiblemente fragmentaria, pues no es posible lograr una cobertura espacial y temporal amplia dentro de limitaciones sensatas de recursos. La información recogida puede ser ampliada utilizando datos de conteos de flujos en arcos. Sin embargo, pese a ello los márgenes de error son probablemente altos. Por ejemplo, un punto de control puede contener una proporción importante, no detectada, de flujo intrazonal no considerado en las matrices origen destino obtenidas de las encuestas, produciendo así un sesgo en la estimación según el cual los viajes de larga distancia resultan sobreestimados.

Otra insuficiencia de los métodos de recolección de información sobre viajes tiene relación con los viajes externos, en especial los internacionales. Es posible que muchos de estos viajes sean recogidos teniendo como origen o destino la ciudad de llegada o salida del viaje externo, Santiago en la mayoría de los casos. Esta deficiencia podría subsanarse mediante encuestas que explícitamente consulten acerca del viaje siguiente, o mediante encuestas realizadas en los terminales de transporte internacional, en las cuales se consulte el origen o destino real del viaje.

Las matrices de viajes obtenidas serán con certeza asimétricas, principalmente debido a los errores muestrales y del proceso de ampliación. Sin embargo, en la realidad estas matrices debieran ser fuertemente simétricas, a nivel de flujos totales por temporada. La simetría débil, en la cual son idénticos los vectores de totales de filas y columnas, sólo puede ser afectada por las migraciones, que representan probablemente una proporción no significativa del total de viajes. La simetría fuerte, en la cual se exige simetría celda a celda, puede ser afectada por cadenas de viajes en las cuales, partiendo del lugar de residencia, se visitan dos o más zonas antes de volver al hogar. Estos viajes no basados en el hogar representan un 18% del total en temporada de verano y un 7% del total en temporada normal. Ello significa que una fuerte mayoría de los viajes, cercana al 90% en promedio anual, son viajes basados en el hogar. Sin embargo, que un viaje sea no basado en hogar no significa necesariamente una asimetría en la matriz. Por ejemplo, si un residente en la ciudad A viaja a B y de ahí a C, si al regreso también pasa por B no se genera asimetría.

En el presente estudio se adoptó como opción exigir simetría fuerte a las matrices de viajes. Sin embargo, en futuros estudios este tópico podría ser mejorado, por ejemplo mediante la consulta explícita en las encuestas acerca de la cadena de viajes completa desde el hogar hasta retornar al mismo. De adoptarse este método, debiera sin embargo preverse el caso especial de los viajes basados en el lugar de residencia transitorio, los cuales típicamente se producen en el caso del turismo y de ciertas actividades comerciales o profesionales. En este último caso no resultaría práctico consultar la cadena completa con relación al hogar permanente, siendo más sensato limitar la encuesta a la residencia transitoria.

La discusión anterior está fuertemente relacionada con la opción de modelar en forma independiente los viajes basados en el hogar y los no basados en el mismo. En el presente estudio no se obtuvo mejoras significativas de los modelos a realizar la distinción, como ya se dijo. Sin embargo, este resultado puede haber derivado de deficiencias en la información de base utilizada.

Al contar con datos sobre cadenas de viajes, y al distinguir entre residencia permanente y temporal, podría quizás obtenerse conclusiones diferentes.

Un segundo tópico se refiere a la familia de modelos que en el presente estudio entregó mejores resultados, esto es, modelos conjuntos de atracción, generación y distribución de viajes junto a un modelo independiente de partición modal. Los resultados obtenidos tienden a indicar que en futuros estudios no sería sensato intentar calibrar modelos independientes de generación, atracción y distribución de viajes, tarea que en el presente estudio consumió una proporción substancial de los recursos asignados. La dirección de búsqueda podría enfocarse a verificar si un modelo conjunto de atracción, generación, distribución y partición modal de viajes entrega mejores resultados, especialmente si el modelo conjunto adopta una forma funcional única basada en fundamentos teóricos sólidos. En este sentido, una debilidad teórica de los resultados obtenidos en el presente estudio deriva de tener un modelo logit en partición modal, combinado con un modelo de potencias en el modelo conjunto.

Cabe destacar entre las limitaciones del trabajo realizado que fue necesario adoptar factores finales de ajuste para un conjunto muy limitado de pares origen destino, todos ellos correspondientes a viajes de relativamente corta distancia. Como fue discutido en el capítulo correspondiente, ello puede deberse a la influencia de comportamientos de viaje de tipo suburbano. La principal conclusión para futuros estudios es que debiera intentarse calibrar modelos independientes para viajes de corta distancia con respecto a los de mediana y larga distancia. El límite entre ambos casos sería una de las variables a determinar, pero probablemente estaría por debajo de 100 km. En el caso del presente estudio, aproximadamente un 60% de los viajes incluidos en las matrices origen destino tienen una longitud inferior a 80 km. Los viajes de corta distancia representan por lo tanto una proporción substancial del total de viajes, lo cual acentúa el interés por su modelación independiente. Es especial, las variables explicativas relevantes podrían ser diferentes entre ambos tipos de viajes. Lo mismo puede decirse de la disponibilidad de modos, ya que por ejemplo el modo aéreo en la práctica no está disponible para viajes de corta distancia.

El tema anterior está estrechamente ligado al problema de las conurbaciones. En futuros estudios debiera destinarse un cierto esfuerzo a identificar centros poblados conurbados, de modo de tratarlos en forma consistente como una unidad para efectos de la modelación de viajes interurbanos. Ello tiene que ver además con la definición de una frontera explícita entre lo que se entiende por viaje suburbano y lo que se entiende por viaje urbano.

El tercer tópico se refiere a las variables explicativas de los modelos seleccionados. Aplicando la lógica habitual en modelación de transporte urbano, se seleccionó variables explicativas relacionadas con las características demográficas y socioeconómicas de la población residente, que explicarían la generación de viajes, y variables relacionadas con niveles de actividad laboral, de servicios o económica, que explicarían la atracción de viajes. Sin embargo, tal como fuese demostrado, este enfoque resultó ser inadecuado para la modelación de transporte interurbano. El problema deriva del hecho, evidente una vez examinado, de que las zonas de mayor población, que coinciden con los centros poblados de mayor importancia, tienden a tener mayor cantidad de metros cuadrados construidos en los diversos sectores económicos, mayor número de empresas y empleados, mayor número de establecimientos educacionales, mayor número de vehículos y mayor número de viviendas y hogares, de modo que en general las llamadas variables de actividad están fuertemente correlacionadas con las variables demográficas. No existe el caso, común en modelación urbana, de zonas "dormitorio" versus zonas "de negocios". Esta correlación de variables hace imposible incluir en los modelos tanto la población como las variables de actividad. Se debe elegir una o la otra, y en

el presente estudio se optó por la población, pues cuenta con datos más confiables y proyecciones más robustas.

Aparte de la población, las variables que entregaron aportes significativos a la bondad de los modelos fueron el ingreso, el atractivo turístico y la capacidad para recibir población flotante, ninguna de las cuales está correlacionada con la población. La recomendación que surge es que en futuros estudios se debiera centrar la atención y focalizar los recursos en la determinación de valores confiables para estas variables, u otras de similar naturaleza. En particular, la información sobre nivel medio de ingreso a nivel comunal es fragmentaria, pues existe sólo para algunas comunas en las cuales Mideplan aplica la encuesta CASEN. Por otra parte dicha encuesta está orientada a detectar sectores en pobreza y extrema pobreza, por lo cual no discrimina entre los estratos de ingreso medio y alto. Por la importancia de esta variable, a juicio del consultor sería conveniente en futuros estudios asignar mayores recursos a su determinación.

En cuanto al atractivo turístico, en el presente estudio se midió a través de la variable IBE (Índice de Belleza Escénica) cuyos valores fueron determinados por apreciación de expertos. Probablemente se justifique en futuros estudios desarrollar una nueva metodología que permita construir esta variable, u otra que cumpla su función, mediante procedimientos más objetivos. La capacidad para recibir población flotante, si se supone equilibrio entre demanda y oferta en este mercado, es una medida conjunta del atractivo turístico pero también del atractivo comercial, de salud y otros. La información disponible también presenta algunos vacíos.

De lo anterior se desprende que el presente estudio no sólo ha generado los datos y modelos planteados como objetivo del mismo, sino que además ha permitido generar ciertos aportes orientadores para el mejor desarrollo de futuros estudios de similar naturaleza.

## AGRADECIMIENTOS

El contenido del presente trabajo fue desarrollado por los autores en el contexto del estudio denominado "Análisis y Desarrollo Evaluación Sistema de Transporte Interurbano IVª Etapa", encargado a la firma Consultora ASTRA Ltda. (Analistas de Sistemas de Transporte Limitada), por el Ministerio de Planificación y Cooperación, actuando como contraparte técnica la Secretaría Ejecutiva de la Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte (SECTRA). Los autores agradecen a SECTRA la autorización para divulgar estos resultados. Agradecen además al Dr. Marc Gaudry y al Ing. Oscar Baeza por valiosos comentarios y sugerencias.

## REFERENCIAS

Aptech Systems (1994) **GAUSS User's Manual**. Maple Valley, CA.

ASTRA Ltda. (2000) **Análisis y Desarrollo Evaluación Sistema de Transporte Interurbano IVª Etapa**. Informe Final para SECTRA, Santiago.

CADE (1993) **Encuesta de Origen Destino en la Macrozona Sur**. Informe Final.