



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**Modelización de la demanda de viajeros  
en la línea Madrid-Barcelona**

### Autor/a

**Bernat Reixach Sampol**

### Tutor/a

**Andrés López Pita**

### Departament

**Infraestructura del Transport i del Territori**

### Intensificació

**Transports**

### Data

**Juliol 2010**



## Resumen

La decisión de si una nueva red de alta velocidad debe o no ser construida se basa, esencialmente, en dos factores: el coste de inversión que supondría la nueva infraestructura y la demanda potencial de usuarios que utilizarían ese medio de transporte una vez ejecutado. Una gran inversión como es este tipo de infraestructuras sólo tiene sentido si va a ser usada por un gran número de pasajeros.

Para poder establecer la demanda del futuro medio de transporte hace falta basarse en modelos estadísticos, los cuales darán una solución que, finalmente, se acercará más o menos a la realidad.

Conocer con exactitud la forma en que los viajeros se distribuirán en los distintos medios a partir de variables como el precio del billete, el tiempo de viaje, el tiempo de acceso a la estación de origen y destino o la frecuencia entre trenes da la capacidad de poder predecir qué servicio se deberá dar al viajero para transportar el número de pasajeros deseado.

En esta tesina se estudiarán los modelos de distribución modal para los trenes de alta velocidad centrándose en el caso particular del corredor Madrid-Barcelona.

Se analizarán estudios anteriores para examinar qué metodologías de cálculo utilizaron, bajo qué hipótesis de trabajo y qué datos tuvieron en cuenta; comparando sus resultados con la realidad para estudiar su bondad.

Se propone un modelo Precio-Tiempo que, basándose en los datos reales del corredor, puede predecir distribuciones modales futuras. Para la utilización del modelo el cálculo del valor de tiempo para cada medio de transporte es clave, así que éste se calculará a partir de los datos reales mediante MATLAB. Este modelo es capaz de modelar cómo cambiaría la distribución según vayan adoptando diferentes políticas de atracción de viajeros las empresas que gestionan los medios de transporte. Es decir, puede modelar cambios en el precio, el tiempo de viaje y la frecuencia de cada medio de transporte prediciendo qué sucederá al cambiar una o más de esas variables. Este modelo es de fácil aplicación y puede ser muy útil para hacer análisis de mercado, es decir, para saber si sale económicamente rentable a una compañía como podría ser Iberia o Renfe variar sus precios u otras variables. Podría ocurrir que, al bajar el precio del billete, el número de pasajeros crezca considerablemente y eso conlleve a obtener ganancias a la larga.

Dicho método se utiliza para predecir el reparto modal en diferentes escenarios posibles utilizando 2 hipótesis distintas. Se analizan qué resultados se obtendrían en los estudios anteriores si se utilizara el nuevo modelo y se comparan los resultados con los iniciales de cada estudio y con los de la realidad.

Se estudia qué modelización es más correcta según el momento en que se haga el estudio de distribución modal. Es necesario diferenciar los estudios de previsión realizados antes de la puesta en servicio de un medio de transporte y después. No es lo mismo intentar predecir cómo se distribuirán los viajeros en un corredor con la introducción de un nuevo medio de transporte que, por el contrario, predecir la distribución modal en años venideros en un corredor donde ya están en funcionamiento todos los medios de transporte.

## Abstract

The decision of building or not building a new high speed train infrastructure is made basically considering two factors: the investment costs of the infrastructure and the number of people that will use this means of transport once it is in service. These kinds of infrastructures only make sense if they are going to be used by a substantial number of passengers.

Statistic models are needed in order to be able to predict this future demand. These models will find a solution that will resemble the reality with more or less accuracy.

The ability to know how travelers will distribute in different means of transport thru different variables is essential in the prediction of what service needs to be given to the passenger for him/her to travel with a certain transport. Some of these variables are the price of the ticket, time of travel, time of access to the station...

Mode choice models for different means of transport will be studied in this thesis, focusing specially in the Madrid-Barcelona corridor.

Previous studies will be analyzed to examine their methodologies, hypothesis and considered values. Afterwards, its results will be compared with reality in order to know how accurate these studies were.

A time-cost model is proposed. It will be based on real values, and will be able to predict future modal distributions. One of the key values for the model calculations is the value of time of each mode of transport. It will be calculated using MATLAB and basing the calculations on real values of the corridor. This time-cost model will be able to predict how the distribution of passengers will change in different policies of user attraction adopted by companies. This means that changes in cost, time of travel and frequency of each means of transport can be modeled. This model is easy to apply and can be very useful in market analysis. For example, it can be studied if certain changes in the previously mentioned variables can be profitable to transportation companies such as Renfe or Iberia. Actions like lowering the cost of the ticket may be profitable due to an increase in the number of passengers that that mode will transport.

This time-cost model is used to predict the mode distribution in different foreseeable scenarios using two different hypothesis. The previous studies will be analyzed using the new model and the results will be compared with the previous results and also with reality.

What model fits better depending on the time of study will be also taken into account. Differentiation between studies realized before or after the mode of transportation has started to work may be done. Predicting how travelers will distribute in a corridor when a new means of transport is introduced is much harder when you do not have any real information about it.



# Índice

<b>1</b>	<b>Motivación de la tesina .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos de la tesina .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>La Red Europea de Alta Velocidad Ferroviaria .....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Evolución de la Alta Velocidad en España .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Modelos de previsión de viajeros en una línea de alta velocidad.....</b>	<b>12</b>
	5.1 Modelo Logit Multinomial (MNL).....	12
	5.2 Modelo Probit Multinomial (MNP).....	14
	5.3 Modelo Logit Jerárquico (NL).....	15
	5.4 Modelo de Valor Extremo Generalizado (GEV) .....	17
	5.5 Modelo Logit Mixto .....	18
	5.6 Modelo Precio-Tiempo .....	20
<b>6</b>	<b>Estudios realizados .....</b>	<b>22</b>
	6.1 Estudio 1: B. Guirao (2000).....	22
	6.2 Estudio 2: González-Savignat (2000).....	27
	6.3 Estudio 3: A. López-Pita, F. Robusté (2005).....	33
<b>7</b>	<b>Datos reales del corredor Madrid-Barcelona .....</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Escenarios posibles .....</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>Un modelo para conciliar previsión y realidad .....</b>	<b>42</b>
	9.1 Actualización de variables .....	42
	9.2 Modelo Precio-Tiempo .....	45
	9.3 Comparación entre los modelos anteriores y la realidad .....	53
	9.4 Modelo Precio-Tiempo partiendo de los 3 estudios.....	57
<b>10</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
<b>11</b>	<b>Futuros desarrollos .....</b>	<b>62</b>
<b>12</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>63</b>
<b>13</b>	<b>Annexo .....</b>	<b>66</b>
	13.1 Código de MATLAB.....	66

## 1 Motivación de la tesina

Los medios de transporte hacen nuestra vida más fácil y cómoda. Millones de personas se desplazan cada día en nuestro país en coche, tren, autobús, metro e incluso en avión para acudir a su lugar de trabajo. Gracias a ellos podemos, además, aprovechar al máximo nuestro tiempo de ocio porque, poco a poco, las distancias se van haciendo más y más cortas. Con todas estas ventajas es fácil olvidar que el modelo de transporte que se utiliza en la actualidad lleva consigo un alto precio, alejado del ideal de la movilidad sostenible: la destrucción de la naturaleza, el aumento de las emisiones de gases contaminantes, un alto coste de vidas humanas en accidentes, la degradación de la vida urbana y el medio natural...

Considerado uno de los medios más ecológicos, el tren convencional ofrece una serie de ventajas sobre el transporte por carretera y aéreo: consume menos energía, genera menos gases de efecto invernadero, produce menos ruido, ocupa menos suelo y ofrece más seguridad.

Si sumamos todos estos beneficios a la alta velocidad, se obtiene un medio de transporte rápido, seguro y mucho más sostenible que sus potenciales competidores (avión y vehículo privado).

No es de extrañar, por tanto, que muchos países a nivel mundial estén invirtiendo en este tipo de infraestructuras para conectar nodos importantes de su geografía.

La decisión de si una nueva red de alta velocidad debe o no ser construida se basa, esencialmente, en dos factores: el coste de inversión que supondría la nueva infraestructura y la demanda potencial de usuarios que utilizarían ese medio de transporte una vez ejecutado. Una gran inversión como es este tipo de infraestructuras sólo tiene sentido si va a ser usada por un gran número de pasajeros.

El presupuesto del proyecto constructivo está bastante definido y se ajusta mucho a la realidad. Una vez se sabe qué constaría ejecutar la obra queda saber cuánta gente

utilizará dicho medio de transporte una vez construido. La respuesta a esta pregunta no está, ni mucho menos, definida de forma exacta.

Para poder establecer la demanda del futuro medio de transporte hace falta basarse en modelos estadísticos, los cuales darán una solución que, finalmente, se acercará más o menos a la realidad.

Los modelos estadísticos se utilizan para saber qué tráfico generará el nuevo medio de transporte que anteriormente no viajaba entre los nodos y qué distribución modal existe en los viajeros que ya se movían entre esos puntos.

Conocer con exactitud la forma en que los viajeros se distribuirán en los distintos medios a partir de variables como el precio del billete, el tiempo de viaje, el tiempo de acceso a la estación de origen y destino o la frecuencia entre trenes da la capacidad de poder predecir qué servicio se deberá dar al viajero para transportar el número de pasajeros deseado.



## **2 Objetivos de la tesina**

Considerar los tipos de modelos de distribución modal existentes y discutir en qué casos es mejor la utilización de uno u otro para el cálculo en los diferentes medios de transporte.

Analizar estudios anteriores para examinar qué metodologías de cálculo utilizaron, bajo qué hipótesis de trabajo y qué datos tuvieron en cuenta. Comparar sus resultados con la realidad para estudiar su bondad.

Proponer un modelo que, basándose en los datos reales del corredor Madrid-Barcelona, pueda predecir distribuciones modales futuras. Utilizar dicho método para predecir el reparto modal en diferentes posibles escenarios utilizando las hipótesis que procedan.

Analizar qué resultados se obtendrían en los estudios anteriores si se utilizara el nuevo modelo. Comparar los resultados con los iniciales de cada estudio y con los de la realidad.

Estudiar qué modelización es más correcta según el momento en que se haga el estudio de distribución modal.

### **3 La Red Europea de Alta Velocidad Ferroviaria**

La construcción de una red de ferrocarril que permita el transporte de viajeros en Alta Velocidad se ha convertido en los últimos años en uno de los ejes clave de la política de transportes seguida por la Unión Europea. El proceso de construcción europea, que debe conducir a la fusión de las poblaciones y economías del continente, requiere de unos sistemas de transporte coherentes, por lo que la existencia de una red europea de ferrocarril de Alta Velocidad que comunique la mayoría de regiones, garantizando la movilidad de la población, supondría un importante elemento de integración y cohesión social y económica.

Pero para la realización de un proyecto de semejante envergadura no basta únicamente con el apoyo de la Unión Europea, sino que éste debe ir acompañado del respaldo de los diferentes gobiernos de los Estados miembros, tanto regionales como nacionales, así como de todos los órganos gestores y autoridades ferroviarias del continente.

Una red europea de trenes de Alta Velocidad debe integrar únicamente aquellas líneas que realmente posean interés a nivel comunitario; de esta manera, se deberán incluir en ella los enlaces transfronterizos, las principales líneas de tránsito intracomunitario y aquellos enlaces que correspondan a objetivos importantes de cohesión económica y social.

Sin embargo, es evidente que dicha red no se construirá a partir de cero, sino que se apoyará en las diferentes redes de Alta Velocidad, más o menos extensas, de las que ya disponen algunos de los estados de la Unión Europea. Estas redes existentes obedecen a planes directores nacionales por lo que contienen líneas de interés puramente regional o nacional. Esto evidencia que la red europea no debe basarse simplemente en la superposición de las redes nacionales de los diferentes países, sino que debe ir un paso más allá y asegurar una serie de conexiones a “nivel europeo”.

Estas actuaciones prioritarias que debían vertebrar la futura red europea se establecieron en el Consejo europeo de Essen en 1994, pasando a integrarse, ya en 1996, dentro de las actuaciones previstas en el gran proyecto de la red de transporte transeuropea TEN-T. En un principio se trataban de las siete actuaciones básicas que se citan a continuación:

PBKAL (red Paris-Brussels-Köln-Amsterdam-London), Ruta del Este, Rutas del Sur, Ruta Francia-Italia, WCML (West Coast Main Line), Ruta Norte-Sur, Oresund y el Triángulo Nórdico.

Sin embargo, en el Consejo europeo de Barcelona de octubre de 2001, la Comisión europea revisó las directrices de la red TEN-T, proponiendo seis nuevos proyectos, los de los cuáles afectaban directamente a la futura red de Alta Velocidad: Ruta Europea del Este y Fehmarn Belt.

La experiencia de corredores de alto tráfico donde el tren está en competencia con el avión y el tren da un buen servicio en términos de frecuencias y puntualidad, muestra que hay una fuerte correlación entre tiempo de viaje y cuota de mercado del tren y que en a un mismo tiempo de viaje se corresponde una cuota de mercado similar en países bien distintos.

La única excepción relevante es la de la relación Barcelona-Valencia, donde el tren tiene una cuota de mercado muy alta para el tiempo de viaje. La explicación principal es que los tráficos de conexión aérea se canalizan principalmente al "hub" de Madrid-Barajas y no a El Prat.

Desde la implantación de un servicio hasta que la cuota de mercado alcanza un valor cercano a su techo pueden pasar varios años. Así por ejemplo, con los tiempos de viaje, el TGV Paris Marsella necesitó el periodo entre 2003 y 2005 para pasar de un 62 a un 66%. Del mismo modo, el Talgo 200 Madrid-Málaga necesitó siete años para pasar de un 33.6 a un 41.6%.

La política comercial tiene también un impacto fuerte. Por ejemplo, la implantación de los vuelos *low-cost* en la relación París-Ginebra hizo bajar hasta cerca del 40% la cuota de mercado del TGV. Una política comercial muy agresiva de la operadora Lyria hizo recuperar una cuota del 50% para una relación con tiempos de viaje relativamente altos (3h32').

La cuota de mercado del 84% alcanzada por el tren en el corredor de AV Madrid-Sevilla, es difícil de superar sin una conexión mejor entre el ferrocarril y el aeropuerto de Barajas, puesto que el 16% del avión corresponde esencialmente a vuelos de conexión.

En el corredor París-Londres el Eurostar tarda 2h35min en realizar el recorrido y tiene una cuota de mercado del 65%, frente al 35% del avión. Aún así, el transporte aéreo entre estas dos ciudades (2,8 millones de pasajeros en 2003) es uno de los más solicitados de Europa con más de 90 vuelos diarios en cada dirección.

## 4 Evolución de la Alta Velocidad en España

La historia del ferrocarril de alta velocidad en España comenzó hace dos décadas, en 1986, cuando el Gobierno decidió fomentar la inversión interna en ferrocarriles. Al mismo tiempo, los responsables de los Ministerios de Economía y Transporte y del gabinete del presidente del Gobierno debatieron si desarrollar líneas ferroviarias convencionales mejoradas adicionales o dar el salto a la alta velocidad. España tiene una densidad de tráfico aéreo expresamente elevada, contando cada capital regional con su propio aeropuerto, y el Gobierno concluyó que el tren de alta velocidad representaba la alternativa más económica y ecológica para captar a quienes entonces recurrían al transporte aéreo o por carretera.

Para esa primera línea se eligió la ruta Madrid-Sevilla. Aunque podría parecer menos lógica que unir Madrid y Barcelona, los dos grandes centros económicos del país, varios factores la convirtieron en la opción preferida. Antes de 1986, viajar de Madrid a Sevilla implicaba tomar una ruta larga e indirecta sobre una vía de carril único. "Técnicamente estábamos ante el cuello de botella más importante de la red ferroviaria nacional", manifiesta Joaquín Jiménez, director de relaciones internacionales de ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias).

Según Jiménez, "este tramo era el que, con una menor inversión, podía recortar drásticamente la distancia para un mayor número de pasajeros tendiendo una nueva línea entera, que no corriera paralela a la existente". Además, la Expo'92, la exposición mundial que se celebraría en Sevilla en 1992, marcó al gobierno un objetivo temporal con el que trabajar.

Había razones económicas prácticas para elegir Sevilla como primer destino. Ese mismo año, 1986, España entraba en la Unión Europea y, con su incorporación, el Gobierno español accedía a los fondos comunitarios para el desarrollo de infraestructuras, y el gobierno decidió invertir en el desarrollo de Andalucía, una región relativamente empobrecida.

La construcción de la línea debía superar el obstáculo de cruzar las estribaciones montañosas de Sierra Morena. "España es el segundo país más montañoso de Europa, solo por detrás de Suiza", explica Juan Matías Archilla, director de relaciones internacionales de Renfe, el operador de los ferrocarriles españoles. Hoy, las mejoras en la ingeniería de construcción de túneles ayudan a desarrollar tramos más cortos.

Tender esa línea de 471 kilómetros sólo llevó seis años, un plazo notablemente breve para esa distancia. Su coste fue aproximadamente un 30% inferior al de líneas similares, en parte por el firme compromiso de las administraciones públicas central y regionales con alcanzar el objetivo a tiempo para la Expo'92.

Una vez que los trenes alcanzaron finalmente su velocidad óptima, la duración del trayecto Madrid-Sevilla se acortó a dos horas y veinte minutos. Antes, un viajero en tren tardaba casi el triple, unas seis horas. Pronto los trenes se llenaron de pasajeros y la línea se reveló un enlace crucial para el desarrollo económico de la región. Después del éxito de la línea Madrid-Sevilla, la crisis económica de 1993 golpeó a España, al igual que hiciera con gran parte del resto del mundo. Hasta 1997 el país no recuperaría la suficiente fortaleza económica para retomar el proyecto de la alta velocidad. La atención se dirigió entonces naturalmente al desarrollo del tramo entre Madrid y Barcelona, con la idea de reducir las seis horas y media de viaje a aproximadamente dos horas y media.

La construcción de una nueva línea de ancho internacional de Madrid a la frontera francesa, en su primera fase Madrid-Zaragoza-Lérida, se culmina en 2003, en que se hace el primer viaje oficial. Esta línea entra en servicio el 11 de octubre de 2003, a través del AVE Larga Distancia Madrid-Zaragoza-Lérida, que conecta estas ciudades junto a Guadalajara-Yebes y Calatayud, aunque durante los primeros años no lo hace a la velocidad prevista por no tener listo el sistema europeo normalizado de señalización ERTMS. Esta línea es la primera en España en contar con el sistema de

electrificación a 2x25kV 50Hz, que permite alejar la distancia a la que se sitúan las subestaciones de tracción, sin necesidad de aumentar la tensión.

En diciembre de 2004 se inaugura el servicio Avant Sevilla–Córdoba, cuyos trayectos duran unos 40 minutos con el nuevo material S-104, que también se introduce en el servicio Avant Madrid – Ciudad Real – Puertollano (anterior AVE Lanzadera) en enero de 2005. Un material similar, los S-102, cubren el servicio AVE Larga Distancia Madrid–Zaragoza–Huesca, que se inaugura en abril de 2005.

La construcción de un nuevo acceso ferroviario de alta velocidad hasta Toledo de 21km, partiendo de la primera infraestructura en la comarca toledana de La Sagra, permite inaugurar el servicio Avant Madrid–Toledo en noviembre de 2005. El trayecto dura menos de 30 minutos. Actualmente Toledo sólo tiene acceso a la red de alta velocidad en ancho UIC, lo que imposibilita el transporte de mercancías y viajeros de otras procedencias que no sean de líneas de alta velocidad.

En mayo de 2006 se anuncia el incremento de velocidad en los servicios AVE S-102 que operan en la línea Madrid–Zaragoza–Lérida, pasando de los 200 km/h a los 250 km/h gracias a la entrada en funcionamiento del ERTMS de nivel 1, un sistema de conducción automática de los trenes compatible en un futuro con las líneas francesas y del resto de Europa. En el 17 de octubre del 2006 estos servicios comenzaron a aumentar su velocidad de circulación, pasando a circular a 280 km/h en un primer momento, y 300 km/h desde el mes de agosto de 2007. Para alcanzar los 350 km/h hay que esperar al nivel 2 del ERTMS.

En mayo de 2006 entran en servicio los Alvia, unos trenes capaces de operar en ancho internacional o ibérico con la misma locomotora, y de cambiar de ancho sobre la marcha. Estos trenes recortan el tiempo de viaje entre Madrid y varias ciudades del norte de España, como Bilbao, Vitoria, Santander o Gijón.

En octubre de 2006 comenzaron las obras del tramo de la Y Vasca, entre Arrazua/Ubarrundia - Villarreal de Álava, y se dejó para el 2008 el comienzo en el tramo guipuzcoano con el inicio de la perforación del túnel Ordicia - Isasondo. Este es el proyecto ferroviario que pretende unir mediante una vía de Alta Velocidad las tres capitales vascas Bilbao, San Sebastián y Vitoria, conectándolas entre sí mediante un trazado en "Y", en un recorrido medio de 35 minutos, y con la frontera francesa, dando continuidad a la línea de alta velocidad Valladolid-Burgos-Vitoria y por tanto con Madrid.

El 16 de diciembre de 2006 se abre el tramo Córdoba–Antequera de la línea Madrid–Córdoba–Málaga, que incluye las estaciones de Puente Genil-Herrera y Antequera-Santa Ana. Esto permitió un recorte del tiempo en los viajes entre Madrid y Algeciras, además de un nuevo itinerario hacia Granada. Dos días después se abre el tramo Lérida–Camp de Tarragona de la línea Madrid–Barcelona–Frontera Francesa.

El 22 de diciembre de 2007 se inauguró la línea Madrid-Segovia-Valladolid, y un día después el tramo que quedaba de la L.A.V. Córdoba–Málaga (Antequera–Málaga). Aunque inicialmente prevista para el 21 de diciembre, el 20 de febrero de 2008 se abrió al público el tramo Roda de Bará-Barcelona de la L.A.V. Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa. De este modo la conexión por alta velocidad entre Madrid y Barcelona está operativa, con un tiempo de viaje de 2 horas y 38 minutos.

En mayo de 2009, se firmó el convenio para construir el ferrocarril de alta velocidad en Navarra, poniendo fin a trece años de parones y movimientos en falso. Para 2010 el Gobierno de España tiene previsto contar con la mayor red de alta velocidad ferroviaria en el mundo, con 2.230 km, superando a países pioneros en la alta velocidad, como Japón o Francia. La próxima línea de alta velocidad en ser inaugurada será el trayecto Madrid-Valencia que en 2010 incorporará a la red AVE sus 364,7 km.



## 5 Modelos de previsión de viajeros en una línea de alta velocidad

La distribución modal es un factor clave para analizar el flujo de viajeros que hay entre dos puntos del territorio. Es la herramienta que permite cuantificar cómo se repartirán los viajeros entre los diferentes medios de transporte (coche, autobús, tren...), de la que existen una gran diversidad de modelos, para los que se han establecido numerosas clasificaciones:

- Modelos descriptivos – modelos explicativos.
- Modelos deterministas – modelos probabilísticos.
- Modelos analíticos – modelos de simulación.
- Modelos estáticos – modelos dinámicos.
- Modelos agregados – modelos desagregados.
- Etc.

El enfoque habitual es el de utilizar modelos explicativos o discretos, que consisten en la maximización de la utilidad aleatoria, en el que se parte de que el individuo escoge siempre la alternativa del conjunto disponible que le supone una mayor utilidad. Desde el punto de vista del analista esta utilidad  $U$  no es conocida, y se divide en una componente determinística  $V$ , que puede ser observada, y una componente estocástica  $\varepsilon$ , que recoge todo aquello que el modelador no es capaz de observar pero que influye en la utilidad (McFadden, 1981).

A continuación se describen los modelos de mayor uso (Montero-Codina, 2009).

### 5.1 Modelo Logit Multinomial (MNL)

El modelo logit es aplicable como modelo de selección de alternativas (discretas) si:

- Las variaciones individuales en los gustos están representadas en la componente sistemática (observable) de la utilidad. Si las variaciones de gustos son aleatorias

(forman parte de la utilidad no observable) entonces no pueden tratarse mediante modelos logit.

- El patrón de sustitución (efecto del cambio en alguna de las componentes observables de una alternativa) es proporcional entre las alternativas.
- Si los factores no observables son independientes del tiempo en situaciones de selección repetida de alternativas. Si los factores no observables están correlacionadas en el tiempo no pueden capturarse mediante un modelo logit.

$\varepsilon$  se distribuye mediante una ley Gumbel. Es una distribución de valores extremos, concretamente es el máximo de muchos valores aleatorios y capturan atributos no observables, medidas y errores de especificación. El aspecto clave reside en la independencia de los errores.

El individuo  $i$  seleccionará la alternativa  $j$  si ésta tiene utilidad máxima:

$$U_{ij} = V_{ij} + \varepsilon_{ij} \geq U_{il} = V_{il} + \varepsilon_{il} \quad \forall l \neq j \rightarrow V_{ij} - V_{il} \geq \varepsilon_{il} - \varepsilon_{ij} \quad \forall l \neq j \quad (1)$$

Por tanto, la probabilidad de selección de  $j$  viene dada por:

$$p_i(j) = P([V_{ij} + \varepsilon_{ij} \geq \max_{l \neq j} \{V_{il} + \varepsilon_{il}\}]) \quad (2)$$

Sean los errores  $\varepsilon_{il}$  i.i.d. (independientes e idénticamente distribuidos) con distribución de probabilidad Gumbel (0,1) y  $V_{il} + \varepsilon_{il}$  también es Gumbel ( $V_{il}, 1$ ).

A partir de todas las hipótesis anteriores se puede llegar a una expresión más sencilla para  $p_i(j)$ :

$$p_i(j) = \frac{e^{V_j}}{\sum_{k=1}^m e^{V_k}} \quad (3)$$

Donde  $V_j = \alpha_j C_j$ , siendo  $\alpha_j$  los parámetros a determinar en el ajuste y  $C_j$  los costes generalizados de cada modo  $j$ , para viajar entre los dos puntos del territorio deseados.

El MNL es extremadamente simple y puede no ajustarse a la realidad de la selección de alternativas cuando éstas no son independientes (es decir, hay grupos de alternativas

más similares que otras, como los distintos modos de transporte público versus el coche privado).

Tampoco resulta posible modelar las variaciones aleatorias en los gustos según los usuarios (es decir, la percepción de la tarifa varía con la renta, pero la variable percepción de la tarifa no es medible), en cuyo caso hay que trabajar con modelos de efectos aleatorios, en lugar de efectos fijos.

## 5.2 Modelo Probit Multinomial (MNP)

El modelo Probit se basa en considerar el valor del tiempo de viaje como una variable estadística con una determinada función de distribución, asumiendo que el vector aleatorio  $\varepsilon_n$ , que contiene a los errores de cada alternativa, se distribuye en conjunto como una función normal multivariada, con una matriz de covarianza general.

$$\varepsilon_n = (\varepsilon_{1n}, \dots, \varepsilon_{in}, \dots, \varepsilon_{J_n n})^t, \quad \varepsilon_n \sim N(0_{J_n \times 1}, \Sigma_{J_n \times J_n}) \quad (4)$$

$$\Sigma_n = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & \sigma_{1J_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1J_n} & \cdots & \sigma_{J_n}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sin embargo, no todos los elementos de la matriz de covarianza pueden ser estimados econométricamente. Existen restricciones de identificabilidad que se deducen a partir de estudiar el modelo desviado con respecto a una alternativa (Bolduc, 1992). Esto hace particularmente interesante la discusión de la estructura de la matriz de covarianza esperada en cada caso particular de modelación.

Únicamente en el caso binario ( $J = 2$ ), aparecen modelos simples sin necesidad de tratamiento numérico. Si  $\rho$  es el coeficiente de correlación lineal entre las utilidades de las dos alternativas, la matriz de varianzas y covarianzas puede escribirse como:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_A^2 & \rho\sigma_A\sigma_B \\ \rho\sigma_A\sigma_B & \sigma_B^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Entonces  $\varepsilon_{iB} - \varepsilon_{iA} \approx N(0, \sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_B^2 - 2\rho\sigma_A\sigma_B)$  y por tanto, la probabilidad de seleccionar la alternativa  $A$  es:

$$P_i(A) = P([U_{iB} = V_{iB} + \varepsilon_{iB} \leq V_{iA} + \varepsilon_{iA} = U_{iA}]) = P([\varepsilon_{iB} - \varepsilon_{iA} \leq V_{iA} - V_{iB}]); \quad (7)$$

$$P_i(A) = \Phi\left(\frac{V_{iA}-V_{iB}}{\sigma}\right) / \Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{w^2}{2}} dw \quad (8)$$

Este modelo permite superar las tres limitaciones del MNL:

- Puede representar variaciones individuales aleatorias en los gustos.
- Puede representar cualquier patrón de sustitución, más general que el proporcional.
- Puede usarse en datos longitudinales (paneles) para modelar correlaciones en la parte no observada de la utilidad a lo largo del tiempo.

El problema de este método reside en que hay que recurrir a la integración numérica o a la simulación porque no hay una fórmula analítica cerrada para la probabilidad de elección de las alternativas.

### 5.3 Modelo Logit Jerárquico (NL)

El modelo NL fue construido para representar correlación entre grupos disjuntos de alternativas, las que se asocian a un nido. En cada uno de estos nidos cabe la posibilidad de que otros nidos sean formados si dentro del nido en cuestión todavía hay alternativas disjuntas. Si sólo se suponen dos niveles jerárquicos (ver figura 1), y se postula que la utilidad de coger la alternativa  $i$  en el nido  $j$  está dada por:

$$U(i, j) = V_j + V_{i/j} + \varepsilon_j + \varepsilon_{i/j} \quad (9)$$

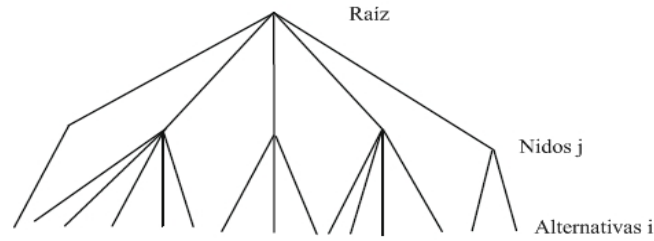


Figura 1

Se puede demostrar que, bajo ciertas condiciones, la probabilidad de que dicha utilidad sea elegida viene es:

$$P_{ij} = \frac{e^{\lambda_j V_{i/j}}}{\sum_{i' \in j} e^{\lambda_j V_{i'/j}}} \cdot \frac{e^{\beta \left[ \frac{1}{\lambda_j} \log \left( \sum_{i \in j} e^{\lambda_j V_{i/j}} \right) \right]}}{\sum_{j'=1}^m e^{\beta \left[ \frac{1}{\lambda_{j'}} \log \left( \sum_{i \in j'} e^{\lambda_{j'} V_{i/j'}} \right) \right]}} \quad (10)$$

Esta probabilidad es un producto de dos probabilidades MNL donde  $\beta$  y  $\lambda_j$  son sus factores de escala y  $m$  es el número de alternativas en la raíz. Los parámetros de las probabilidades MNL y NL pueden ser rápidamente estimados por máxima verosimilitud (Robusté, F. y Estrada M., 2007).

El MNL es extremadamente simple y puede no ajustarse a la realidad de la selección de alternativas cuando éstas no son independientes (es decir, hay grupos de alternativas más similares que otras, como los distintos modos de transporte público versus el vehículo privado).

Tampoco resulta posible modelar las variaciones aleatorias en los gustos según los usuarios (es decir, la percepción de la tarifa varía con la renta, pero la variable percepción de la tarifa no es medible), en cuyo caso hay que trabajar con modelos de efectos aleatorios, en lugar de efectos fijos.

Los modelos probit multinomiales permiten más capacidad modelística, pero no son tratables en general. Otra extensión posible de los MNL son los modelos generalizados de valor extremo (GEV), que se expondrán en el próximo apartado.

#### 5.4 Modelo de Valor Extremo Generalizado (GEV)

Estos modelos fueron propuestos por McFadden (1978) y constituyen una generalización de la propuesta logit que permite patrones de sustitución más complejos que el decalaje proporcional. Son modelos en que la parte no observable de la utilidad en las distintas alternativas muestra una distribución conjunta de Valor Extremo Generalizado. No pueden tratar todas las posibles estructuras de correlación entre alternativas, pero si muchas de ellas; ni tampoco pueden capturar la heterocedasticidad ni la heterogeneidad de los individuos. Esta distribución permite correlaciones entre las componentes aleatorias de la utilidad, pero si las correlaciones son cero entonces a un modelo logit (MNL): la distribución conjunta es producto de distribuciones Gumbel. Los modelos logit jerárquicos son los representantes más conocidos de la familia de modelos GEV.

Un modelo GEV viene generado por una función  $G: \mathbb{R}^J \rightarrow \mathbb{R}$ , donde  $G$  puede ser una función de distribución de un vector aleatorio multidimensional de los errores  $\varepsilon_n$ , un modelo de probabilidad o la utilidad esperada máxima.

- $G$  es homogénea de grado  $\mu$ , con  $\mu > 0$ , si satisface que  $G(\alpha x) = \alpha^\mu G(x)$ .
- $\lim_{x_i \rightarrow +\infty} G(x_1, \dots, x_i, \dots, x_J) = +\infty$ , para cada  $i = 1, \dots, J$
- La derivada parcial  $k$ -ésima con respecto a  $k$  distintos  $x_i$  es no negativa si  $k$  es impar y no positiva si  $k$  es par, es decir, para cualquier subconjunto de índices
 
$$(-1)^k \frac{\partial^k G(x)}{\partial x_{i_1} \dots \partial x_{i_k}} \leq 0 \quad \forall x \in \mathbb{R}_+^J$$
- La función densidad de probabilidad  $F(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_J) = e^{(-G(e^{-\varepsilon_1} \dots e^{-\varepsilon_J}))}$
- La probabilidad de selección de la alternativa  $j$  es:

$$P(j) = \frac{e^{v_i + \ln\left(\frac{\partial G(e^{V_1} \dots e^{V_J})}{\partial x_i}\right)}}{\sum_j V_j + \ln\left(\frac{\partial G(e^{V_1} \dots e^{V_J})}{\partial x_j}\right)} \quad (11)$$

$P(j)$  tiene una expresión cerrada y es consistente con la hipótesis de selección por maximización de la utilidad (aleatoria).

### 5.5 Modelo Logit Mixto

En la práctica los modelos más usados son el logit multinomial (MNL) y el logit jerárquico (NL), que son relativamente sencillos de estimar y presentan la ventaja de que disponen de una formulación cerrada para el cálculo de probabilidades. Sin embargo, estos modelos parten de unas hipótesis restrictivas sobre la estructura de los errores, la homogeneidad de la población y los patrones de sustitución. Se han desarrollado modelos menos restrictivos, tales como otros modelos de valor extremo generalizados (GEV) más complejos que el NL y el modelo probit, pero las dificultades para su especificación y estimación han limitado su uso.

En los últimos años, se ha puesto de moda en la literatura científica sobre este ámbito el modelo logit mixto (también llamado logit kernel y modelo de componentes de error). Se le denomina “el modelo del futuro”, afirmando que casi cualquier estructura de error deseable puede ser representada por este modelo (Walker, Ben-Akiva, Bolduc, 2003). McFadden y Train (2000) han demostrado que cualquier modelo de utilidad aleatoria puede ser aproximado con el grado de aproximación que se desee mediante un modelo logit mixto. Además, los procedimientos de simulación han permitido que la integración de la función de probabilidad necesaria en estos modelos ya no sea un obstáculo. (Orro, A. y García, F., 2004).

Si bien la probabilidad del logit mixto se puede derivar de un comportamiento de maximización de la utilidad de varias maneras formalmente equivalentes, la más directa y utilizada actualmente es la interpretación basada en coeficientes aleatorios. Esta especificación se orienta principalmente al estudio de las variaciones en los gustos, es decir, el hecho de que la valoración de los diferentes atributos que entran en la utilidad varía dentro de la población, al contrario de lo que se supone en los modelos MNL o NL. El siguiente desarrollo se basa en Train (2003).

Cada individuo se enfrenta a una elección entre  $J$  alternativas. La utilidad de la alternativa  $j$  para el individuo  $n$  será (si se emplea una función lineal, que es lo más frecuente):

$$U_{nj} = \beta'_n x_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad (12)$$

Donde  $x_{nj}$  son las variables observadas de la alternativa de transporte y del individuo,  $\beta'_n$  es el vector de coeficientes que reflejan la valoración de cada una de estas variables por parte del individuo  $n$  (sus gustos o preferencias) y  $\varepsilon_{nj}$  es un término aleatorio Gumbel iid.

Los coeficientes  $\beta'_n$  varían entre los individuos de la población con densidad  $f(\beta|\theta)$ , donde  $\theta$  son los parámetros que definen esa función de densidad (por ejemplo media y varianza). El individuo conoce sus propios  $\beta'_n$  y  $\varepsilon_{nj}$  y por lo tanto escoge siempre la alternativa de mayor utilidad. El analista observa los  $x_{nj}$  pero no observa los  $\beta'_n$  y  $\varepsilon_{nj}$ . Si el analista conociese  $\beta'_n$  la probabilidad logit condicionada a  $\beta'_n$  sería:

$$L_{ni}(\beta) = \frac{e^{\beta'_n x_{ni}}}{\sum_{j=1}^J e^{\beta'_n x_{nj}}} \quad (13)$$

Sin embargo, como no se conoce  $\beta'_n$  se debe calcular la probabilidad incondicional como la integral de la  $L_{ni}(\beta'_n)$  sobre toda la variación posible de  $\beta'_n$ :

$$P_{ni} = \int L_{ni}(\beta) f(\beta|\theta) d\beta \quad (14)$$



Dado que esta integral no suele tener expresión analítica, las probabilidades son aproximadas a través de la simulación para cada valor dado de  $\theta$ . Se generan valores de  $\beta$  de  $f(\beta|\theta)$  que se denominarán  $\beta_r$ , se calcula el valor de la fórmula logit  $L_{ni}(\beta_r)$  con el valor extraído y se promedian los resultados. El promedio obtenido es la probabilidad simulada, que es un estimador insesgado de la probabilidad:

$$SP_{ni} = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R L_{ni}(\beta^r) \quad (15)$$

### 5.6 Modelo Precio-Tiempo

Este modelo, elaborado entre 1967 y 1973 por C. Abraham y J.D. Blanchet, fue desarrollado pensando directamente en cómo modelizar la distribución modal en el transporte de viajeros en un corredor determinado. Está basado en la suposición de que los viajeros eligen un modo de transporte u otro según el valor que asignan al tiempo de viaje y su coste. Así, el usuario escogerá el modo con el menor coste generalizado en relación a su valor de tiempo.

El valor de tiempo o VOT (utilizado para convertir el tiempo en dinero) representa el precio (en €/hora) a partir del cual un viajero estará dispuesto a alargar su viaje una hora más. Cuanto mayor sea el VOT, la predisposición del viajero a elegir el medio de transporte más rápido también será mayor independientemente de su precio. Por otra parte, un viajero con un bajo VOT considerará más el precio del modo de transporte que su velocidad.

Sea  $i$  un viajero cualquiera con VOT  $v_i$  y  $j$  el modo de transporte con tiempo  $T_j$  y precio  $P_j$ , el coste generalizado  $C_{gj}$  valorado por el  $i$ -ésimo viajero es:

$$(C_{gj})_i = P_j + v_i T_j \quad (16)$$

En el gráfico 1 se puede observar un ejemplo de los diferentes costes generalizados para cualquier valor de tiempo del usuario. En este caso se supone que a mayor velocidad del medio de transporte, mayor es su precio. En consecuencia, si suponemos que un usuario cualquiera basa su elección de medio de transporte únicamente según el precio y el VOT; un viajero con un valor de tiempo inferior a  $v_1$  hará el viaje en autobús, uno con  $v_1 < v_i < v_2$  lo hará en coche, uno con  $v_2 < v_i < v_3$  lo hará en ferrocarril (AVE) y, finalmente, un viajero con  $v_i > v_3$  realizará el trayecto en avión.

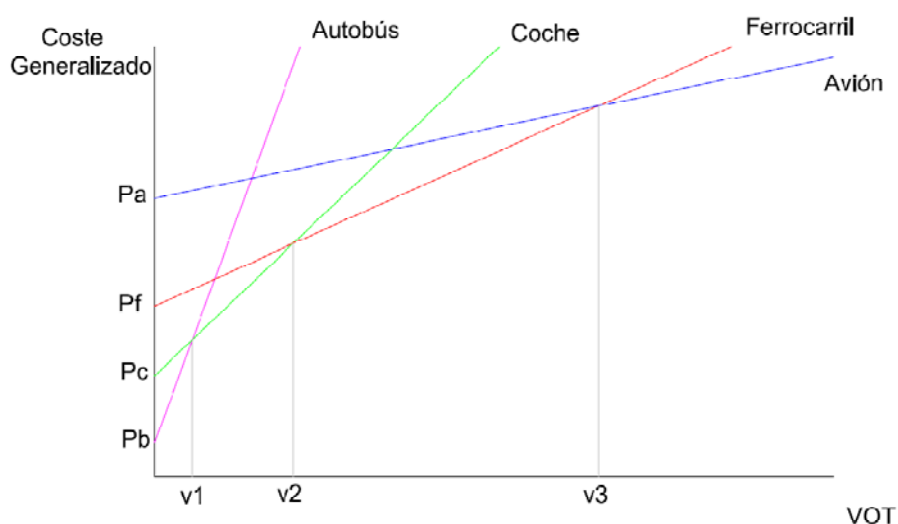


Gráfico 1. Elaboración propia

El problema que presenta este modelo es la obtención de cómo se distribuye el VOT en el total de viajeros. Una forma de conocer su distribución es derivándola de la distribución de la renta, que en general se adapta bien a una función de densidad de probabilidad log-normal. Otra opción es considerar una distribución gamma, que también tiene una forma similar.

## 6 Estudios realizados

### 6.1 Estudio 1: B. Guirao (2000)

#### 6.1.1 Modelo e hipótesis

Modelo secuencial ad-hoc con dos fases.

Frente a la aplicación de un modelo directo agregado para analizar fenómenos de inducción, siempre queda la posibilidad de diseñar un modelo ad-hoc en el que se separen matemáticamente los procesos de generación y transferencia modal. Dichas formulaciones habrán de estar relacionadas, ya que ambos procesos no son independientes.

El modelo se basa en la integración de un nuevo modo de transporte a un corredor con unos modos de transporte que ya están en funcionamiento. Antes de la actuación, puede calibrarse un modelo de gravedad que explique la forma en que se generan los viajes, del tipo:

$$T_{ij} = K \cdot P_i \cdot P_j \cdot C_g^{-\alpha} \quad (17)$$

Siendo:

$P_i$ : población del nodo  $i$

$C_g$ : media ponderada de los costes generalizados de los modos implicados

$K, \alpha$ : constantes

$$C_g = \frac{\sum T_i C_{gi}}{\sum T_i} \quad (18)$$

Después de la actuación, los modos existentes perderán un porcentaje de sus usuarios a favor del nuevo modo (en este caso, el tren de alta velocidad), que pueden estimarse

mediante modelos de reparto modal que comparen sus costes y tiempos frente a los correspondientes al modo alternativo uno a uno por separado. Suponemos que en el corredor existe una base de datos adecuada que permite la calibración los modelos.

Una vez se obtienen los porcentajes de viajeros que han permanecido fieles a los antiguos medios de transporte y se sabe cuál es la generación de viajes entre los dos puntos se puede obtener fácilmente el porcentaje de usuarios del nuevo medio.

A continuación se exponen las hipótesis tenidas en cuenta:

Con el objetivo de poner en práctica en el año 2004 el modelo formulado, necesitamos conocer mínimamente las condiciones de funcionamiento del tren de alta velocidad para dicha fecha. Estas condiciones han sido estimadas recientemente en el informe Asesoría para la determinación del Canon de Uso de la Línea Madrid-Barcelona (GIF, 1997).

A su vez, según dicho informe, la tarifa media para los trenes de alta velocidad que circulen por la línea se fijó en 17,00 ptas/viajero-km, que a razón de los 625 km., condicionan un coste medio del billete que asciende a 10.620 pta. (este valor ya lleva incorporado un valor del IVA del 7%). Asimismo, el tiempo de viaje entre las dos ciudades se reducirá a 2 horas 30 minutos en los servicios directos (por servicio directo se entiende aquél que no efectúa parada alguna). A aquellos trenes que se detengan en Zaragoza, se les ha asignado un tiempo de tres horas, pero a efectos de nuestro cálculo trabajaremos con el tiempo correspondiente a los servicios directos.

En relación con el diseño de la situación de referencia para el resto de los modos, la previsión que hemos adoptado parte, al igual que la realizada por el GIF en su estudio, de una estabilidad casi absoluta respecto a la del año 1997. No obstante, es interesante explicar las repercusiones que dicha hipótesis tiene en el tipo de estudios que estamos abordando y los riesgos que se corren con ello.

El transporte aéreo ha experimentado un fuerte crecimiento en los últimos años en este corredor y su evolución histórica, desde los años setenta, ha estado fuertemente

correlacionada con el PIB nacional. En los últimos cinco años, el crecimiento porcentual llega a superar al del PIB. Su tarifa, no obstante, se ha mantenido muy estable durante los últimos cinco años.

A su vez, la carretera presenta, además de los problemas derivados de la determinación de los viajes 0-D a través de las encuestas, el fuerte crecimiento que han experimentado las IMD de tres estaciones de aforos consultadas (entre ellas la Z-21, de la que se tomaron los datos), que nos es difícil atribuir a una causa concreta. A ello se le suma la necesidad de hacer una previsión acerca de la evolución de los precios de la gasolina para determinar los costes totales del viaje.

Para la determinar el crecimiento del PIB se emplearon las previsiones que maneja el Ministerio de Fomento en los informes de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, de un 2,5% anual. En consecuencia, el tráfico aéreo se hizo crecer a un ritmo de un 3% anual. Con relación a los precios de la gasolina, se adoptó la decisión conservadora de sólo aumentar importe al 1% anual. A las IMD, por su parte, se les hizo mantener el crecimiento de los últimos tres años: un 2% anual.

La variación en las hipótesis que hemos realizado en relación a los modos aéreo y vehículo privado afectarán directamente a las transferencias modales, con dos agravantes:

- La existencia de un peaje a añadir al coste de combustible y conservación, en prácticamente la mitad del recorrido en carretera entre Madrid y Barcelona, convierten al vehículo privado en un modo muy frágil frente al tren de alta velocidad, a diferencia de lo que ocurría en el corredor Madrid-Sevilla.
- El tráfico aéreo agrupa, hoy en día, la mayoría de los viajes que se producen entre Madrid y Barcelona (más de 3 millones de viajes anuales) y su transferencia modal al AVE será determinante.

Afortunadamente, se espera en los próximos años una reducción progresiva de los peajes, al mismo tiempo que avanzan las obras de conversión en autovía de la N-II entre Zaragoza y Barcelona. Estos dos últimos hechos pueden afectar directamente a la transferencia modal al tren de alta velocidad.

Por último, se quiere hacer notar que en este planteamiento no se ha tenido en cuenta una posible respuesta estratégica de las compañías aéreas, con una bajada de tarifas para el año 2005. La experiencia de la compañía Iberia en la relación Madrid-Sevilla, puede haber provocado el esbozo de determinadas políticas de actuación esta vez.

### 6.1.2 Resultados

Los resultados de la tabla 1 muestran de dónde provienen los pasajeros del tren de alta velocidad. Se ha completado el estudio del corredor Madrid-Barcelona, realizando tres hipótesis adicionales y volviendo a calcular el tráfico del AVE.

Procedencia modal	Viajeros	Porcentaje (%)
Avión	2.024.166	67
Coche	388.996	13
Ferrocarril	386.400	13
Autobús	27.000	1
Nuevos viajeros	196.837	7
Total	3.023.400	100

*Tabla 1. B Guirao (2000)*

En primer lugar, se ha supuesto que el usuario de vehículo privado no computa los costes de conservación del mismo en el momento de comparar las características de su elección frente a otras alternativas (hipótesis 1). En segundo lugar, junto con ello, se ha considerado que más del 40% de los coches que realizan el trayecto funcionan con gasolina diesel (hipótesis 2), reduciéndose el gasto en combustible en un 20%. Por

último, a estas dos circunstancias se le ha añadido la posibilidad de que el logit avión-tren de alta velocidad que se ha expuesto no representase del todo la realidad. Se sabe que para un porcentaje importante de los viajeros de puente aéreo es la empresa privada o la Administración Pública la que corre con los gastos del billete, con lo cual la bajada de tarifa frente al avión, que propone la alta velocidad no será determinante para el reparto modal. En la hipótesis 3, se ha propuesto que sólo un 40% (frente al 55% resultante de la aplicación del logit), se transfieren al nuevo modo (resumen en tabla 2).

Procedencia modal	Hipótesis 1		Hipótesis 2		Hipótesis 3	
	viajeros	Porcentaje (%)	viajeros	Porcentaje (%)	viajeros	Porcentaje (%)
Avión	2.024.166	69	2.024.166	71	1.472.121	65
Coche	311.197	11	194.498	7	194.498	9
Ferrocarril	386.400	13	386.400	14	386.400	17
Autobús	27.000	1	27.000	1	27.000	1
Nuevos viajeros	201.237	7	217.936	8	169.081	8
Total	2.950.000	100	2.850.000	100	2.249.100	100

Tabla 2

## 6.2 Estudio 2: González-Savignat (2000)

### 6.2.1 Modelo e hipótesis

El modelo describe el impacto en el proceso de elección modal sobre la demanda de viajes que actualmente se realizan en avión, tendrá el futuro tren de alta velocidad Madrid-Barcelona.

La nueva infraestructura puede alterar los costes generalizados relativos de las alternativas disponibles y se trata de analizar hasta qué punto los individuos que actualmente viajan en avión podrían alterar su elección hacia la nueva opción de transporte. Este impacto será evaluado bajo distintos escenarios que se puedan dar en el corredor Madrid-Barcelona.

Respecto a las variables que caracterizan la oferta de transporte, en el modelo se incluyeron todas aquellas que determinan la elección modal y se considera que éste está especificado adecuadamente.

El modelo de elección discreta que analiza la demanda de viajes entre tren de alta velocidad (*AVE*) versus avión (*a*) incluye las variables precio (*P*), tiempo de viaje (*TV*), tiempo de acceso (*TA*), Se considera como tiempo de acceso la antelación con la que el viajero parte del lugar de origen (trabajo, domicilio, etcétera) hacia la estación o aeropuerto. Es decir, considera tiempo de desplazamiento, facturación y embarque. ;y frecuencia (*F*) para ambas alternativas. Así, la desutilidad de viajar en cada alternativa *i* (*Vi*) será evaluada en función de estas variables de oferta adoptando una función indirecta de utilidad aditiva y lineal en los parámetros para el componente determinístico que es la forma funcional más comúnmente utilizada en la literatura (Ben-Akiva y Lerman):

$$V_{AVE} - V_a = \beta_p(P_{AVE} - P_a) + \beta_{tv}(TV_{AVE} - TV_a) + \beta_{ta}(TA_{AVE} - TA_a) + \beta_f(F_{AVE} - F_a) \quad (19)$$



Así, y de modo congruente con lo expuesto en la ecuación (19), se estima un modelo logit binomial a partir del cual es posible obtener el valor de los parámetros  $\beta$  que recogen el efecto de cada variable (utilidad marginal) sobre la probabilidad de elegir cada alternativa de viaje. En concreto, la variable dependiente estimada será la probabilidad de elegir el tren de alta velocidad.

Una ventaja muy importante presente en el modelo es el tipo de datos utilizados. Al ser el tren de alta velocidad una alternativa hipotética y, por lo tanto, no observable, fue preciso crear un mercado inexistente a partir del cual fuera posible derivar las elecciones modales. La recogida de esta información se llevó a cabo a través de un trabajo de campo en el corredor de transporte Madrid-Barcelona, incorporando en el cuestionario el mercado hipotético que se definió a partir de un modelo de diseño experimental (Bates, 1988). A cada viajero de avión se le planteaban una serie de escenarios hipotéticos en los que el tren de alta velocidad presentaba distintos niveles para las variables definidas previamente. El individuo alteraba o no su elección en función del cambio en el nivel de dichas variables.

Se utilizan dos modelos, ya que dentro de cada muestra de mercado se segmentó según si el viaje se realizara en horas de ocio o de trabajo. Esta aproximación trata de adaptarse a la literatura que trata de forma distinta a un ahorro de tiempo de viaje (derivado, por ejemplo, de un servicio de transporte más rápido) dentro del horario laboral o fuera de él.

Los parámetros estimados que se presentan en la Tabla 3 recogen el peso que el viajero medio otorga a las diferentes características; es decir, la utilidad marginal. Al ser un modelo de elección discreta binario, lo relevante es el coste o tiempo adicional o, alternativamente, el ahorro en coste y/o tiempo de viaje que supone la elección de una alternativa respecto a la otra. Por ello, el parámetro recoge el efecto de la diferencia en el coste y en los tiempos asociados al viaje. Los parámetros estimados recogen cuantitativamente el coste de oportunidad de los recursos monetarios y de tiempo

destinados al viaje. En primer lugar, el signo negativo estimado para el precio, tiempo de viaje y tiempo de acceso es el esperado ya que viajar no es bien final sino que se considera como una demanda intermedia derivada del consumo de otros bienes que sí son finales. Por lo tanto, el individuo deriva desutilidad del gasto y del tiempo consumido en el viaje ya que son recursos que no puede destinar a otras actividades. Por su parte, el signo positivo de la frecuencia es el adecuado ya que una mayor frecuencia implica un menor tiempo dedicado al viaje (en términos de tiempo de espera, por ejemplo). Los modelos estimados permiten afirmar que, en general, los individuos que viajan por motivo de trabajo derivan menor desutilidad del precio y mayor desutilidad del tiempo asociado al viaje que los que viajan por ocio. Esto significa que la disposición a pagar por obtener un ahorro en el tiempo de viaje es mayor en viajes de trabajo que de ocio.

#### PARÁMETROS DEL MODELO

Variable dependiente: Probabilidad de elegir AVE		
	AVE vs. avión	
	Trabajo	Ocio
Precio	-0,00014	-0,00031
	(-3,8)	(-3,4)
Tiempo de viaje	-0,0310	-0,0310
	(-14,4)	(-5,8)
Frecuencia	0,5880	0,3590
	(8,0)	(1,9)
Tiempo de acceso	-0,0123	-0,0046
	(-3,9)	(-0,6)
Constante	2,980	3,499
	(10,0)	(4,8)

Tabla 3

El modelo probabilístico permite obtener la probabilidad de elegir cada alternativa de viaje a partir de las funciones de utilidad. La simulación pretende valorar y cuantificar el cambio en la probabilidad de elegir cada alternativa ante un cambio en las condiciones en las que opera el servicio ferroviario. Para ello, se considera más razonable que la variación afecte únicamente a características del viaje en tren de alta velocidad manteniendo constante el valor de referencia adoptado para las alternativas. Así, la probabilidad recogida en la ecuación (19) se compara con:

$$P'_{AVE} = \frac{1}{1 + \exp[\sum_k \beta^k (\Delta X_{AVE}^k - X_j^k)]} \quad (20)$$

Siendo  $P'_{AVE}$  la nueva cuota de mercado correspondiente al AVE o, alternativamente, la probabilidad con la que el agente representativo medio de cada grupo de población elige esta alternativa de viaje. La función de utilidad para cada alternativa se expresa como una suma ponderada entre los parámetros estimados  $\beta^k$ , que recogen el efecto de cada variable  $k$ , sobre la probabilidad de elección modal, y de las características de la alternativa futura,  $X_{AVE}$ , y  $X_j$  que recoge las condiciones de oferta para el avión.

### 6.2.2 Resultados

#### Modelo de reparto modal

Negocios		Placer	
Avión	AVE	Avión	AVE
61%	39%	42%	58%

Tabla 4. Elaboración propia

#### Elasticidad de las variables utilizadas

Variables	Cambios en las variables	Negocios		Placer	
		Avión	AVE	Avión	AVE
Precio	-10%	57%	43%	36%	64%
	+10%	64%	36%	48%	52%
	+20%	68%	32%	55%	44%
	Pa=Pave	66%	34%	53%	47%
Tiempo de viaje	-10%	51%	49%	34%	66%
	+10%	71%	29%	51%	49%
	+20%	80%	20%	60%	40%
Tiempo de acceso	-10%	60%	40%	-	
	+10%	62%	38%		
	+20%	63%	37%		
	Taa=Taave	70%	30%		
Frecuencia	-10%	59%	41%	41%	58%
	+10%	62%	38%	42%	57%
	+20%	63%	37%	43%	57%
	Fa=Fave	49%	51%	40%	60%

Tabla 5. Elaboración propia

El nivel de servicio con el que el tren de alta velocidad compita en el mercado determinará la cantidad de pasajeros que cambian el avión por dicho medio de transporte. Por ejemplo, la elasticidad obtenida en el tiempo de acceso muestra la poca reacción de la demanda en variaciones de esta variable. Aún así, la localización de la estación del tren de alta velocidad en el centro de las ciudades en las que tiene parada será determinante en el número de pasajeros del tren de alta velocidad. Si la estación de tren estuviera a una distancia similar al aeropuerto del centro de la ciudad, el tren perdería un 14,7% de pasajeros que hubieran cambiado el avión por este otro medio de transporte si la estación hubiera estado más céntrica.

Una de las variables determinantes en la distribución modal es el tiempo de transporte. Este tiempo se verá afectado de forma muy importante cuanto más paradas intermedias entre los dos destinos haya. Por este motivo, si se busca competir con el avión es esencial minimizar el número de paradas. En el corredor Madrid-Barcelona se ha solucionado con una serie de trenes que ofrecen servicio directo entre las dos ciudades, sin paradas.

Las inversiones y la planificación del servicio del tren de alta velocidad serán determinantes a la hora de definir futuros escenarios de demanda. En particular, el precio y el tiempo de viaje con los que el tren de alta velocidad compita en el mercado afectarán de forma considerable en el número de pasajeros que transportará.

### 6.3 Estudio 3: A. López-Pita, F. Robusté (2005)

#### 6.3.1 Modelo e hipótesis

La demanda que generará el tren de alta velocidad ha sido estimada mediante un modelo de precio-tiempo para determinar la distribución modal entre el AVE y el avión. Este modelo proporciona una forma de calcular el porcentaje respecto al total de los diferentes medios de transporte. Se supone que los pasajeros eligen uno u otro medio según el valor que conceden al tiempo, precio y frecuencia de éste. El valor total que un usuario está dispuesto a gastar para desplazarse es el coste generalizado ( $C_g$ ).

Sea  $i$  un viajero cualquiera con valor de tiempo  $v_i$  y  $j$  el modo de transporte con tiempo  $T_j$  y precio  $P_j$ , el coste generalizado  $C_{gj}$  valorado por el  $i$ -ésimo viajero es:

$$(C_{gj})_i = P_j + v_i T_j \quad (21)$$

Se han utilizado las siguientes hipótesis:

- Coche: \$74,5 (combustible y peajes).
- Avión: \$90/pasajero.
- AVE: \$0,12/pasajero\*km
- Valor de tiempo (2002, \$)

	Coche	Avión	AVE
Trabajo	14	40	30
Placer	12	24	19

Tabla 6

### 6.3.2 Resultados

#### Usuarios que viajarán en AVE

Antes viajaban en avión	2.200.000
Antes viajaban en coche	360.000
Antes viajaban en tren convencional	570.000
Tráfico generado	350.000
TOTAL	3.480.000

*Tabla 7.Elaboración propia*

#### Predicción A.López-Pita, F.Robusté (2005)

AVE	63,5%
Avión	36,5%

*Tabla 8.Elaboración propia*

## 7 Datos reales del corredor Madrid-Barcelona

La ruta aérea que une Madrid y Barcelona era, al menos hasta 2008, el enlace con más aviones diarios en el mundo entre dos aeropuertos, el corredor natural de los negocios y barómetro de la actividad económica y comercial del país.

El día 20 de febrero de 2008 se puso en servicio la línea de alta velocidad completa entre Madrid y Barcelona con total normalidad con velocidad máxima de 300 km/h. El servicio inicial incluye 17 trenes por sentido entre Madrid y Barcelona, de los cuales 8 son en sentido Barcelona y 7 en sentido Madrid son sin paradas y hacen el trayecto hasta en 2h 38min.

Como puede observarse en el gráfico 2, desde la puesta en funcionamiento de la alta velocidad, el reparto de viajeros entre el ferrocarril y el avión se ha visto muy afectado.

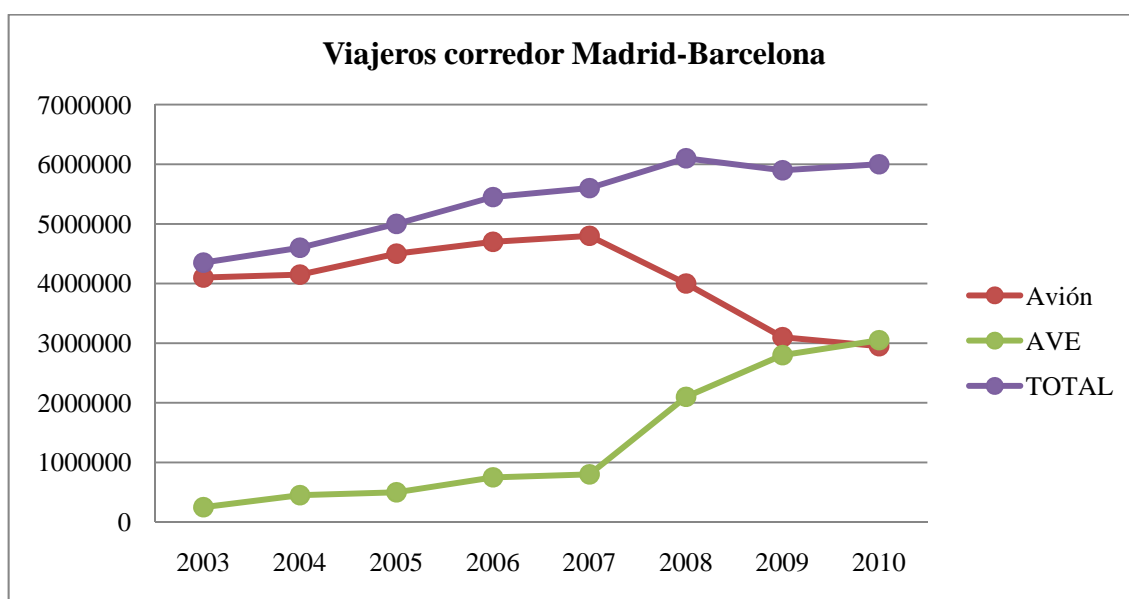


Gráfico 2. Elaboración propia



Durante el primer año en funcionamiento de la línea de alta velocidad (febrero 2008-febrero 2009) ésta ha transportado una media de 6.388 viajeros al día entre Madrid y Barcelona, frente a los 8.429 viajeros al día que han ido en avión. Durante el año 2009 el porcentaje de pasajeros de tren fue aumentando poco a poco hasta situarse aproximadamente en el 50% (porcentaje que sólo incluye los pasajeros que viajan en AVE o en avión tal como se muestran en el gráfico 2). Este empate en la repartición de viajeros se ha estado estabilizando desde principios de 2009 como se observa en el gráfico 3. En 2009 el avión ha experimentado una fuerte bajada en el número de viajeros transportados (-900.000 pasajeros) pero todavía mantiene una importante cuota de mercado. En diciembre de 2009, 233.565 viajeros escogieron el avión como medio de transporte y 237.456 viajaron en AVE.

Si se observa el gráfico 3 se puede ver que el 2008 fue un año de adaptación para el nuevo medio de transporte, en el que los usuarios fueron empezando a viajar en él paulatinamente.

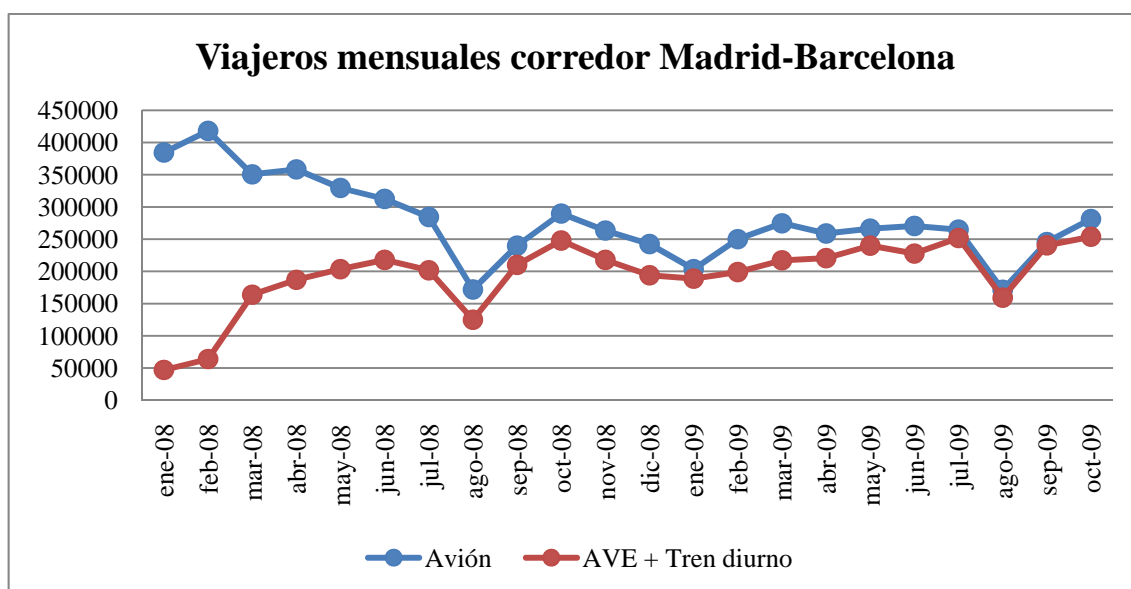


Gráfico 3. Elaboración propia

La explosión de tráfico que se esperaba no ha llegado a producirse, en buena medida por los efectos de la crisis económica y la suma de los pasajeros transportados cada ejercicio apenas ha superado un 5% los que llevaba el avión antes de la llegada del AVE.

En el segundo ejercicio de explotación del tren de alta velocidad el comportamiento del corredor en el número de los pasajeros que suma el avión y el ferrocarril sufrió una contracción del 1,8%. Así, mientras que entre el 20 de febrero de 2008 y la misma fecha de 2009 ambos modos de transporte llevaron 5,863 millones de viajeros, en los doce meses siguientes esa cifra se redujo hasta 5,754 millones.

Las expectativas de crecimiento del tráfico no se han cumplido, pero sí lo ha hecho de manera inexorable la caída de los ingresos unitarios de las empresas que explotan el corredor. Aunque no existen cifras oficiales, fuentes de las distintas compañías estimaron que la bajada puede estimarse en torno al 20%.

Renfe asegura que el 38,2% de los pasajeros que transportó el AVE en el último año han viajado con ofertas promocionales que suponen ahorros por billete de hasta el 60% sobre la tarifa oficial.

Iberia también ha ajustado sus precios en los últimos meses. La compañía asegura que ahora la tarifa sin descuento del Puente Aéreo es inferior a la del AVE en un 4%. La aerolínea lanzó en noviembre un nuevo precio que supuso una rebaja del 35% en sus billetes más utilizados entre Madrid y Barcelona.

Un tercer factor que ha contribuido a la rebaja de los ingresos unitarios para los transportistas aéreos y ferroviarios en el corredor es la apuesta que ha realizado la aerolínea de bajo coste Vueling con un fuerte incremento de sus frecuencias. Las tarifas habituales de esta compañía suponen rebajas de más del 60% en relación con los precios sin descuento de sus dos principales competidores: el AVE e Iberia.

Renfe asegura que el AVE alcanzó una cuota media de mercado del 48,2% frente al avión entre Madrid y Barcelona en su segundo año en operación. Señala también que en

los meses de julio, septiembre y diciembre superó la cuota del 50% en el corredor. Según los datos de la empresa que preside Teófilo Serrano, el perfil del viajero que opta por el AVE es el de un hombre (en el 61% de los casos), con una edad media de 44 años, en un 72% de los casos con estudios universitarios y que en el 61% de los supuestos se desplaza por motivos de trabajo. Además, el 40% de los viajeros se desplazan con frecuencia, esto es, al menos una vez cada dos semanas.

Iberia y Vueling se han hecho con el control de la ruta aérea de unión entre Madrid y Barcelona. La compañía que preside Antonio Vázquez ha realizado un gran esfuerzo en los últimos cuatro meses, y en el pasado enero consiguió una cuota del 24,3% en el corredor (cerca del 50% del tráfico aéreo), lo que supuso un crecimiento del 1,5% en relación al mes de diciembre y del 0,5 % comparado con el mismo mes de 2009. El pasado enero, Iberia superó a Spanair y a Air Europa en 17 puntos y a Vueling en 11 puntos, según las cifras que ofrece la compañía de bandera. Vueling ha sido la empresa que más ha crecido en el corredor al pasar del 17,3% del tráfico aéreo entre Madrid y Barcelona en el acumulado de 2008, al 23,5% en el acumulado de 2009. En febrero de 2008, cuando nació el AVE, Vueling tenía el 13% del mercado aéreo.

## 8 Escenarios posibles

En 2010 y 2011 se ha supuesto un crecimiento anual del tráfico avión + tren del 3.5%. Paulatinamente el avión perderá cuota de mercado y en 2010 el tren le habría superado. Según la presente estimación, en 2011 la cuota del avión habría bajado a una cifra cercana al 47% y la del tren subido a cerca del 53%.

Esta cuota de mercado del tren es más baja que si se toman como referencias los repartos modales en otras relaciones comparables, puesto que para un tiempo de viaje de 2h30', la cuota de del tren en el mercado tren + avión debería ser en torno al 80% (ver gráfico 4). Se ha estimado una cuota más baja para el tren fundamentalmente debido al servicio muy consolidado del puente aéreo, a la cercanía (y buena comunicación) de los aeropuertos a los centros urbanos, a la inusualmente alta proporción de viajes profesionales y a la existencia de un fuerte tráfico de enlace al "hub" de Barajas y El Prat. Estos factores sugieren que el avión podrá seguir ofreciendo suficientes frecuencias y precios atractivos.

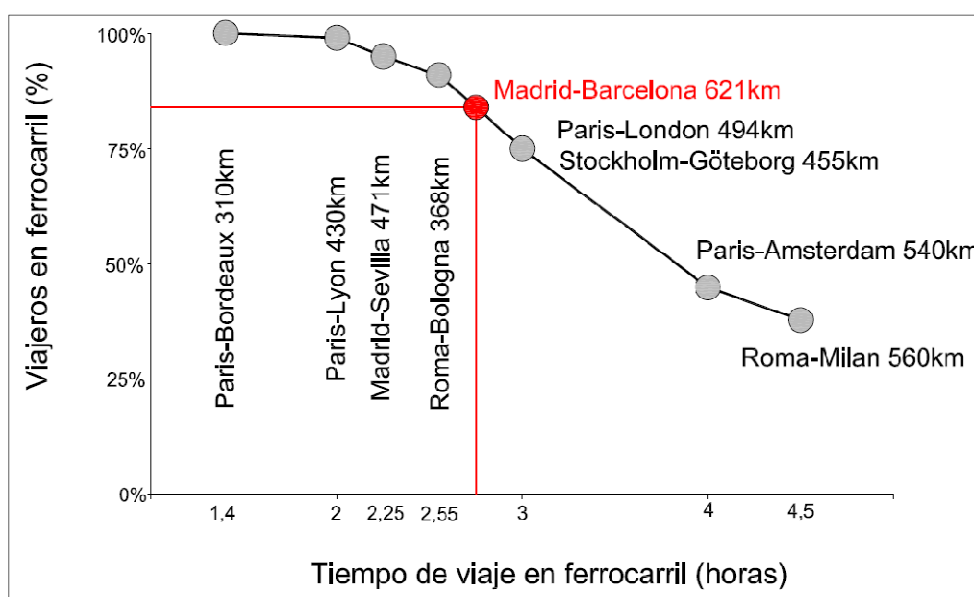


Gráfico 4. Elaboración propia

La estimación tiene en cuenta también la política comercial conservadora de Renfe, que parece perseguir una conquista relativamente lenta del mercado de viaje entre Madrid y Barcelona, consciente de que partía de una cuota de mercado anómalamente baja. Así, a la puesta en servicio el 20 de febrero de 2008, Renfe ofrecía 5999 y 7243 plazas diarias en trenes directos y con paradas, respectivamente el número de plazas se aumentó en abril de 2008.

Dependiendo de las políticas comerciales de Renfe y las compañías aéreas, el aumento de la cuota de mercado del tren puede ser más rápido y fuerte. En todo caso, las proyecciones sugieren que el tráfico aéreo entre Barcelona y Madrid seguirá siendo importante y se estabilizará en torno a los 3 millones de pasajeros al año. En especial, si Renfe decide adelantar la reducción de los tiempos de viaje a menos de 2h30, y/o tiene una política comercial más agresiva, la progresión de sus tráficos puede ser más rápida.

En 2010 entrará en vigor la liberalización del mercado ferroviario de pasajeros. Esta medida ya fue establecida por el *Parlamento Europeo* en 2005 pero entonces se decidió aplicarla sólo al transporte de mercancías, retrasando el de pasajeros a 2008. Ese año sufrió un nuevo aplazamiento hasta 2010, pero parece que ya no se prorrogará más.

En España empezará a funcionar para viajes internacionales. Sin embargo, para los nacionales aún habrá que aguardar hasta 2012, fecha que el Ministerio de Fomento calcula para poder aplicar la normativa europea. De hecho, ya funciona con mercancías y podría introducir todo un mercado *low cost* en el transporte ferroviario de pasajeros. Esto significa que al haber más competencia en el mercado ferroviario los precios podrán bajar considerablemente, haciendo que el reparto de viajeros del corredor varíe.

La previsión de Renfe antes de la puesta en servicio del AVE Madrid-Barcelona en 2008 fue la siguiente:

Los máximos responsables de Renfe explicaron las previsiones de demanda de viajeros en 2008 y hasta 2011: "Renfe espera transportar 6,1 millones de viajeros en 2008, lo que

supone multiplicar por tres los clientes registrados en 2004, que fueron un total de 2,1 millones. Asimismo, en el primer año de funcionamiento del servicio esperamos captar tres millones más de viajeros en esta relación, aproximadamente un 80 por ciento más respecto a los que utilizaron el tren en este corredor en 2007, que fueron de 3,4 millones de viajeros. Nuestras previsiones para 2011 alcanzan los 7,8 millones de clientes, lo que va a suponer multiplicar por cuatro la cifra de viajeros que utilizaron el tren en 2004".

La aerolínea de bajo coste Ryanair está diseñando una estrategia para entrar a competir en el puente aéreo con las tarifas más bajas del mercado. No es la única compañía con estos planes, pero el sector aéreo español está inquieto ante los movimientos de la aerolínea irlandesa, en el que compiten cuatro aerolíneas y el tren de alta velocidad entre Barcelona y Madrid.

Según fuentes del sector, Ryanair estudia competir con el resto de los operadores con la tarifa más baja, inferior a los cien euros ida y vuelta, con lo que podría arañar cuota de otros operadores e incluso captar nuevos viajeros que buscan precios más económicos a los actuales. La estrategia de la compañía de prescindir de los mostradores de facturación y de promocionar que sus usuarios viajen sin equipaje puede traducirse en una tarifa inferior a las de Vueling, que ofrece los precios más económicos.

## 9 Un modelo para conciliar previsión y realidad

Se considerará el AVE en dos partes, una será el directo con el precio del puente AVE y el otro con paradas con el precio turista que le corresponde. Haciéndolo de esta manera intentaremos abarcar la totalidad de viajeros que se desplazan en este medio de transporte. En realidad no hay sólo estas dos opciones pero cogiendo la más rápida y cara y la más lenta y barata el AVE recibirá el porcentaje de pasajeros que le toca.

Sólo se hará el estudio del reparto modal entre el avión y el AVE. Debido a la competencia que se ha establecido entre estos dos medios de transporte el coche seguramente perderá parte de sus usuarios habituales debido a mejores opciones por parte de los dos primeros. La porción de usuarios que ganará o perderá el coche se repartirá entre los dos medios, pero no la cantidad que se irá a uno u otro no es suficientemente significativa como para deberla estudiar.

En el corredor Madrid-Barcelona, de los cinco modos de transporte implicados (vehículo privado, autobús, ferrocarril convencional, AVE y avión), dos de ellos, una vez observada su evolución en el tiempo, no nos deben preocupar a efectos de previsión: ferrocarril convencional y autobús. Ambos han presentado una estabilidad en tarifas y tráfico muy elevada con gran independencia de los indicadores económicos nacionales.

### 9.1 Actualización de variables

En la tabla 9 se muestran las variables actualizadas al año 2010.

2010	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	110	182,3	114
Tiempo (min)	160	195	218	245
Frecuencia (i/v)	82	47	20	26

*Tabla 9. Elaboración propia*

Según los datos de Renfe, el perfil del viajero que opta por el AVE para realizar este trayecto es el de un hombre (en el 61% de los casos), con una edad media de 44 años, en un 72% de los casos con estudios universitarios y que en el 61% de los supuestos se desplaza por motivos de trabajo. Además, el 40% de los viajeros se desplazan con frecuencia, esto es, al menos una vez cada dos semanas.

### **9.1.1 Tiempo**

Los usuarios que viajen en avión deberán desplazarse hasta el aeropuerto y realizar todos los trámites necesarios de facturación, control de policía y embarque antes de poder empezar su viaje. Al llegar al aeropuerto de destino también deberán realizar una serie de gestiones (desembarcar, esperar el equipaje...).

Ni Adif, el dueño de la infraestructura ferroviaria entre Madrid y Barcelona, ni Renfe, han decidido todavía cuando elevarán hasta 350 kilómetros por hora la velocidad punta de sus servicios de AVE. Ahora el tren circula como máximo a 300 kilómetros por hora y, en el mejor de los supuestos, invierte 158 minutos en cubrir el recorrido. Los cálculos iniciales para la explotación ferroviaria en el corredor señalaban que el tren de alta velocidad lograra un tiempo de viaje en el entorno de los 130 minutos. En este caso, su cuota de mercado podría incrementarse entre 10 y quince puntos en detrimento del avión. La posibilidad de incrementar la velocidad del AVE depende de la puesta a punto del nivel dos de la señalización y del sistema de seguridad ERTMS que aún está en pruebas.

Por otra parte, el hecho de que Iberia haya trasladado toda su operativa del puente aéreo en el aeropuerto de El Prat a la nueva Terminal 1 le permite reducir el tiempo de vuelo en más de diez minutos, ya que este edificio está más próximo a las pistas que la terminal antigua. Con el traslado, el tiempo de vuelo total en cubrir el trayecto, que hasta antes se estimaba en 55 minutos, se reducirá sensiblemente, lo que ayudará a Iberia a atraer a más clientes. La aerolínea también contará con una zona exclusiva de embarque en El Prat como tiene actualmente en la T4 de Madrid.



### **9.1.2 Precio**

Mientras la compañía valora positivamente el global de viajeros que mueve el corredor Madrid-Zaragoza-Barcelona (5,1 millones), la cuota de mercado que le está restando al avión, el índice de puntualidad del 98,5% que ha obtenido, o que "más de dos millones de clientes", el 38,2% del total, han viajado con tarifas promocionales web (1.151.036 personas se beneficiaron del 60% de descuento) o estrella (1.025.000 pagaron un 40% menos) o el incremento del número de usuarios que usa internet como canal de compra (un 30,8%).

Un porcentaje importante de los viajeros de puente aéreo es la empresa privada o la Administración Pública la que corre con los gastos del billete, con lo cual la bajada de tarifa frente al avión, que propone la alta velocidad no será determinante para el reparto modal.

### **9.1.3 Frecuencia**

La entrada del tren en este mercado se ha dejado notar también en la oferta del puente aéreo: al reducirse la demanda se han reducido también las plazas y esto puede significar una larga espera en el aeropuerto para embarcar en la siguiente plaza disponible.

Iberia ha reducido su oferta un 20,3% en el Puente Aéreo entre Madrid y Barcelona por la llegada de la alta velocidad entre ambas ciudades desde el pasado 20 de febrero, señaló hoy la empresa en la presentación de sus resultados correspondientes al primer semestre del año.

Esta capacidad ha sido reducida sin modificar el número de frecuencias, empleando aviones de menor tamaño, algo que fue anunciado por el presidente de la línea aérea, Fernando Conte, en el momento de la inauguración de ese nuevo trayecto ferroviario.

## 9.2 Modelo Precio-Tiempo

A continuación se detalla el modelo desarrollado que, una vez calibrado, servirá para predecir cómo variará la distribución modal en el futuro en diferentes escenarios posibles.

Se trata de un modelo precio-tiempo, así que, introduciendo únicamente el precio y el tiempo que se necesita para moverse de un punto a otro con cada medio de transporte que interese estudiarse, el modelo calcula su distribución modal.

Al no disponer de encuestas actuales con las que poder trabajar a nivel estadístico para poder calcular las variables de trabajo se ha optado por realizar el estudio a partir de los datos reales que se han obtenido del corredor Madrid-Barcelona.

La técnica de cálculo utilizada se basa en una teoría incremental, es decir, se utilizan los datos del año anterior para predecir los del año siguiente. Así, como se dispone de la distribución modal del año 2010 (se ha supuesto que los datos del primer trimestre del año se mantendrán hasta el final del mismo), se utilizarán estos valores para establecer una posible distribución modal para el año 2011.

A continuación se detallan las fórmulas utilizadas para los cálculos (ver capítulo 1-5.6 para más información):

$$C_g = P + v \cdot T \quad (22)$$

A partir de los costes generalizados ( $C_g$ ) de 2010 y 2011 y los usuarios ( $U$ ) de cada medio de transporte de 2010 se puede calcular la distribución modal para el año 2011 (López-Pita 2005):

$$U_{2011} - U_{2010} = -\gamma \frac{C_{g2011} - C_{g2010}}{C_{g2011}} \quad (23)$$

El único problema que se tiene para realizar el cálculo anterior es la obtención de los valores de tiempo ( $v$ ) que cada usuario asocia a cada medio de transporte. Para calcular los valores de tiempo de la forma más realista posible se ha optado por utilizar la ecuación (23) para los años 2008, 2009 y 2010; de los que sí se dispone de todos los valores excepto los valores de tiempo, como puede apreciarse en la Tabla 10.

		Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
2008	Precio (€)	205	110	163,5	102,1
	Tiempo (min)	160	195	218	245
	Frecuencia (i/v)	82	47	18	22
2009	Precio (€)	205	110	172,9	108,05
	Tiempo (min)	160	195	218	245
	Frecuencia (i/v)	82	47	18	22
2010	Precio (€)	133	110	182,3	114
	Tiempo (min)	160	195	218	245
	Frecuencia (i/v)	82	47	20	26

*Tabla 10. Elaboración propia*

Se hará el estudio únicamente del avión y el tren de alta velocidad, separándose cada uno en dos. Por una parte el avión se separará en puente aéreo y avión convencional. El primero se asociará a viajes de trabajo mientras que el segundo a viajes de placer. Por otra parte, el tren de alta velocidad se separará en Puente AVE y AVE convencional. El primero se considerará a los trenes sin paradas entre Madrid y Barcelona y se asociará a los viajes de trabajo, mientras que el AVE convencional acogerá a los trenes con paradas y viajes de placer. Estas separaciones, aunque no se asemejan totalmente a la realidad, intentan abarcar todo el abanico de posibilidades que se tienen de viajar entre las dos ciudades con estos dos modos de transporte.

La frecuencia se utilizará para ponderar cualquier valor que se obtenga entre las subdivisiones de los dos medios de transporte.

Cabe mencionar que en ningún caso se estudia la incorporación de nuevos viajeros en el corredor, que podrían hacer que los valores de reparto modal variaran.

### 9.2.1 Hipótesis 1

Esta primera hipótesis considera el caso en el que el avión y el tren de alta velocidad se subdividen en dos como se ha explicado en el apartado anterior.

Para los cálculos de la ecuación (23) se utilizarán los siguientes valores:

$\gamma = 1,9$  para viajes de trabajo y  $\gamma = 1,6$  para viajes de placer (López-Pita 2005).

A parte, mediante los datos de años anteriores (para los cálculos en MATLAB ver anexo) se han obtenido unos valores de tiempo que permiten obtener unos valores que se asemejan a la realidad utilizando los datos de precio y tiempo verdaderos (ver tabla 11):

Hipótesis 1	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Valor de tiempo (€h)	50	34	50	28

Tabla 11. Elaboración propia

### 9.2.2 Hipótesis 2

En esta segunda hipótesis se han juntado las subdivisiones anteriores para obtener resultados directamente para cada uno de los dos medios de transporte.

Para obtener datos de precios y tiempos que se puedan utilizar como media total del medio de transporte se han ponderado los datos de las cuatro subdivisiones anteriores con la frecuencia de cada uno de ellos, suponiendo que la frecuencia de los diferentes modos tiene una correlación con el número de pasajeros.

Los datos con los que se ha trabajado también han sido ponderados según la frecuencia de viajes y son los siguientes (valores de tiempo también calculados a partir de datos de años anteriores) (ver tabla 12):

$$\gamma = 1,75$$

Hipótesis 1	Avión	AVE
Valor de tiempo (€/h)	43	37

Tabla 12. Elaboración propia

### 9.2.3 Escenarios considerados

En cada una de las dos hipótesis se han considerado 6 escenarios de trabajo diferentes, los cuales muestran de qué forma se distribuirían los viajeros entre los dos medios de transporte según las estrategias seguidas por las compañías aéreas y RENFE.

#### 9.2.3.1 Escenario 1: Sin cambios

Se considera qué distribución modal habrá en 2011 si las políticas de las compañías de transporte no varían.

#### 9.2.3.2 Escenario 2: Efecto Ryanair

En este caso se estudia qué cambios provocaría la bajada significativa de precios del avión convencional, que podría ocasionarse en el supuesto de que una compañía de bajo coste decidiera competir en el corredor. De hecho, Ryanair empezará a operar en El Prat a partir de septiembre de 2010 y, aunque todavía no ha anunciado que vaya a conectar Barcelona y Madrid, hay muchas posibilidades de que lo haga.

#### 9.2.3.3 Escenario 3: Mejora tiempo de viaje del AVE

El AVE Madrid-Barcelona todavía no ha alcanzado su velocidad máxima, así que todavía es posible reducir el tiempo de viaje entre las dos ciudades. Si RENFE utilizara

recursos para conseguir que así fuera podría atraer viajeros. La posibilidad de incrementar la velocidad del AVE depende de la puesta a punto del nivel dos de la señalización y del sistema de seguridad ERTMS que aún está en pruebas.

#### *9.2.3.4 Escenario 4: Bajada de precios del AVE*

Este escenario contempla la posibilidad de bajar los precios del tren de alta velocidad y las consecuencias que eso tendría en el reparto modal. Se podría estudiar si el AVE se encuentra en el punto de máximo beneficio en cuanto a la relación precio-nº de viajeros.

#### *9.2.3.5 Escenario 5: Combinación escenarios 3 y 4*

Este caso analiza qué ocurriría si Renfe decide adoptar una política agresiva de atracción de clientes bajando los precios del billete y, al mismo tiempo, reduciendo el tiempo de viaje entre Madrid y Barcelona.

#### *9.2.3.6 Escenario 6: Combinación escenarios 2 y 5*

Este último escenario estudia el reparto modal en el caso en que se bajaran los precios del avión convencional y, a la vez, Renfe optara por abaratar el precio por pasajero y reducir el tiempo de viaje.

### 9.2.4 Resultados

A continuación se expondrán todos los resultados obtenidos en los 6 escenarios utilizados para cada una de las 2 hipótesis.

#### Hipótesis 1, ESCENARIO 1

	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	110	182,5	114
Tiempo (min)	160	195	218	245
Porcentaje de pasajeros	31,59%	18,11%	21,87%	28,43%
Porcentaje por modo	<b>49,70%</b>		<b>50,30%</b>	

Tabla 13. Elaboración propia

#### Hipótesis 1, ESCENARIO 2

	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	90	182,5	114
Tiempo (min)	160	195	218	245
Porcentaje de pasajeros	30,39%	20,19%	21,48%	27,94%
Porcentaje por modo	<b>50,58%</b>		<b>49,42%</b>	

Tabla 14. Elaboración propia

#### Hipótesis 1, ESCENARIO 3

	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	110	182,5	114
Tiempo (min)	160	195	200	230
Porcentaje de pasajeros	30,27%	17,34%	23,15%	29,24%
Porcentaje por modo	<b>47,62%</b>		<b>52,38%</b>	

Tabla 15. Elaboración propia

**Hipótesis 1, ESCENARIO 4**

	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	110	172,5	100
Tiempo (min)	160	195	218	245
Porcentaje de pasajeros	30,00%	17,19%	22,35%	30,46%
Porcentaje por modo	<b>47,19%</b>		<b>52,81%</b>	

Tabla 16. Elaboración propia

**Hipótesis 1, ESCENARIO 5**

	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	110	172,5	100
Tiempo (min)	160	195	200	230
Porcentaje de pasajeros	29,01%	16,62%	23,38%	30,99%
Porcentaje por modo	<b>45,63%</b>		<b>54,37%</b>	

Tabla 17. Elaboración propia

**Hipótesis 1, ESCENARIO 6**

	Puente Aéreo	Avión	Puente AVE	AVE
Precio (€)	133	90	172,5	100
Tiempo (min)	160	195	200	230
Porcentaje de pasajeros	28,26%	18,78%	22,78%	30,19%
Porcentaje por modo	<b>47,03%</b>		<b>52,97%</b>	

Tabla 18. Elaboración propia

**Hipótesis 2, ESCENARIO 1**

	Avión	AVE
Precio (€)	124,62	143,78
Tiempo (min)	173	233
Porcentaje por modo	<b>49,70%</b>	<b>50,30%</b>

Tabla 19. Elaboración propia



**Hipótesis 2, ESCENARIO 2**

	Avión	AVE
Precio (€)	112,16	143,78
Tiempo (min)	173	233
Porcentaje por modo	<b>51,38%</b>	<b>48,62%</b>

Tabla 20. Elaboración propia

**Hipótesis 2, ESCENARIO 3**

	Avión	AVE
Precio (€)	124,62	143,78
Tiempo (min)	173	217
Porcentaje por modo	<b>47,63%</b>	<b>52,37%</b>

Tabla 21. Elaboración propia

**Hipótesis 2, ESCENARIO 4**

	Avión	AVE
Precio (€)	124,62	129,4
Tiempo (min)	173	233
Porcentaje por modo	<b>46,97%</b>	<b>53,03%</b>

Tabla 22. Elaboración propia

**Hipótesis 2, ESCENARIO 5**

	Avión	AVE
Precio (€)	124,62	129,4
Tiempo (min)	173	217
Porcentaje por modo	<b>45,41%</b>	<b>54,59%</b>

Tabla 23. Elaboración propia

**Hipótesis 2, ESCENARIO 6**

	Avión	AVE
Precio (€)	112,16	129,4
Tiempo (min)	173	217
Porcentaje por modo	<b>47,61%</b>	<b>52,39%</b>

Tabla 24. Elaboración propia

### 9.3 Comparación entre los modelos anteriores y la realidad

Primero de todo, cabe mencionar que los tres estudios que se analizarán a continuación, que han sido explicados en profundidad en el capítulo 2-1, se realizaron años antes de la puesta en marcha del tren de alta velocidad en el corredor Madrid-Barcelona. Por este motivo, el primer paso a estudiar es si la elección de las variables de precio y tiempo fueron acertadas. Para este análisis se utilizarán los datos reales del año 2010, ya que el primer año y medio de servicio del AVE (a partir de febrero de 2008) se puede considerar de adaptación, y los valores de distribución modal para esas fechas no son representativos como para poderlos comparar con estudios de reparto modal.

Como se puede apreciar en la Tabla 25, los datos utilizados en los 3 estudios distan bastante de la realidad.

		Datos reales (2010)		Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	
Precio (€)	AVIÓN	Puente Aéreo	133	124,62	96,16	78	90
		Avión convencional	110		-		
	AVE	Puente AVE	182,5	143,78	63,83	69	75
		AVE convencional	114				
Tiempo (min)	AVIÓN	Puente Aéreo	160	173	140	135	170*
		Avión convencional	195		-		
	AVE	Puente AVE	218	233	225	195	230*
		AVE convencional	245		-		

(\*) Valores aproximados al valor real por no tener información al respecto

Tabla 25.

Elaboración propia

Un dato a considerar es que, en los 3 estudios, se ha establecido un precio del billete más caro al avión que al tren de alta velocidad y en la realidad sucede todo lo contrario.

En el Estudio 1 (B. Guirao 2000), el precio del puente aéreo es de 96,16€ diferenciándose en un 30% de su valor en 2010. En el caso del AVE la diferencia es más acentuada si cabe, separándose más de un 50% de la realidad. Uno de los motivos de la poca capacidad de acercarse a la realidad puede haber sido la implantación del euro en España y la inflación de precios que esto ha supuesto.

El tiempo, por su parte, ha sido considerado únicamente para los viajes más rápidos posibles, que son el puente aéreo y el AVE sin paradas. Además, el tiempo de viaje del AVE utilizado en el estudio es de 150 minutos, y ese tiempo todavía no se ha alcanzado en la actualidad. Aún así, los tiempos considerados se asemejan bastante a los utilizados en el capítulo 2-4.2 (es decir, se parecen a la realidad actual). La diferencia en el avión es de 20 minutos, mientras que en el AVE solamente es de 7 minutos.

En el Estudio 2 (González-Savignat 2000) el precio del avión se ha considerado un 40% más barato mientras que el del AVE es un 50% más económico. La diferencia se asemeja bastante a la del estudio anterior, cosa que podría intentar explicarse debido a que los dos estudios se realizaron el mismo año.

El tiempo es aproximadamente un 20% inferior tanto para el avión como para el tren. Si comparamos la relación entre el tiempo del avión y el AVE en la realidad y en el Estudio 2, se observa que en la realidad, el cociente entre el tiempo del AVE y el del avión es de 1,35, mientras que en el estudio es de 1,44 (solamente un 6% mayor).

En el Estudio 3 (López-Pita 2005) la relación entre el precio del avión y el del AVE es similar al Estudio 2. El avión es un 30% más barato y el AVE un 50%. El tiempo en este estudio no ha podido ser localizado, por lo que para los siguientes apartados se utilizará un valor similar al de la realidad.

A continuación se analizarán los resultados de reparto modal en los 3 estudios comparándose con la realidad.

			Datos reales	Estudio 1	Estudio 3
<b>Distribución modal</b>	<b>Avión</b>	Puente aéreo	49,7%	45,0%	36,5%
		Avión convencional			
	<b>AVE</b>	Puente AVE	50,3%	55,0%	63,5%
		AVE convencional			

*Tabla 26. Elaboración propia*

Se puede observar que tanto el Estudio 1 como el 3 subestiman la capacidad del avión para retener a sus usuarios tras la implantación del tren de alta velocidad en el corredor Madrid-Barcelona. Aún así, se sabe que en el 2011 seguramente el AVE sea capaz de atraer uno o dos puntos porcentuales a su favor, así que el Estudio 1 se acercaría mucho a la realidad.

El Estudio 2 deberá ser analizado a parte ya que los datos que obtiene son diferentes a los otros dos estudios: analiza el reparto modal separadamente según si el viaje es de trabajo o de placer.

En la Tabla 27 se puede observar el nivel de precisión de la predicción del Estudio 2. Ya se ha mencionado con anterioridad que los valores de partida del estudio, como en los otros dos, no se acercan demasiado a la realidad. Aún así, este estudio es capaz de predecir el reparto modal según el motivo de viaje de una forma muy correcta.

		Datos reales (2010)	Estudio 2	
Distribución modal	Trabajo	Avión	59%*	61%
		AVE	41%*	39%
	Placer	Avión	39%*	42%
		AVE	61%*	58%

(\*) Datos obtenidos a partir de la hipótesis 1 del modelo precio-tiempo y ponderados según la frecuencia de viajes de los modos.

Tabla 27. Elaboración propia

### 9.4 Modelo Precio-Tiempo partiendo de los 3 estudios

Se han insertado los valores de precio y tiempo de los 3 estudios analizados en el modelo precio-tiempo desarrollado (capítulo 2-4.2). Los resultados que se obtengan podrán ser directamente comparados unos con otros para ver hasta qué punto los datos de partida eran o no erróneos en cada uno de los estudios.

La Tabla 28 muestra la distribución modal que se obtiene utilizando el modelo precio-tiempo con los valores de tiempo ( $v$ ) que se calibraron en el capítulo 2-4.2 basándose en los datos reales (ver anexo).

			Datos reales	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3
<b>Distribución modal</b>	<b>Avión</b>	Puente aéreo	49,7%	36,4%	46,8%	44,5%
		Avión convencional				
	<b>AVE</b>	Puente AVE	50,3%	63,6%	53,2%	55,5%
		AVE convencional				

Tabla 28. Elaboración propia

El Estudio 1 es el que menos se acerca a la realidad. Esto es debido a que los datos de partida (ver Tabla 25) no son compatibles con las hipótesis utilizadas en el modelo realizado. En éste, los valores de precio y tiempo se deben dar o para el medio de transporte en general o separadamente un valor para los viajes de trabajo (puente aéreo y puente AVE) y otro para los de placer (avión y AVE convencionales). El Estudio 1 solamente trabaja con el puente aéreo y el tren de alta velocidad sin paradas, cosa que hace que los resultados obtenidos en este capítulo no sean demasiado relevantes para este estudio concreto.

Utilizando el modelo desarrollado con anterioridad, los estudios 2 y 3 obtienen unos resultados que se asemejan bastante a la realidad.

El Estudio 2 sólo se aleja un 5% del valor de distribución modal para 2010. Sabiendo que el AVE casi seguro que ganará pasajeros al avión durante el año 2011, esta diferencia se podría ver rebajada. Por lo tanto, si se hubiera utilizado el valor de tiempo correcto, este estudio podría haber predicho el reparto modal con bastante exactitud 10 años antes de que se diera.

El Estudio 3 es el que más se asemeja al modelo precio-tiempo desarrollado en la tesina. Por este motivo, la comparación de los repartos modales mediante los dos métodos de cálculos es relevante. La distribución modal en este caso tiene un error de un 10% cuando se modela con el valor de tiempo adecuado para el corredor Madrid-Barcelona (que ha sido calculado en el capítulo 2-4.2), mientras que el error es de un 25% en los cálculos realizados en el Estudio 3.

## 10 Conclusiones

En primer lugar, es necesario diferenciar los estudios de previsión realizados antes de la puesta en servicio de un medio de transporte y después. No es lo mismo intentar predecir cómo se distribuirán los viajeros en un corredor con la introducción de un nuevo medio de transporte que, por el contrario, predecir la distribución modal en años venideros en un corredor donde ya están en funcionamiento todos los medios de transporte.

Antes de la puesta en servicio de un medio de transporte, como era el caso del tren de alta velocidad entre Madrid y Barcelona antes de 2008, hay muchas incertidumbres que deben ser aproximadas para poder modelar el reparto modal. Por ejemplo, es muy difícil avanzar a acontecimientos como podrían ser las políticas adoptadas por las compañías que gestionan el transporte o, por poner otro ejemplo, cómo variará la economía del país: nadie podía predecir que en el año 2010 todo el mundo, y España en particular, estaría atravesando una crisis financiera después de tantos años de crecimiento económico. Es obvio que el número de personas que viajarán en uno u otro medio de transporte depende directamente de la capacidad de predecir estos hechos.

Para poder realizar una buena aproximación de la distribución modal la correcta elección de las variables es clave. Para estudios realizados antes de la puesta en servicio la mejor opción es realizar encuestas detalladas a todos los tipos de viajeros potenciales del nuevo medio de transporte (usuarios que ya viajan entre las dos ciudades y personas que antes no viajaban y debido a la introducción de este nuevo medio pasarán a hacerlo). Estas encuestas permiten utilizar variables aleatorias para el cálculo del reparto modal. El cálculo del reparto mediante variables aleatorias puede hacerse mediante varios modelos. En la actualidad, el modelo logit mixto parece ser la opción que se comporta mejor para este tipo de cálculos.

Para predecir la distribución modal en corredores donde todos los medios de transporte ya están en funcionamiento, como es el caso del corredor Madrid-Barcelona, el modelo



precio-tiempo propuesto en la tesina puede ser una buena opción. Éste es capaz de modelar cómo cambiaría la distribución según vayan adoptando diferentes políticas de atracción de viajeros las empresas que gestionan los medios de transporte. Es decir, puede modelar cambios en el precio, el tiempo de viaje y la frecuencia de cada medio de transporte prediciendo qué sucederá al cambiar una o más de esas variables. Este modelo es de fácil aplicación y puede ser muy útil para hacer análisis de mercado, es decir, para saber si sale económicamente rentable a una compañía como podría ser Iberia o Renfe variar sus precios u otras variables. Podría ocurrir que, al bajar el precio del billete, el número de pasajeros crezca considerablemente y eso conlleve a obtener ganancias a la larga.

Otro punto a tener en cuenta es el valor añadido que se le puede dar a un medio de transporte. En el corredor Madrid-Barcelona el avión tiene los precios del billete inferiores a los del AVE y el tiempo total de viaje entre una ciudad y otra también es inferior en el transporte aéreo. Pese a eso y contrariamente a lo que se podría pensar, es el tren de alta velocidad el que transporta un mayor número de viajeros. La única explicación que se le puede dar a este fenómeno es el valor añadido que el tren de alta velocidad ha sido capaz de implantar en su medio de transporte. Factores como la puntualidad, la comodidad, y tener la estación de partida en el centro de la ciudad tanto de origen como de destino, hacen que el precio dispuesto a pagar por el tren por determinados usuarios sea más alto. Si se analiza según el motivo del viaje, el 60% de las personas que viajan por motivos de trabajo actualmente prefiere hacerlo en AVE, frente al 40% que se desplaza en Puente Aéreo. El hecho de poder “seguir trabajando” mientras se viaja, pudiendo estar conectado a internet y utilizar el teléfono y el ordenador seguramente es un factor a tener en cuenta por muchos de los que se desplazan por motivos de trabajo. Si el viaje se realiza por motivos de placer las tornas se cambian, pasando a ser el avión el que prefieren un 60% de los viajeros frente al 40% del AVE. Este factor puede basarse principalmente en los precios y tiempos más bajos y a que no realizan el viaje con mucha frecuencia, cosa que hace que la comodidad de

viaje y todos los valores añadidos de los que se ha hablado anteriormente pierdan un poco de sentido.

Los estudios que se realizaron con anterioridad que han sido analizados en esta tesina no fueron capaces de predecir los valores de precio y tiempo que se utilizarían en el corredor. Especialmente el precio del billete, que fue elegido muy a la baja y, sobretodo, se supuso que el avión sería más caro que el AVE y ha sucedido justo al contrario. Incluso sabiendo que los datos de partida de los estudios no son correctos, no puede decirse que los resultados obtenidos por estos no sean razonables. Todos predecían que el AVE transportaría un mayor número de viajeros que el avión, y que lo haría con unos porcentajes no tan abultados como lo había hecho en otros corredores similares en otros lugares de Europa debido al gran número de vuelos diarios entre las dos ciudades.

## 11 Futuros desarrollos

Uno de los grandes retos en cuanto al cálculo de la distribución modal consiste en poder modelizar condiciones que todavía no se han dado, como por ejemplo la introducción de un nuevo modo de transporte entre dos puntos del territorio. Para realizar este cálculo podría utilizarse un modelo logit mixto que, basándose en encuestas realizadas a viajeros potenciales, posiblemente conseguiría modelizar de forma más exacta el suceso. Para poder efectuar esta modelización la obtención de encuestas es crucial.

La necesidad de realizar mayor número de encuestas de movilidad en nuestro país era una de las conclusiones que se proponían para mejorar la calibración de los modelos. El distinto comportamiento de los flujos en fines de semana (sobre todo en relaciones interurbanas) planteaba la exigencia de acompañar la encuesta en día laborable con encuestas adicionales en el período de fin de semana (viernes, sábado y domingo), sobre todo cuando se quiere trabajar con un valor de tráfico medio anual. Se desconoce, a día de hoy, si la inversión económica suplementaria destinada a realizar dichas encuestas, proporcionaría mejoras notables en la estimación de los tráficos.

Estudiar en profundidad el valor añadido que se puede dar a los medios de transporte. La comodidad (butacas más cómodas, conexión a internet, poder utilizar el teléfono móvil...) y la puntualidad entre otras hacen que un medio de transporte pueda ser más caro o tardar más y, aún así, ser el elegido por el viajero. Intentar introducir todas estas variables en los modelos.

Por último, podría investigarse el aspecto ambiental, pudiéndose estudiar la repercusión que el hecho de viajar en uno u otro modo tiene en el medio ambiente. En alta velocidad es difícilmente cuestionable, pero en carreteras urbanas ello nos conduciría a un problema complejo con importantes repercusiones políticas sobre la decisión y necesidad de construir nuevas infraestructuras.

## 12 Bibliografía

Álvarez, R. y Munizaga, M.A. (2002), Modelación flexible de elecciones discretas: una revisión crítica. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Casilla 228-3, Santiago, Chile.

Bates, J. (1988), Papers on Stated Preference Methods in Transport Research. Journal of Transport Economics and Policy, volumen I.

Ben-Akiva, M. y Lerman, S. R. (1985), Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand, The MIT Press. ISBN-10:0-262-02217-6

Bolduc, D. (1992), Generalized autoregressive error in the multinomial probit model. Transportation Research 26B, 155-170.

Buckeye, K.R.(1992) Implications of high-speed rail on Air Traffic. Transportation Research Record.no 1341. Washington, D.C.

Bunch, D.S. (1990), Estimability in the Multinomial Probit model. Graduate School of Management, University of California, Davis, Davis, CA 95616, U.S.A.

González-Savignat, M. (2000), Preferencias declaradas con diseño de experimentos: una aplicación al tren de alta velocidad, Tesis Doctoral, Universidad de Vigo.

Guirao, B. (2000), El cálculo del tráfico inducido como herramienta en la planificación de infraestructuras de transporte. Aplicación a la puesta en servicio de las nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad en España, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

Hensher, D.A., Barnard, P.O. and Truong, T.P. (1988): “The Role of Stated Preference Methods in Studies of Travel Choice”. *Journal of Transport Economics and Policy*, vol 22-1.

Maldonado, J.L. (1992), Curso sobre tráfico urbano. Modelos de transporte. Artículo realizado por Tema Grupo Consultor, S.A.

McFadden, D. (1981), Econometric Models of Probabilistic Choice. In: Manski, C., McFadden, D. (Eds.), *Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications*. MIT Press, Cambridge, MA, pp. 199–272.

Montero, L. y Codina, E. (2009), Modelos avançats de demanda de transport. Apuntes departament de estadística e investigació operativa, UPC.

Leurent, F., (1993). Cost versus time equilibrium over a network, *European Journal of Operational Research*, Elsevier, vol. 71(2), pages 205-221, December.

López-Pita, A. (2001). Railway and plane in the European transport system. CENIT, Ediciones UPC. ISBN 84.8301-650-8: 102.

López-Pita, A., y Robusté. F. (2003). The Madrid–Barcelona high-speed line. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 156: 3–8.

López-Pita A. y Robusté F. (2005), Impact of high-speed lines in relation to very high frequency air services. *Journal of Public Transportation*, Vol. 8, No. 2, 2005.

Orro, A. y García, F. (2004), Modelos logit mixto para la elección modal. Posibilidades y precauciones. En E. LARRODÉ y L. CASTEJÓN (eds.) *Infraestructuras de Transporte y Logística como Motor de Desarrollo de las Regiones Europeas*. Actas del VI Congreso de Ingeniería del Transporte, CIT 2004, Zaragoza. 727-734.

Orro, A. (2005) Modelos de elección discreta en transportes con coeficientes aleatorios, Tesis doctoral, Universidad de La Coruña.

Ortúzar, J. de D. y L. G. Willumsen (2001) Modelling Transport Third Edition, John Wiley and Sons, Ltd., West Sussex, England.

Ortúzar, J. de D. (2009), Estimating individual preferences with flexible discrete-choice-models. Food Quality and Preference. Elsevier.

Robusté, F. y Estrada M. (2007), Apunts Transports 2. Departamento de infraestructura del transporte y del territorio, UPC.

Sánchez Márquez, M. (1995). Avión versus tren de alta velocidad. Asociación Española del Transporte. Jomadas "Avión-Tren de alta velocidad: complementariedad o competencia".

Train, K. (2003) Discrete Choice Methods with Simulation, Cambridge University Press, Cambridge.

## 13 Anexo

### 13.1 Código de MATLAB

#### 13.1.1 Hipótesis 1

```
%Hipótesis 1: 4 modos diferentes:
%
% (1):Puente Aéreo
% (2):Avión convencional
% (3):Puente AVE
% (2):AVE convencional (con paradas)
clear all
%Variables:
Gt=1.9; %Gamma viaje de TRABAJO
Gv=1.6; %Gamma viaje de PLACER
B=0.9;
% Datos 2008:
%(P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM0=6295011;
POBB0=5274115;
PIB0=1088502000000;
P01=205;
P02=110;
P03=163.5;
P04=102;
T01=165/60;
T02=195/60;
T03=218/60;
T04=245/60;
U01=2549276;
U02=1461651;
U03=964749;
U04=1179138;
% Datos 2009:
%(P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM1=6295011;
POBB1=5345603;
PIB1=1051151000000;
P11=205;
P12=110;
P13=173;
P14=108;
T11=160/60;
T12=195/60;
T13=218/60;
T14=245/60;
U11=1970714;
U12=1129286;
U13=1260000;
U14=1540000;
% Datos 2010:
%(P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM2=6295050;
POBB2=5305455;
PIB2=1051151000000;
```

```

P21=133;
P22=110;
P23=182.5;
P24=114;
T21=160/60;
T22=195/60;
T23=218/60;
T24=245/60;
U21=1875402;
U22=1074598;
U23=1325911;
U24=1724089;

% Cálculo valores de tiempo
%v1A=(-1)*(((P11-P01)+(U11-U01)/Gt)*P01)/((T01-T11)-((U11-U01)/Gt)*T01));
%v1B=(-1)*(((P21-P11)+(U21-U11)/Gt)*P11)/((T11-T21)-((U21-U11)/Gt)*T11));

%v2A=(-1)*(((P12-P02)+(U12-U02)/Gv)*P02)/((T02-T12)-((U12-U02)/Gv)*T02));
%v2B=(-1)*(((P22-P12)+(U22-U12)/Gv)*P12)/((T12-T22)-((U22-U12)/Gv)*T12));

%v3A=(-1)*(((P13-P03)+(U13-U03)/Gt)*P03)/((T03-T13)-((U13-U03)/Gt)*T03));
%v3B=(-1)*(((P23-P13)+(U23-U13)/Gt)*P13)/((T13-T23)-((U23-U13)/Gt)*T13));

%v4A=(-1)*(((P14-P04)+(U14-U04)/Gv)*P04)/((T04-T14)-((U14-U04)/Gv)*T04));
%v4B=(-1)*(((P24-P14)+(U24-U14)/Gv)*P14)/((T14-T24)-((U24-U14)/Gv)*T14));

v1A=(-1)*(((P11-P01)+(U11-U01)/Gt)*P11)/((T01-T11)-((U11-U01)/Gt)*T11));
v1B=(-1)*(((P21-P11)+(U21-U11)/Gt)*P21)/((T11-T21)-((U21-U11)/Gt)*T21));

v2A=(-1)*(((P12-P02)+(U12-U02)/Gv)*P12)/((T02-T12)-((U12-U02)/Gv)*T12));
v2B=(-1)*(((P22-P12)+(U22-U12)/Gv)*P22)/((T12-T22)-((U22-U12)/Gv)*T22));

v3A=(-1)*(((P13-P03)+(U13-U03)/Gt)*P13)/((T03-T13)-((U13-U03)/Gt)*T13));
v3B=(-1)*(((P23-P13)+(U23-U13)/Gt)*P23)/((T13-T23)-((U23-U13)/Gt)*T23));

v4A=(-1)*(((P14-P04)+(U14-U04)/Gv)*P14)/((T04-T14)-((U14-U04)/Gv)*T14));
v4B=(-1)*(((P24-P14)+(U24-U14)/Gv)*P24)/((T14-T24)-((U24-U14)/Gv)*T24));

%Predicción para 2011-----

% Datos 2011 ESCENARIO 1: SIN CAMBIOS
%(P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM3=6285785;
POBB3=5266086;
PIB3=1043761408470;
P31=133;
P32=110;
P33=182.5;
P34=114;
T31=160/60;
T32=195/60;
T33=218/60;
T34=245/60;
U31=6200000*0.3007;
U32=6200000*0.1723;
U33=6200000*0.2291;
U34=6200000*0.2979;
PU31=30.07;

```



```

PU32=17.23;
PU33=22.91;
PU34=29.79;
U3=U31+U32+U33+U34;

%v1C=(-1)*(((P31-P21)+((U31-U21)/Gt)*P21)/((T21-T31)-((U31-U21)/Gt)*T21));
%v2C=(-1)*(((P32-P22)+((U32-U22)/Gv)*P22)/((T22-T32)-((U32-U22)/Gv)*T22));
%v3C=(-1)*(((P33-P23)+((U33-U23)/Gt)*P23)/((T23-T33)-((U33-U23)/Gt)*T23));
%v4C=(-1)*(((P34-P24)+((U34-U24)/Gv)*P24)/((T24-T34)-((U34-U24)/Gv)*T24));

v1C=(-1)*(((P31-P21)+((U31-U21)/Gt)*P31)/((T21-T31)-((U31-U21)/Gt)*T31));
v2C=(-1)*(((P32-P22)+((U32-U22)/Gv)*P32)/((T22-T32)-((U32-U22)/Gv)*T32));
v3C=(-1)*(((P33-P23)+((U33-U23)/Gt)*P33)/((T23-T33)-((U33-U23)/Gt)*T33));
v4C=(-1)*(((P34-P24)+((U34-U24)/Gv)*P34)/((T24-T34)-((U34-U24)/Gv)*T34));

v1=50;
v2=34;
v3=50;
v4=28;

%ESCENARIO 2:EFECTO RYANAIR
P31=133;
P32=90; %Baja el precio del avión
P33=182.5;
P34=114;
T31=160/60;
T32=195/60;
T33=218/60;
T34=245/60;

dU31A=((-Gt*(P31+v1*T31-P21-v1*T21))/(P31+v1*T31)); %Aumento porcentual
dU32A=((-Gv*(P32+v2*T32-P22-v2*T22))/(P32+v2*T32));
dU33A=((-Gt*(P33+v3*T33-P23-v3*T23))/(P33+v3*T33));
dU34A=((-Gv*(P34+v4*T34-P24-v4*T24))/(P34+v4*T34));

U3A=U3+U31*dU31A+U32*dU32A+U33*dU33A+U34*dU34A;
PU31A=100*((U31+U31*dU31A)/U3A);
PU32A=100*((U32+U32*dU32A)/U3A);
PU33A=100*((U33+U33*dU33A)/U3A);
PU34A=100*((U34+U34*dU34A)/U3A);

%ESCENARIO 3:EFECTO RENFE TIEMPO
P31=133;
P32=110;
P33=182.5;
P34=114;
T31=160/60;
T32=195/60;
T33=200/60;
T34=230/60;

dU31B=((-Gt*(P31+v1*T31-P21-v1*T21))/(P31+v1*T31)); %Aumento porcentual
dU32B=((-Gv*(P32+v2*T32-P22-v2*T22))/(P32+v2*T32));
dU33B=((-Gt*(P33+v3*T33-P23-v3*T23))/(P33+v3*T33));
dU34B=((-Gv*(P34+v4*T34-P24-v4*T24))/(P34+v4*T34));

U3B=U3+U31*dU31B+U32*dU32B+U33*dU33B+U34*dU34B;
PU31B=100*((U31+U31*dU31B)/U3B);
PU32B=100*((U32+U32*dU32B)/U3B);

```

```

PU33B=100*((U33+U33*dU33B)/U3B);
PU34B=100*((U34+U34*dU34B)/U3B);

%ESCENARIO 4:EFECTO RENFE PRECIO
P31=133;
P32=110;
P33=172.5;
P34=100;
T31=160/60;
T32=195/60;
T33=218/60;
T34=245/60;

dU31C=((-Gt*(P31+v1*T31-P21-v1*T21))/(P31+v1*T31)); %Aumento porcentual
dU32C=((-Gv*(P32+v2*T32-P22-v2*T22))/(P32+v2*T32));
dU33C=((-Gt*(P33+v3*T33-P23-v3*T23))/(P33+v3*T33));
dU34C=((-Gv*(P34+v4*T34-P24-v4*T24))/(P34+v4*T34));

U3C=U3+U31*dU31C+U32*dU32C+U33*dU33C+U34*dU34C;
PU31C=100*((U31+U31*dU31C)/U3C);
PU32C=100*((U32+U32*dU32C)/U3C);
PU33C=100*((U33+U33*dU33C)/U3C);
PU34C=100*((U34+U34*dU34C)/U3C);

%ESCENARIO 5:EFECTO RENFE PRECIO+TIEMPO
P31=133;
P32=110;
P33=172.5;
P34=100;
T31=160/60;
T32=195/60;
T33=200/60;
T34=230/60;

dU31D=((-Gt*(P31+v1*T31-P21-v1*T21))/(P31+v1*T31)); %Aumento porcentual
dU32D=((-Gv*(P32+v2*T32-P22-v2*T22))/(P32+v2*T32));
dU33D=((-Gt*(P33+v3*T33-P23-v3*T23))/(P33+v3*T33));
dU34D=((-Gv*(P34+v4*T34-P24-v4*T24))/(P34+v4*T34));

U3D=U3+U31*dU31D+U32*dU32D+U33*dU33D+U34*dU34D;
PU31D=100*((U31+U31*dU31D)/U3D);
PU32D=100*((U32+U32*dU32D)/U3D);
PU33D=100*((U33+U33*dU33D)/U3D);
PU34D=100*((U34+U34*dU34D)/U3D);

%ESCENARIO 6:EFECTO RYANAIR + EFECTO RENFE PRECIO+TIEMPO
P31=133;
P32=90;
P33=172.5;
P34=100;
T31=160/60;
T32=195/60;
T33=200/60;
T34=230/60;

dU31E=((-Gt*(P31+v1*T31-P21-v1*T21))/(P31+v1*T31)); %Aumento porcentual
dU32E=((-Gv*(P32+v2*T32-P22-v2*T22))/(P32+v2*T32));
dU33E=((-Gt*(P33+v3*T33-P23-v3*T23))/(P33+v3*T33));
dU34E=((-Gv*(P34+v4*T34-P24-v4*T24))/(P34+v4*T34));

```

```
U3E=U3+U31*dU31E+U32*dU32E+U33*dU33E+U34*dU34E;
PU31E=100*((U31+U31*dU31E)/U3E);
PU32E=100*((U32+U32*dU32E)/U3E);
PU33E=100*((U33+U33*dU33E)/U3E);
PU34E=100*((U34+U34*dU34E)/U3E);

%MONTAJE MATRIZ DE DISTRIBUCIÓN MODAL DE POSIBLES ESCENARIOS
MU3=zeros(6,4);
MU3(1,1)=PU31;
MU3(1,2)=PU32;
MU3(1,3)=PU33;
MU3(1,4)=PU34;
MU3(2,1)=PU31A;
MU3(2,2)=PU32A;
MU3(2,3)=PU33A;
MU3(2,4)=PU34A;
MU3(3,1)=PU31B;
MU3(3,2)=PU32B;
MU3(3,3)=PU33B;
MU3(3,4)=PU34B;
MU3(4,1)=PU31C;
MU3(4,2)=PU32C;
MU3(4,3)=PU33C;
MU3(4,4)=PU34C;
MU3(5,1)=PU31D;
MU3(5,2)=PU32D;
MU3(5,3)=PU33D;
MU3(5,4)=PU34D;
MU3(6,1)=PU31E;
MU3(6,2)=PU32E;
MU3(6,3)=PU33E;
MU3(6,4)=PU34E;

MU3A=zeros(6,2);
MU3A(1,1)=PU31+PU32;
MU3A(1,2)=PU33+PU34;
MU3A(2,1)=PU31A+PU32A;
MU3A(2,2)=PU33A+PU34A;
MU3A(3,1)=PU31B+PU32B;
MU3A(3,2)=PU33B+PU34B;
MU3A(4,1)=PU31C+PU32C;
MU3A(4,2)=PU33C+PU34C;
MU3A(5,1)=PU31D+PU32D;
MU3A(5,2)=PU33D+PU34D;
MU3A(6,1)=PU31E+PU32E;
MU3A(6,2)=PU33E+PU34E;
MU3A
```

### 13.1.2 Hipótesis 2

```

%Hipótesis 2: 2 modos diferentes:
%
%                               (1):Avión
%                               (2):AVE
%
clear all
%Variables:
G=1.75; %Gamma viaje de TRABAJO
B=0.9;
% Datos 2008:
    %(P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM0=6295011;
POBB0=5274115;
PIB0=1088502000000;
P01h1=205;
P02h1=110;
P03h1=163.5;
P04h1=102;
T01h1=165/60;
T02h1=195/60;
T03h1=218/60;
T04h1=245/60;
U01h1=2549276;
U02h1=1461651;
U03h1=964749;
U04h1=1179138;
U01=U01h1+U02h1;
U02=U03h1+U04h1;
P01=(P01h1*U01h1+P02h1*U02h1)/(U01);
P02=(P03h1*U03h1+P04h1*U04h1)/(U02);
T01=(T01h1*U01h1+T02h1*U02h1)/(U01);
T02=(T03h1*U03h1+T04h1*U04h1)/(U02);

% Datos 2009:
    %(P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM1=6295011;
POBB1=5345603;
PIB1=1051151000000;
P11h1=205;
P12h1=110;
P13h1=173;
P14h1=108;
T11h1=160/60;
T12h1=195/60;
T13h1=218/60;
T14h1=245/60;
U11h1=1970714;
U12h1=1129286;
U13h1=1260000;
U14h1=1540000;
U11=U11h1+U12h1;
U12=U13h1+U14h1;
P11=(P11h1*U11h1+P12h1*U12h1)/(U11);
P12=(P13h1*U13h1+P14h1*U14h1)/(U12);
T11=(T11h1*U11h1+T12h1*U12h1)/(U11);
T12=(T13h1*U13h1+T14h1*U14h1)/(U12);

```

```
% Datos 2010:
  % (P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM2=6295050;
POBB2=5305455;
PIB2=1051151000000;
P21h1=133;
P22h1=110;
P23h1=182.5;
P24h1=114;
T21h1=160/60;
T22h1=195/60;
T23h1=218/60;
T24h1=245/60;
U21h1=1875402;
U22h1=1074598;
U23h1=1325911;
U24h1=1724089;
U21=U21h1+U22h1;
U22=U23h1+U24h1;
P21=(P21h1*U21h1+P22h1*U22h1)/(U21);
P22=(P23h1*U23h1+P24h1*U24h1)/(U22);
T21=(T21h1*U21h1+T22h1*U22h1)/(U21);
T22=(T23h1*U23h1+T24h1*U24h1)/(U22);

% Cálculo valores de tiempo

v1A=(-1)*(((P11-P01)+((U11-U01)/G)*P11)/((T01-T11)-((U11-U01)/G)*T11));
v1B=(-1)*(((P21-P11)+((U21-U11)/G)*P21)/((T11-T21)-((U21-U11)/G)*T21));

v2A=(-1)*(((P12-P02)+((U12-U02)/G)*P12)/((T02-T12)-((U12-U02)/G)*T12));
v2B=(-1)*(((P22-P12)+((U22-U12)/G)*P22)/((T12-T22)-((U22-U12)/G)*T22));

%Predicción para 2011-----

% Datos 2011 ESCENARIO 1: SIN CAMBIOS
  % (P):Precio en euros, (T):Tiempo en minutos, (U):Usuarios
POBM3=6285785;
POBB3=5266086;
PIB3=1043761408470;
P31h1=133;
P32h1=110;
P33h1=182.5;
P34h1=114;
T31h1=160/60;
T32h1=195/60;
T33h1=218/60;
T34h1=245/60;
U31h1=6200000*0.3007;
U32h1=6200000*0.1723;
U33h1=6200000*0.2291;
U34h1=6200000*0.2979;
U31=U31h1+U32h1;
U32=U33h1+U34h1;
P31=(P31h1*U31h1+P32h1*U32h1)/(U31);
P32=(P33h1*U33h1+P34h1*U34h1)/(U32);
T31=(T31h1*U31h1+T32h1*U32h1)/(U31);
T32=(T33h1*U33h1+T34h1*U34h1)/(U32);
PU31h1=30.07;
PU32h1=17.23;
```

```
PU33h1=22.91;
PU34h1=29.79;
PU31=PU31h1+PU32h1;
PU32=PU33h1+PU34h1;
U3=U31+U32;

v1C=(-1)*(((P31-P21)+((U31-U21)/G)*P31)/((T21-T31)-((U31-U21)/G)*T31));
v2C=(-1)*(((P32-P22)+((U32-U22)/G)*P32)/((T22-T32)-((U32-U22)/G)*T32));

v1=43;
v2=37;

%ESCENARIO 2:EFECTO RYANAIR
P31A=P31*0.90; %Baja el precio del avión
P32A=P32;
T31A=T31;
T32A=T32;

dU31A=(-G*(P31A+v1*T31A-P21-v1*T21))/(P31A+v1*T31A); %Aumento porcentual
dU32A=(-G*(P32A+v2*T32A-P22-v2*T22))/(P32A+v2*T32A);

U3A=U3+U31*dU31A+U32*dU32A;
PU31A=100*((U31+U31*dU31A)/U3A);
PU32A=100*((U32+U32*dU32A)/U3A);

%ESCENARIO 3:EFECTO RENFE TIEMPO
P31B=P31;
P32B=P32;
T31B=T31;
T32B=T32*0.93;

dU31B=(-G*(P31B+v1*T31B-P21-v1*T21))/(P31B+v1*T31B); %Aumento porcentual
dU32B=(-G*(P32B+v2*T32B-P22-v2*T22))/(P32B+v2*T32B);

U3B=U3+U31*dU31B+U32*dU32B;
PU31B=100*((U31+U31*dU31B)/U3B);
PU32B=100*((U32+U32*dU32B)/U3B);

%ESCENARIO 4:EFECTO RENFE PRECIO
P31C=P31;
P32C=P32*0.90;
T31C=T31;
T32C=T32;

dU31C=(-G*(P31C+v1*T31C-P21-v1*T21))/(P31C+v1*T31C); %Aumento porcentual
dU32C=(-G*(P32C+v2*T32C-P22-v2*T22))/(P32C+v2*T32C);

U3C=U3+U31*dU31C+U32*dU32C;
PU31C=100*((U31+U31*dU31C)/U3C);
PU32C=100*((U32+U32*dU32C)/U3C);

%ESCENARIO 5:EFECTO RENFE PRECIO+TIEMPO
P31D=P31;
P32D=P32*0.90;
T31D=T31;
T32D=T32*0.93;

dU31D=(-G*(P31D+v1*T31D-P21-v1*T21))/(P31D+v1*T31D); %Aumento porcentual
```

```
dU32D=(( -G*(P32D+v2*T32D-P22-v2*T22))/(P32D+v2*T32D));

U3D=U3+U31*dU31D+U32*dU32D;
PU31D=100*((U31+U31*dU31D)/U3D);
PU32D=100*((U32+U32*dU32D)/U3D);

%ESCENARIO 6:EFECTO RYANAIR + EFECTO RENFE PRECIO+TIEMPO
P31E=P31*0.90;
P32E=P32*0.90;
T31E=T31;
T32E=T32*0.93;

dU31E=(( -G*(P31E+v1*T31E-P21-v1*T21))/(P31E+v1*T31E)); %Aumento porcentual
dU32E=(( -G*(P32E+v2*T32E-P22-v2*T22))/(P32E+v2*T32E));

U3E=U3+U31*dU31E+U32*dU32E;
PU31E=100*((U31+U31*dU31E)/U3E);
PU32E=100*((U32+U32*dU32E)/U3E);

%MONTAJE MATRIZ DE DISTRIBUCIÓN MODAL DE POSIBLES ESCENARIOS
MU3=zeros(6,2);
MU3(1,1)=PU31;
MU3(1,2)=PU32;
MU3(2,1)=PU31A;
MU3(2,2)=PU32A;
MU3(3,1)=PU31B;
MU3(3,2)=PU32B;
MU3(4,1)=PU31C;
MU3(4,2)=PU32C;
MU3(5,1)=PU31D;
MU3(5,2)=PU32D;
MU3(6,1)=PU31E;
MU3(6,2)=PU32E;

MU3
```