

# LA FINANCIACIÓN DE LA ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA EN ESPAÑA DESDE LA PERSPECTIVA DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

## “PARADOJAS DE LA ALTA VELOCIDAD” CÓRDOBA, JUNIO DE 2009

Javier CAMPOS<sup>1</sup>

### Resumen

Este documento analiza, desde la perspectiva del análisis económico, la financiación de las inversiones en alta velocidad ferroviaria en España. El trabajo comienza evaluando el alcance y objetivo de dichas inversiones en el vigente Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte (PEIT) del Ministerio de Fomento y estudia las fuentes de financiación previstas en dicho plan para alcanzar dichos objetivos. Frente a la situación actual, en la que la realización de las distintas inversiones parece estar condicionada a la disponibilidad de financiación presupuestaria y/o ayudas comunitarias, este trabajo argumenta que un criterio fundamental para la evaluación de la aprobación y periodificación de dichas inversiones también debería ser la demanda esperada de cada proyecto, proponiéndose finalmente algunos mecanismos simples para implementar tal evaluación.

*Palabras clave: alta velocidad ferroviaria, PEIT, financiación, evaluación económica.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Frente a la perspectiva eminentemente técnica y aplicada de la ingeniería, la aproximación a la realidad que se realiza en el análisis económico tiene su principal fundamento en el concepto abstracto de *coste de oportunidad*. Los economistas consideran que en cualquier momento del tiempo toda sociedad está dotada de una cantidad limitada de recursos productivos – genéricamente denotados como capital, trabajo y recursos naturales – que deben ser asignados entre diversos usos alternativos para satisfacer las necesidades presentes y futuras de los distintos agentes económicos que componen dicha sociedad. Tal asignación puede realizarse de forma descentralizada (a través de los mercados), o de manera regulada o dirigida (por parte del Estado), conduciendo en cualquiera de los dos casos a unos resultados que pueden medirse en términos de eficiencia, esto es, de minimización del despilfarro de recursos, y de equidad, ya que la remuneración por el uso de los recursos productivos también conduce implícitamente a un reparto de la renta. La idea de coste de oportunidad surge así de la propia necesidad de elegir: cuando la sociedad opta por producir determinados bienes o servicios está renunciando a todos los usos alternativos posibles de esos recursos productivos, cuyo “coste de oportunidad” es definido, por tanto, como el valor (neto) de lo que la sociedad pierde en la mejor alternativa de uso disponible para los mismos.

---

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Economía de las Infraestructuras y del Transporte (EIT) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria ([jcampos@daea.ulpgc.es](mailto:jcampos@daea.ulpgc.es)).

Esta definición es igualmente aplicable al caso de las infraestructuras. Sin embargo, como señala recientemente De Rus (2009 [1]), la sociedad suele contemplar la inversión en obras públicas con un cierto sesgo consistente en la creencia de cuanta más, más grande y de nueva tecnología mejor. Por ello, a pesar de que la inversión en infraestructuras no es más que otra elección con relación al uso de los recursos de los que dispone la sociedad (y no necesariamente la única o mejor elección posible), el concepto de coste de oportunidad no parece estar muy presente en muchas de las decisiones que se toman habitualmente.

Existe una amplia literatura que estudia la relación entre la inversión en infraestructuras y el desarrollo económico de un país<sup>2</sup>. La mayoría de estos trabajos ha demostrado desde hace mucho tiempo que las infraestructuras sólo contribuyen al bienestar social si se cumple una condición muy sencilla: que los beneficios que aporten a la sociedad sean mayores que los costes que conlleven para ésta. Sólo cuando se cumple esta premisa resulta posible garantizar un aumento global de la eficiencia, ya que el uso dado a los recursos compensa a su coste de oportunidad. Por el contrario, cuando una sociedad se dota de infraestructuras excesivamente costosas en comparación con los beneficios que éstas le aportan está despilfarrando recursos y disminuyendo su bienestar, ya que pierde el coste de oportunidad de los mismos. Esto es válido incluso cuando se aportan razonamientos de tipo macroeconómico para justificar la inversión en ciertas infraestructuras, apelándose por ejemplo a la creación de empleo o a la supuesta dinamización de la actividad económica que éstas conllevan. Aun en estos casos si la inversión no cumple la condición anterior no debería llevarse a cabo (o debería posponerse) ya que habrá usos alternativos más eficientes para los fondos públicos, especialmente en contextos de crisis económica y/o elevado déficit presupuestario.

En el caso concreto de las inversiones en alta velocidad ferroviaria (AVF), no existe ninguna duda de que esta infraestructura constituye actualmente uno de los avances más significativos y técnicamente exitosos en el transporte terrestre de pasajeros a partir de la segunda mitad del siglo XX. A comienzos de 2009 existían en operación cerca de 10.000 kms de nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad en más de 15 países y globalmente, incluyendo las líneas convencionales también utilizadas por la AVF, más de 20.000 kms de la red ferroviaria mundial eran utilizados para suministrar servicios de alta velocidad a un creciente número de viajeros dispuestos a pagar por menores tiempos de viaje y mayor calidad en el transporte por ferrocarril (Campos y De Rus 2009, [5]).

Los beneficios sociales de la inversión en infraestructuras de alta velocidad ferroviaria son bien conocidos y proceden fundamentalmente de los ahorros de tiempo que obtienen los usuarios que cambien de modo de transporte y de la disposición a pagar de la demanda de nueva generación, añadiendo además, en su caso, las ganancias que experimenten los usuarios de los modos de transporte que pierden tráfico al reducirse los costes de desplazamiento si el trasvase de viajeros al tren de alta velocidad reduce significativamente la congestión (carreteras y aeropuertos) y los accidentes que existían en dichos modos. A estos beneficios habría que sumar los que se obtienen de liberar capacidad en la red ferroviaria convencional si ésta se utiliza, por ejemplo, para transportar mercancías. Por otro lado, los principales costes de la alta velocidad ferroviaria son también conocidos y generalmente muy elevados, correspondiendo principalmente a la construcción y mantenimiento de las infraestructuras y a la operación y mantenimiento de los servicios prestados sobre ellas, además de otros componentes de costes externos (contaminación, impacto visual, etc.) de más difícil cuantificación.

---

<sup>2</sup> Véase Aschauer (1989, [2]) o Gramlich (1994, [3]). Para el caso del transporte puede citarse por ejemplo Campos y De Rus (2002, [4]), aunque la literatura en este campo es muy amplia.

En este contexto, parece claro que analizar – desde la perspectiva del análisis económico – la financiación de las inversiones en alta velocidad ferroviaria en España no puede limitarse a describir la cuantía y el origen de los fondos aportados a cada uno de los proyectos. Se requiere hacer una valoración del coste de oportunidad global de los recursos, para lo cual resulta imprescindible proponer mecanismos de evaluación de la eficiencia de dichas inversiones. Éste es el objetivo del resto de este documento. Para ello comenzaremos en la sección siguiente presentando de manera general las principales características de la inversión en alta velocidad ferroviaria en España, particularmente en el contexto del vigente Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte del Ministerio de Fomento. En la Sección 3 realizaremos una evaluación más detallada de estas inversiones, a partir de un modelo de evaluación centrado en la demanda esperada como principal criterio de decisión, dejando la sección 4 para conclusiones. Aunque esta aproximación metodológica no es novedosa en el análisis coste-beneficio (véase De Rus y Nombela 2007 [6] y De Rus y Nash 2009 [7]), su principal ventaja en este caso radica en que internaliza y aísla gran parte de la incertidumbre de demanda existente en los proyectos AVF, permitiendo determinar los umbrales mínimos de ésta a partir de los cuales un proyecto resultaría socialmente rentable y, por tanto, se justificaría su financiación.

## **2 LA INVERSIÓN EN ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA EN ESPAÑA**

### **2.1 La alta velocidad como prioridad en el PEIT**

Dentro del vigente Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) el ferrocarril es el modo de transporte que concentra el conjunto más importante de actuaciones previstas en el horizonte 2005-2020, tanto en términos cualitativos (43,7% del total), como con relación al volumen global de inversiones a ejecutar, las cuales ascienden en este sector a más de 108.000 millones de euros. El propio plan concede al ferrocarril un “papel protagonista”, reconociendo expresamente como uno de sus objetivos “(...) alcanzar una completa reestructuración de la red ferroviaria española”. Ello se debe a que el diagnóstico de partida encuentra una red en servicio cuya longitud total en 2005 se aproximaba a 13.500 kms, de los cuales sólo 1.031 kms tenían ancho UIC, 2.095 kms correspondían a doble vía electrificada, 3.628 kms tenían una vía única electrificada, 5.494 kms estaban sin electrificar y 1.194 kms eran ferrocarriles de vía estrecha explotados por FEVE. Como puede deducirse, esta situación originaba notables diferencias de niveles de dotación entre las líneas de la red, en términos de calidad y seguridad, lo cual generaba dificultades de integración en la red europea y conducía a la existencia de tramos y líneas con muy baja utilización.

La reestructuración ferroviaria que se propone en el PEIT tiene como principal objetivo “modernizar” la red española con el fin de que este modo de transporte “se convierta de manera progresiva en un elemento central para la articulación de los servicios intermodales de transporte”. Las actuaciones previstas afectan a más de 9.000 km de la red actual, que serán mejorados para soportar tráfico de altas prestaciones. Esta red se extenderá al conjunto del territorio peninsular y conllevará adicionalmente la construcción de más de 5.600 km de alta capacidad (esto es, un incremento del 62% con respecto a la dotación actual). Además, con el fin de mejorar la accesibilidad al conjunto del territorio, se pretende corregir la actual estructura radial (desarrollando rutas periféricas) y conseguir que todas las capitales de provincia tengan acceso al ferrocarril de altas prestaciones, de manera que el 90% de la población peninsular se sitúe a menos de 50 kms de una estación de la red.

El conjunto de objetivos previstos en el PEIT se estructura temporalmente a lo largo de dos etapas diferenciadas. Así, las actuaciones en el horizonte 2005-2008 (casi concluidas en el momento actual) se han concentrado en la finalización de los corredores de alta velocidad que estaban en construcción (entre los que destaca Madrid-Barcelona), la inversión en la red convencional para mejorar las condiciones de explotación de los servicios ferroviarios de mercancías y para facilitar el intercambio con el transporte por carretera y marítimo, y la consolidación del nuevo marco institucional de relación entre el Administrador de la Infraestructura Ferroviaria (ADIF) y los operadores (en un primer momento, sólo RENFE Operadora)<sup>3</sup>, en condiciones que pretenden favorecer el desarrollo del ferrocarril frente a modos competidores. Las actuaciones a realizar a partir de 2009 se dirigen principalmente a mejorar los servicios prestados en el transporte de viajeros y mercancías, extendiendo progresivamente la red de alta velocidad por todo el territorio nacional y mejorando la interoperabilidad con la red francesa en el transporte de mercancías. Muchas de las inversiones en esta etapa están aún pendientes de concretar, señalándose que “(...) las actuaciones a partir de 2013 se precisarán en función de los resultados obtenidos en el período anterior en cuanto a evolución de la participación modal del ferrocarril en el transporte de viajeros y de mercancías.”

Las directrices y grandes líneas de actuación diseñadas en el PEIT se desarrollan a través de planes sectoriales específicos en los que se detallan (al menos, cada 8 años) las actuaciones concretas a acometer en cada modo de transporte por distintos organismos públicos durante las distintas fases del período de vigencia del plan. En el caso del ferrocarril, la estimación económica global de las actuaciones previstas en el horizonte 2005-2020 asciende a 108.760 millones de euros. Dentro de este importe, las inversiones en infraestructuras que ya figuran detalladas en el propio Plan Estratégico del ADIF están cuantificadas en un total de 23.400 millones de euros hasta el año 2010, haciendo un especial esfuerzo inversor en el desarrollo de la red de alta velocidad, a la que se destinan 18.797 millones, los cuales corresponden a más de 1.150 kms de nuevas vías. En relación con estos corredores de “altas prestaciones”, el Plan Sectorial de Transporte Ferroviario (PSTF) contempla específicamente tres tipos de situaciones (Ministerio de Fomento, 2007, [9]):

1. Líneas y tramos troncales, de nuevo trazado, para uso exclusivo de servicios de viajeros. Se trata de tramos o líneas que superen un determinado umbral de tráfico el año de entrada en servicio, asegurando la mayor rentabilidad social posible y el mayor impacto territorial, con el mayor ahorro de tiempo a los destinos servidos. Necesariamente, el número de estas líneas de nueva construcción debe ser limitado, ya que introducen una evidente rigidez en el esquema futuro de la red ferroviaria, al utilizar parámetros que no permiten el tráfico mixto y obligar por ello a contar con la red convencional para mercancías, con riesgo de una posible infrautilización de las dos redes y un aumento de los costes de administración de la infraestructura.
2. Líneas y tramos con variación sustancial del trazado respecto de la línea existente, destinados a tráfico mixto (viajeros y mercancías). Corresponde a líneas de tráfico medio, prolongaciones de líneas troncales, ejes transversales estructurantes y enlaces transfronterizos, que se diseñarían, en principio, para tráfico mixto, ya que el tráfico potencial de los corredores que sirven no parece permitir en el momento actual su especialización en viajeros, con la consiguiente duplicación de red.

---

<sup>3</sup> La *Ley del Sector Ferroviario*, que entró en vigor en 2005, permite la progresiva entrada de nuevos operadores (Campos 2006, [8]).

- Tramos de cierre, con tráfico sensiblemente menor a los casos anteriores, destinados a tráfico mixto. Incluye los tramos o líneas, normalmente tramos finales de líneas, con menor tráfico de viajeros y ciertos tráficos de mercancías. El objetivo es proceder a la renovación integral de estos tramos, para incrementar la velocidad de circulación, la seguridad y la calidad de los servicios, buscando a medio plazo la interoperabilidad plena con el resto de la red europea.

## 2.2 Los principales proyectos y su financiación

Tal como muestra la Tabla 1, el desarrollo de la red de alta velocidad previsto en el PSTF se realizará a través de cinco grandes corredores que cubrirán radialmente la Península Ibérica y conectarán la red española con la de Francia y Portugal. Aunque las características de cada corredor son diferentes, todos incluyen los tres tipos de actuaciones descritos anteriormente. No obstante, las principales inversiones se refieren a la prolongación de líneas de alta velocidad ya existentes, a actuaciones de mejoras sobre la red convencional con el fin de dotarla de altas prestaciones, o a la construcción de nuevas infraestructuras en territorios en los que la red convencional no existía o no reunía las condiciones adecuadas.

Corredor	Descripción	Entrada prevista en servicio de las líneas principales [distancia] <sup>4</sup>
<b>Andalucía</b>	Conectará Madrid con las principales ciudades andaluzas a través de la línea Madrid-Córdoba-Sevilla.	Madrid - Granada (+2010) [430 kms] Madrid - Málaga (2007) [540 kms] Madrid - Cádiz (+2012) [660 kms]
<b>Levante y Eje Mediterráneo</b>	Conectará Madrid a través de Castilla-La Mancha con Valencia y Alicante, integrándose la línea en el Eje Mediterráneo que se extenderá a lo largo de la costa mediterránea española hasta la frontera francesa	Madrid - Valencia (2010) [350 kms] Madrid - Alicante (2012) [420 kms]
<b>Corredor Noreste</b>	La línea Madrid-Zaragoza-Barcelona-Francia actualmente se encuentra en construcción, a la que se le irán uniendo con posterioridad conexiones con Pamplona, Logroño, Soria, y Teruel.	Madrid - Barcelona (2008) [620 kms] Barcelona - Francia (2009) [150 kms]
<b>Norte-Noroeste</b>	El eje Madrid-Segovia-Valladolid/ Medina del Campo se extenderá a toda la cornisa cantábrica y noroeste de España.	Madrid - Valladolid (2007) [190 kms] Madrid - Bilbao (+ 2012) [395 kms] Madrid - Galicia (+ 2012) [600 kms]
<b>Extremadura - Portugal</b>	Conectará Madrid con las principales ciudades extremeñas y con la línea ferroviaria de alta velocidad que llegará a Lisboa.	Madrid - Cáceres (+2012) [300 kms] Cáceres - Badajoz (+2012) [90 kms] Badajoz - Portugal (+2012) [50 kms]

**Tabla 1. Corredores de alta velocidad previstos en el PEIT**

Fuente: PEIT ([www.mfom.es](http://www.mfom.es))

<sup>4</sup> Se trata de fechas estimadas. En la mayoría de los corredores hay tramos que entran en funcionamiento antes de la finalización completa de la línea, como ocurrió con el Córdoba-Antequera (2006) o el que une Lleida-Tarragona (2006). La ruta Madrid-Zaragoza comenzó a operar en 2003 y la pionera, Madrid-Sevilla, en abril de 1992.

Precisamente, las actuaciones realizadas en el horizonte 2005-2009 se han centrado en la finalización de algunos corredores que ya se encontraban en planificación y construcción desde hacía varios años (Madrid-Barcelona, Madrid-Valladolid, Madrid-Málaga), mientras que las actuaciones en las fases posteriores del plan se concretarán – tal como se ha indicado – después de conocer la evolución de la demanda del sistema con las mejoras introducidas en los tramos de mayor tráfico y la sostenibilidad financiera global del esquema de red.

La Tabla 2 resume el coste real de las inversiones en alta velocidad ferroviaria realizadas hasta diciembre de 2008 y las previsiones para las líneas a ejecutar en los próximos años, pero ya comprometidas dentro del PSTF. Como puede observarse, la financiación de las inversiones procede en todos los casos de dos fuentes principales: la aportación patrimonial del Estado español, a través de ADIF,<sup>5</sup> y la contribución de los distintos fondos europeos aplicables en cada caso, esto es, del Fondo de Cohesión (FC), del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), y del Fondo de las Redes Transeuropeas del Transporte (RTE-T). Estos fondos están encaminados a favorecer el desarrollo y la vertebración territorial en Europa a través del ferrocarril, a la vez que contribuyen a reducir las disparidades sociales y económicas entre los ciudadanos de la Unión.

De manera global, y excluyendo la línea Madrid-Sevilla (muy anterior al PEIT), el coste real o presupuestado de las líneas de AVF supone una inversión superior a los 50.000 millones de euros, de los cuales al menos un 50% son aportados directamente por el Estado español, bien a través de recursos presupuestarios o de préstamos concedidos por entidades financieras. Los dos proyectos más importantes son la línea Madrid-Barcelona-Frontera Francesa, de próxima finalización y cuyo coste supera los 12.300 millones de euros, y el eje Madrid-Levante, todavía no operativo todavía, aunque con un coste similar. Ambos proyectos comparten longitud (alrededor de 700 kms) y características similares, si bien el primero se encuentra co-financiado por el Fondo de Cohesión y forma parte del eje prioritario nº 3 dentro de las Redes Transeuropeas definidas por la Comisión Europea (ya que permitirá la integración de España en la red de alta velocidad comunitaria, conectando con los ferrocarriles franceses a través de su último tramo Figueras-Perpignan) y el segundo está apoyado por los fondos FEDER. En términos relativos, la aportación comunitaria varía notablemente en el resto de proyectos, siendo especialmente destacable la contribución a la línea Madrid-Valladolid (donde la UE aporta casi un 50% del presupuesto).

A pesar de que disponer de un volumen tan elevado de financiación supone un éxito notable para un país en términos de la movilización de recursos que ello conlleva, esto no implica necesariamente que (todos) los fondos se estén invirtiendo de la mejor manera posible. De hecho, la importancia de estas cifras justifica precisamente la necesidad de evaluar rigurosamente la rentabilidad económica y social de cada uno de los proyectos de inversión en alta velocidad ferroviaria, sin considerar necesariamente que la mera viabilidad técnica de su construcción justifica llevarlos a cabo. Como veremos a continuación, es evidente que tal rentabilidad viene dada por la comparación entre los costes (principalmente de construcción y operación) y los beneficios de cada proyecto, dependiendo estos últimos de manera crucial de la demanda esperada.

---

<sup>5</sup> En la parte financiada por ADIF se incluyen los préstamos suscritos con el Banco Europeo de Inversiones (BEI), cuyo importe global supera los 6.000 millones de euros.

Principales líneas de alta velocidad	Coste real o presupuestado	Aportación del Estado (ADIF)	Fondos Europeos (Importe de la ayuda)			
			F.C.	FEDER	RTE-T	TOTAL
Línea Córdoba – Málaga	2.539	1.686	-	853	-	853
Línea Madrid – Barcelona – Frontera Francesa	12.376	8.916	3.389	-	71	3.460
Línea Madrid – Valladolid	4.205	2.418	1.574	193	21	1.788
Línea Madrid – Toledo	208	141	-	67	-	67
Línea León – Asturias	3.082	2.496	254	329	3	586
Línea Madrid – Levante	12.304	10.216	575	1.465	48	2.088
Línea Madrid – Galicia. Eje Ourense – Santiago	(En estudio)	-	(*)	-	-	-
Línea Vitoria – Bilbao – San Sebastián	2.587	-	(*)	-	47	47
Línea Madrid – Extremadura – Frontera Portuguesa	4.371	-	(*)	-	(*)	-
Línea Valladolid – Burgos – Vitoria	3.017	-	(*)	-	(*)	-
Línea Antequera (Bobadilla) – Granada	1.356	-	-	(*)	-	-
Línea Venta de Baños – Palencia – León	3.082	-	-	(*)	-	-
Línea Almería (Pulpi) – Murcia	957	-	-	(*)	-	-
<b>Importe total actuaciones previstas</b>	<b>50.082</b>	<b>25.873</b>	<b>5.791</b>	<b>3.174</b>	<b>190</b>	<b>9.155</b>

**Tabla 2. Coste y financiación de las principales líneas de alta velocidad ferroviaria en España**

(\*) Ayuda concedida, pero aún no cuantificada

Fuente: ADIF 2008 [10]

### 3 LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA ALTA VELOCIDAD

De acuerdo con nuestra discusión inicial sobre el concepto de coste de oportunidad, un proyecto de inversión en alta velocidad ferroviaria es socialmente deseable sólo si los beneficios sociales que conlleva superan a sus costes. Aun así, ello no significa que necesariamente el proyecto deba ser financiado ya que incluso con un valor actual neto positivo es posible que existan otros proyectos alternativos que ofrezcan un beneficio neto superior. Realizar este tipo de evaluaciones económicas se convierte, por tanto, en un paso fundamental en el diseño de la política de transporte (y, en general, económica) de cualquier país.

#### 3.1 Una propuesta de evaluación económica basada en la demanda

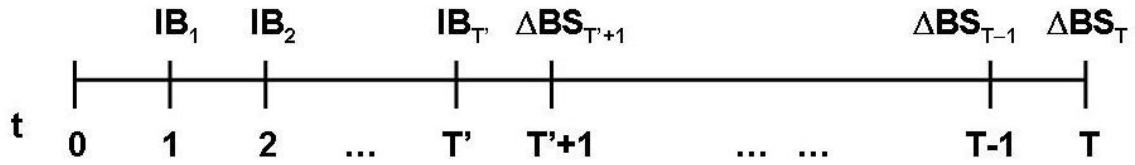
En esta sección formularemos este análisis de manera general: en lugar de realizar una evaluación concreta de una sola línea de alta velocidad, estudiaremos de forma genérica un corredor-tipo que pueda adaptarse con facilidad a cualquiera de los previstos en el PEIT. De esta manera, para los datos de coste se realizarán extrapolaciones a partir de costes promedios procedentes de otros trabajos previos publicados sobre este tema y para los datos de demanda se realizarán proyecciones a partir de la información disponible sobre las rutas actualmente en operación.

Sin embargo, dado que es precisamente en la demanda – tanto desviada como generada – donde radica la mayor fuente de incertidumbre en relación con los “resultados en cuanto a evolución de la participación modal del ferrocarril” nuestra evaluación se centrará en ella, haciendo recaer sobre la misma “el peso de la prueba” en la evaluación socioeconómica de nuestro corredor genérico. Esto implica que, en lugar de realizar la tradicional comparación de beneficios y costes descontados (a partir de una estimación inicial de demanda) para obtener el valor actual neto social ( $VAN_S$ ) del proyecto, procederemos a la inversa, calculando aquel nivel de demanda inicial que debería tener el proyecto para proporcionar una rentabilidad social (esperada) positiva.

Nuestro objetivo será determinar aquél valor de la demanda inicial que permite igualar a cero el (valor esperado) del VAN social. Se trata, en palabras del PEIT, de calcular el “umbral de tráfico en el año de entrada en servicio” que garantiza como mínimo la rentabilidad social (esperada) de la inversión. Para ello comenzaremos con el planteamiento del proyecto desde un punto de vista técnico, realizando varias simplificaciones razonables con el objeto de facilitar el análisis. Luego ilustraremos el procedimiento de cálculo en un caso particular (un modelo estático) y, finalmente, obtendremos la expresión más general del modelo, que será implementada y analizada al final de esta sección.

##### 3.1.1 Definición del proyecto

Nuestro proyecto consiste en la construcción y explotación de una línea de alta velocidad de  $L$  kilómetros de longitud. Tal como refleja la Figura 1, durante cada uno de los años del período de construcción (entre  $t = 0$  y  $t = T'$ ) la sociedad realiza una inversión bruta igual a  $IB_t$  euros, que incluye tanto los costes de planeamiento como los de construcción. Durante cada uno de los años de explotación de la línea (entre  $t = T'+1$  y  $t = T$ ) el proyecto aporta anualmente a la sociedad un cambio en el beneficio social neto (con respecto a la situación *sin* proyecto) igual a  $\Delta BS_t$ , que puede ser positivo o negativo. Todos estos flujos se valoran a 31 de diciembre de cada año.



**Figura 1. Estructura temporal del proyecto**

El valor actual neto en  $t = 0$  de los flujos asociados a este proyecto, una vez descontados al tipo de descuento  $i$ , viene dado por la expresión:

$$VAN_S = -I_0 + \sum_{t=T'+1}^T \frac{\Delta BS_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

donde  $I_0$  resume, valorada en  $t = 0$ , toda la inversión inicial realizada en el planeamiento y construcción de infraestructuras, neta del valor residual ( $VRI_T$ ) de la misma al finalizar el proyecto:

$$I_0 = \sum_{t=0}^{T'} \frac{IB_t}{(1+i)^t} - \frac{VRI_T}{(1+i)^T} \quad (2)$$

Por otra parte, de acuerdo con el enfoque del cambio en los excedentes utilizado habitualmente en la evaluación socioeconómica de proyectos (De Rus 2008 [11]), la variación anual del beneficio social neto ( $\Delta BS_t$ ) puede descomponerse en cambio en el excedente de los viajeros ( $\Delta EC_t$ ), cambio en el excedente de los operadores ( $\Delta EP_t$ ), cambios en el excedente del gobierno y resto de la sociedad ( $\Delta ER_t$ ) y cambios en los efectos indirectos ( $\Delta EI_t$ ). Sin embargo, para simplificar nuestro análisis consideraremos por ahora que únicamente los dos primeros efectos son los relevantes, esto es,  $\Delta ES_t = \Delta EI_t = 0$ , de modo que:

$$\Delta BS_t = \Delta EC_t + \Delta EP_t \quad (3)$$

### 3.1.2 El modelo simplificado: análisis estático

Con el fin de ilustrar con mayor claridad todos los cálculos asociados a nuestro modelo, supongamos inicialmente que el proyecto tiene una duración total de un solo período, de forma que toda la inversión se realiza en  $t = 0$  y los beneficios y costes sociales asociados a la explotación se valoran en  $t = 1$ . Es decir,  $(T', T) = (0, 1)$ . Bajo estas condiciones, es inmediato comprobar que la expresión (1) se transforma en:

$$VAN_S = -I_0 + \frac{\Delta EC_1 + \Delta EP_1}{(1+i)} \quad (4)$$

### 3.1.2.1 Cálculo del (cambio en el) excedente de los usuarios<sup>6</sup>

De manera general, todos los viajes que se realizan en la nueva línea de alta velocidad en el período  $t = 1$  proceden de dos fuentes de demanda: el *tráfico desviado* de los modos de transporte ya existentes, que serán denotados genéricamente como: *avión (a)*, *autobús (b)*, *coche (c)*, o *tren convencional (f)*,<sup>7</sup> o bien el *tráfico generado* por los usuarios que anteriormente no viajaban en esta ruta.

#### Tráfico desviado

Con respecto al primero, en la situación *sin* el proyecto (denotada por el superíndice 0) el coste generalizado de viajar en cada uno de los modos ya existentes ( $m = a, b, c, f$ ) era igual a:

$$g_m^0 = p_m^0 + v_m^0 \tau_m^0 + \varepsilon_m^0 \quad (5)$$

donde:

$p_m^0$  = componente monetario del coste en el modo  $m$  (*sin* proyecto),

$v_m^0$  = valor del tiempo en el modo  $m$  (*sin* proyecto). Si consideramos que este valor no cambia *con* el proyecto, podremos expresarlo en adelante como  $v_m$ ,

$\tau_m^0$  = tiempo total de viaje en el modo  $m$  (*sin* proyecto), y

$\varepsilon_m^0$  = valoración monetaria de la calidad de viajar en el modo  $m$  (*sin* proyecto).

En la situación *con* proyecto (que denotaremos por el superíndice  $I$ ), la variación en el excedente de los viajeros de alta velocidad procedentes de otros modos ya existentes puede expresarse como<sup>8</sup>

$$\sum_m (g_m^0 - g_m^I) q_m^0, \quad (6)$$

donde:

$q_m^0$  = viajes en alta velocidad realizados por los viajeros procedentes de los otros  $m$  modos de transporte.

$g_m^I = p^I + v_m \tau^I + \varepsilon_m^I$  = coste generalizado de viajar en alta velocidad para los viajeros procedentes de los otros modos.

$p^I$  es el precio medio de un viaje en alta velocidad, y  $\tau^I$  es la duración media de un viaje en alta velocidad.

<sup>6</sup> A partir de este momento suprimiremos el subíndice 1 para simplificar la notación.

<sup>7</sup> El ferrocarril convencional puede omitirse en los casos en los que el proyecto se refiera a la construcción de un nuevo trazado donde este modo no estuviese presente con anterioridad.

<sup>8</sup> Esta expresión, procedente de la denominada “regla de la mitad”, considera implícitamente que el cambio en el bienestar de cada viajero puede identificarse con el cambio que se produce en el último viajero que realiza el trayecto.

### Tráfico generado

A la variación calculada en la expresión anterior hay que sumar el excedente asociado a los nuevos viajes (realizados tanto por usuarios antiguos como nuevos) y que viene determinado por:

$$\sum_m \frac{1}{2} (g_m^0 - g_m^I) (q^I - q_m^0), \quad (7)$$

donde  $q^I$  son los viajes *totales* realizados en alta velocidad. Estos viajes están integrados por la suma del tráfico total desviado de los otros  $m$  modos,

$$Q^0 = \sum_m q_m^0,$$

y el tráfico generado, que estimaremos como una proporción ( $\alpha$ ) del tráfico desviado,

$$q^I - Q^0 = \alpha Q^0 = \alpha \sum_m q_m^0,$$

de forma que:

$$q^I = (1 + \alpha) Q^0. \quad (8)$$

#### 3.1.2.2 Cálculo del (cambio en el) excedente de los operadores

El cambio en el excedente de los productores viene dado por la diferencia de ingresos de los operadores *con* y *sin* proyecto, menos el coste de operar y de mantener la línea de alta velocidad, más los costes evitables asociados a la supresión de servicios en el modo  $m$  (como consecuencia del tráfico desviado hacia la alta velocidad):

$$\sum_m (p^I q^I - p_m^0 q_m^0 + C_m^0 - C^I), \quad (9)$$

donde  $C_m^0$  son los costes evitables en el modo  $m$  y  $C^I$  los costes operativos y de mantenimiento de la alta velocidad.

En general los costes evitables dependen de las características de cada modo, del nivel de competencia y del volumen de tráfico desviado. Por ello resulta posible formularlos de forma simplificada como:

$$C_m^0 = c_m q_m^0 \quad (10)$$

donde  $c_m$  es el coste unitario (por viaje) ahorrado en el modo  $m$ , el cual supondremos que no varía como consecuencia del proyecto (en comparación a la situación *sin* el proyecto). Además, como simplificación importante, también consideraremos que todos los operadores en los modos alternativos de transporte obtienen beneficios normales en el corredor y todos sus costes son recuperables.

Por otra parte, los costes operativos y de mantenimiento podrían expresarse como:

$$C^I = I^M + c^A q^I + (c^O + c^M) N, \quad (11)$$

donde:

$I^M$  = costes de mantenimiento de la infraestructura, generalmente fijos con relación al volumen total de tráfico,

$c^A$  = coste unitario (por viajero) de adquisición del material rodante, neto del valor residual,<sup>9</sup>

$c^O$  = coste unitario (por tren) de operación del material rodante,

$c^M$  = coste unitario (por tren) de mantenimiento del material rodante, y

$N$  = número de trenes necesarios para satisfacer la demanda cada año.

El número de trenes en operación ( $N$ ) constituye un parámetro fundamental en la determinación de la oferta de servicios de transporte, y varía a medida que lo haga la demanda. Para el cálculo de  $N$  debe tenerse en cuenta tanto la capacidad de los trenes (que consideraremos constante), como la frecuencia diaria de los servicios (que consideraremos homogénea durante todo el año).

Por tanto, si  $\bar{q}_e = \lambda \bar{q}$  es la ocupación media efectiva de cada tren (donde  $\lambda$  es el factor de carga y  $\bar{q}$  es el número de plazas) y  $H$  son las horas de operación diarias, entonces el número total de servicios diarios durante un año en cada sentido se obtiene aproximadamente del cociente  $(q^I / 365) / \bar{q}_e$ , por lo que la frecuencia ( $F$ ) viene dada por

$$F = \frac{(q^I / 365) / \bar{q}_e}{H}.$$

De esta forma, el número de trenes necesarios para poder servir una demanda anual de  $q^I$  viajeros viene dado por el producto  $\tau^I F$ , esto es, usando la expresión (8):

$$N[q^I] = \frac{\tau^I}{365H\bar{q}_e} q^I = \frac{\tau^I}{365H\bar{q}_e} (1 + \alpha) Q^0 = N[Q^0]. \quad (12)$$

### 3.1.2.3 Cálculo del (cambio en el) beneficio social

De acuerdo con (3), el cambio en el beneficio social viene dado por la suma de los cambios en el excedente de los usuarios y de los operadores, es decir, la suma de las expresiones (6), (7) y (9):

$$\sum_m (g_m^0 - g_m^I) q_m^0 + \sum_m \frac{1}{2} (g_m^0 - g_m^I) (q^I - q_m^0) + \sum_m (p^I q^I - p_m^0 q_m^0 + C_m^0 - C^I) \quad (13)$$

Desarrollando el primer sumando de la expresión anterior se obtiene:

$$\sum_m [(p_m^0 - p^I) + v_m (\tau_m^0 - \tau^I)] q_m^0,$$

donde se considera, para simplificar, que el proyecto no altera significativamente las valoraciones monetarias de la calidad asociada a viajar en los distintos modos, esto es,

$$\sum_m (\varepsilon_m^0 - \varepsilon_m^I) = 0.$$

<sup>9</sup> Aunque este coste debería formularse como un coste *por tren* (equivalente al precio de adquisición de cada tren por parte del operador), la dificultad de obtener valores reales de estos precios de compra (los cuales se negocian individualmente con el fabricante e incluyen, a menudo, una parte de los costes de mantenimiento), sugiere la posibilidad de calcularlos como coste por pasajero, lo cual simplifica los cálculos y podría interpretarse como una especie de “leasing” o alquiler.

Sustituyendo el resultado anterior en la expresión (13) y simplificando, el cambio en el beneficio social neto puede reescribirse como:

$$\sum_m v_m (\tau_m^0 - \tau^l) q_m^0 + \sum_m \left[ \frac{1}{2} (g_m^0 - g_m^l) + p^l \right] (q^l - q_m^0) + \sum_m C_m^0 - C^l, \quad (14)$$

mostrando que dicho cambio se compone de tres elementos: ahorros de tiempo en el tráfico desviado, el valor del nuevo tráfico generado y los ahorros de recursos en los modos que pierden tráfico.

Finalmente, teniendo en cuenta que  $\sum_m (q^l - q_m^0) = \alpha \sum_m q_m^0$  y desarrollando el sumando intermedio, la expresión anterior conduce a:

$$\sum_m v_m (\tau_m^0 - \tau^l) q_m^0 + \alpha \sum_m \left[ \frac{1}{2} (p_m^0 - p^l) + p^l \right] q_m^0 + \frac{\alpha}{2} \sum_m v_m (\tau_m^0 - \tau^l) q_m^0 + \sum_m C_m^0 - C^l,$$

e incorporando ahora las expresiones de costes (10) y (11) obtenemos finalmente:

$$\begin{aligned} \Delta BS &= \Delta EC + \Delta EP = \\ &= \left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right) \sum_m v_m (\tau_m^0 - \tau^l) q_m^0 + \left( \frac{\alpha}{2} \right) \sum_m (p_m^0 + p^l) q_m^0 + \\ &+ \sum_m c_m q_m^0 - I^M - \left( c^A + \frac{(c^O + c^M) \tau^l}{365 H \bar{q}_e} \right) (1 + \alpha) \sum_m q_m^0 \end{aligned} \quad (15)$$

### 3.1.2.4 Determinación de la demanda que iguala a cero el VAN social

El último paso de los cálculos consiste en reemplazar la expresión anterior en (4) igualarla a cero. Para ilustrar mejor los resultados, consideraremos primero un caso particular (donde el tráfico desviado procede únicamente de un solo modo de transporte) para, posteriormente, generalizar sus resultados. Así, supongamos primero para simplificar que sólo hay un modo de transporte alternativo (por ejemplo, el avión,  $m = a$ ). En este caso, la expresión (15) se simplifica a:

$$\Delta BS = \left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right) v_a (\tau_a^0 - \tau^l) q_a^0 + \frac{\alpha}{2} (p_a^0 + p^l) q_a^0 + c_a q_a^0 - I^M - \left( c^A + \frac{(c^O + c^M) \tau^l}{365 H \bar{q}_e} \right) (1 + \alpha) q_a^0$$

De acuerdo con (4),  $\text{VAN}_s = 0$  requiere que  $I_0(1+i) = \Delta BS$ . Por tanto, despejando a partir de la expresión anterior, se obtendría:

$$q_a^0 = \frac{I_0(1+i) + I^M}{\left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right) v_a (\tau_a^0 - \tau^l) + \frac{\alpha}{2} (p_a^0 + p^l) + c_a - (1 + \alpha) \left( c^A + \frac{(c^O + c^M) \tau^l}{365 H \bar{q}_e} \right)}, \quad (16)$$

lo que permite determinar el valor mínimo del tráfico de alta velocidad procedente del modo avión que hace socialmente rentable este proyecto. Como es lógico, a partir del valor de  $q_a^0$  puede obtenerse sin dificultad el tráfico generado (mediante el parámetro  $\alpha$ ) y la demanda total.

En el caso general con  $m$  modos de transporte, el problema consiste en determinar el valor de  $\sum_m q_m^0$  en (15) tal que  $I_0(1+i) = \Delta BS$ . Para ello resulta necesario introducir algún supuesto adicional sobre la relación entre los distintos valores del tráfico desviado,  $q_m^0$ , de manera los  $m$  valores queden reducidos a uno sólo.<sup>10</sup>

Entre las distintas alternativas posibles podríamos considerar por ejemplo, que el tráfico desviado puede expresarse en relación a uno de los modos. Así, tomando de nuevo como referencia el avión ( $a$ ), tendríamos

$$Q^0 = q_a^0 + q_b^0 + q_c^0 + q_f^0 = q_a^0 + \beta_b q_a^0 + \beta_c q_a^0 + \beta_f q_a^0 = (1 + \beta_b + \beta_c + \beta_f) q_a^0 \quad (17)$$

donde los distintos parámetros ( $\beta$ ), que reflejan la relación entre los distintos tráficos desviados, deben determinarse endógenamente en función de las “cuotas de mercado” de cada modo en su relación con el ferrocarril de alta velocidad. De esta forma, puede obtenerse finalmente sustituyendo en (15) la siguiente expresión del cambio en el bienestar social:

$$\begin{aligned} \Delta BS = & \\ & = \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \left\{ v_a (\tau_a^0 - \tau^l) + v_b (\tau_b^0 - \tau^l) \beta_b + v_c (\tau_c^0 - \tau^l) \beta_c + v_f (\tau_f^0 - \tau^l) \beta_f \right\} q_a^0 + \\ & + \left(\frac{\alpha}{2}\right) \left\{ (p_a^0 + p^l) + (p_b^0 + p^l) \beta_b + (p_c^0 + p^l) \beta_c + (p_f^0 + p^l) \beta_f \right\} q_a^0 + \\ & + \left\{ c_a + c_b \beta_b + c_c \beta_c + c_f \beta_f \right\} q_a^0 - \\ & - I^M - (1 + \alpha) \left( c^A + \frac{(c^O + c^M) \tau^l}{365 H \bar{q}_e} \right) (1 + \beta_b + \beta_c + \beta_f) q_a^0 \end{aligned}$$

Y despejando a partir de  $I_0(1+i) = \Delta BS$ :

$$q_a^0 = \left\{ I_0(1+i) + I^M \right\} \left/ \left\{ \begin{aligned} & \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \left[ v_a (\tau_a^0 - \tau^l) + v_b (\tau_b^0 - \tau^l) \beta_b + v_c (\tau_c^0 - \tau^l) \beta_c + v_f (\tau_f^0 - \tau^l) \beta_f \right] \\ & + \frac{\alpha}{2} \left[ (p_a^0 + p^l) + (p_b^0 + p^l) \beta_b + (p_c^0 + p^l) \beta_c + (p_f^0 + p^l) \beta_f \right] + \\ & \left[ c_a + c_b \beta_b + c_c \beta_c + c_f \beta_f \right] - (c^A + c^O + c^M) \frac{(1 + \alpha) \tau^l}{365 H \bar{q}_e} (1 + \beta_b + \beta_c + \beta_f) \end{aligned} \right\}$$

cuya interpretación es análoga a la realizada para la expresión (16).

<sup>10</sup> De lo contrario la ecuación  $VAN_S = 0$  tendría infinitas soluciones.

### 3.1.3 El modelo general de T períodos

Consideremos ahora el caso definido en la expresión (1) en el que el cambio en el beneficio social como consecuencia del proyecto se produce a lo largo de T períodos. Repitiendo los pasos seguidos hasta ahora podemos generalizar el análisis realizado en la sección anterior, simplemente introduciendo, a partir de la expresión (15), un subíndice  $t$  en las variables que cambian a lo largo del tiempo. De esta forma, el cambio en el bienestar social en el año  $t$  viene dado por:

$$\begin{aligned}\Delta BS_t &= \\ &= \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \sum_m v_m (\tau_m^0 - \tau^I) q_{mt}^0 + \\ &+ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \sum_m (p_m^0 + p^I) q_{mt}^0 + \\ &+ \sum_m c_m q_{mt}^0 - \\ &- I^M - \left(c^A + \frac{(c^O + c^M)\tau^I}{365H\bar{q}_e}\right) (1 + \alpha) \sum_m q_{mt}^0\end{aligned}$$

El principal supuesto simplificador que subyace en la expresión anterior es que todos los parámetros del modelo permanecen constantes a lo largo del tiempo con la excepción del tráfico, que consideraremos que aumenta a una tasa constante ( $\theta$ ). De esta forma,  $q_{mt}^0$  representa los viajeros desviados hacia la alta velocidad (procedentes del modo  $m$ ) en el período  $t$ , tal que

$$q_{mt+1}^0 = q_{mt}^0 (1 + \theta). \quad (18)$$

A partir de la expresión anterior, podemos construir la siguiente:

$$\begin{aligned}\sum_{t=T'+1}^T \frac{\Delta BS_t}{(1+i)^t} &= \\ &= \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \sum_m v_m (\tau_m^0 - \tau^I) \sum_{t=T'+1}^T \frac{q_{mt}^0}{(1+i)^t} + \\ &+ \left(\frac{\alpha}{2}\right) \sum_m (p_m^0 + p^I) \sum_{t=T'+1}^T \frac{q_{mt}^0}{(1+i)^t} + \\ &+ \sum_m c_m \sum_{t=T'+1}^T \frac{q_{mt}^0}{(1+i)^t} - \\ &- \sum_{t=T'+1}^T \frac{I^M}{(1+i)^t} - \\ &-(1 + \alpha) \left(c^A + \frac{(c^O + c^M)\tau^I}{365H\bar{q}_e}\right) \sum_m \sum_{t=T'+1}^T \frac{q_{mt}^0}{(1+i)^t}\end{aligned} \quad (19)$$

donde

$$\sum_{t=T'+1}^T \frac{q_{mt}^0}{(1+i)^t} = \frac{q_{mT'+1}^0}{(1+i)^{T'+1}} \left[ 1 + \left( \frac{1+\theta}{1+i} \right) + \left( \frac{1+\theta}{1+i} \right)^2 + \dots + \left( \frac{1+\theta}{1+i} \right)^{T-(T'+1)} \right]$$

al tratarse de una suma de términos de una progresión geométrica de razón  $(1+\theta)/(1+i)$ , la expresión anterior equivale a:

$$\sum_{t=T'+1}^T \frac{q_{mt}^0}{(1+i)^t} = \left[ \frac{\left( \frac{1+\theta}{1+i} \right)^{T-T'-1} - 1}{\left( \frac{1+\theta}{1+i} \right) - 1} \right] \frac{q_{mT'+1}^0}{(1+i)^{T'+1}} = \left( \frac{(1+\theta)^{T-T'-1} - (1+i)^{T-T'-1}}{(\theta-i)(1+i)^{T-1}} \right) q_{mT'+1}^0 = \gamma q_{mT'+1}^0.$$

expresión que debe ser sustituida en (19).

Finalmente, y a partir de (1), tenemos que para que VANS =0 debe cumplirse que

$$I_0 = \sum_{t=T'+1}^T \frac{\Delta BS_t}{(1+i)^t}, \text{ es decir:}$$

$$\begin{aligned} I_0 &= \sum_{t=T'+1}^T \frac{\Delta BS_t}{(1+i)^t} = \\ &= \left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right) \left[ v_a(\tau_a^0 - \tau^l) + v_b(\tau_b^0 - \tau^l)\beta_b + v_c(\tau_c^0 - \tau^l)\beta_c + v_f(\tau_f^0 - \tau^l)\beta_f \right] \gamma q_{aT'+1}^0 + \\ &+ \left( \frac{\alpha}{2} \right) \left[ (p_a^0 + p^l) + (p_b^0 + p^l)\beta_b + (p_c^0 + p^l)\beta_c + (p_f^0 + p^l)\beta_f \right] \gamma q_{aT'+1}^0 + \\ &+ \left[ c_a + c_b\beta_b + c_c\beta_c + c_f\beta_f \right] \gamma q_{aT'+1}^0 - \\ &- \sum_{t=T'+1}^T \frac{I^M}{(1+i)^t} - \\ &- (1+\alpha) \left( c^A + \frac{(c^O + c^M)\tau^l}{365H\bar{q}_e} \right) (1 + \beta_b + \beta_c + \beta_f) \gamma q_{aT'+1}^0 \end{aligned}$$

Y despejando  $q_{aT'+1}^0$  se obtiene el valor de la demanda (desviada del avión) inicial (en el primer período de operación) que iguala a cero el VAN social:

$$q_{aT'+1}^0 = \left\{ I_0 + \sum_{t=T'+1}^T \frac{I^M}{(1+i)^t} \right\} / \left\{ \begin{aligned} &\left( 1 + \frac{\alpha}{2} \right) \left[ v_a(\tau_a^0 - \tau^l) + v_b(\tau_b^0 - \tau^l)\beta_b + v_c(\tau_c^0 - \tau^l)\beta_c + v_f(\tau_f^0 - \tau^l)\beta_f \right] \gamma \\ &+ \frac{\alpha}{2} \left[ (p_a^0 + p^l) + (p_b^0 + p^l)\beta_b + (p_c^0 + p^l)\beta_c + (p_f^0 + p^l)\beta_f \right] \gamma + \\ &\left[ c_a + c_b\beta_b + c_c\beta_c + c_f\beta_f \right] \gamma - (1+\alpha) \left( c^A + \frac{(c^O + c^M)\tau^l}{365H\bar{q}_e} \right) (1 + \beta_b + \beta_c + \beta_f) \gamma \end{aligned} \right\}$$

Tal como veremos a continuación, una vez obtenido este valor resulta posible calcular sin dificultad la demanda desviada total, la demanda generada y todos los restantes elementos del modelo.

### 3.1.4 Implementación del modelo: un ejemplo

No resulta particularmente difícil adaptar las expresiones anteriores al estudio de un corredor concreto de alta velocidad ferroviaria. En otros trabajos (Campos y De Rus 2009, [12]) se han realizado simulaciones que permiten representar la mayoría de los parámetros anteriores a partir de valores relativamente sencillos. La Tabla 3 resume, a modo de referencia, los principales valores utilizados para implementar la expresión anterior a un corredor-tipo simplificado con el objeto de mostrar la viabilidad del modelo para obtener la demanda mínima de referencia. En particular, y con los valores propuestos en dicha tabla y una tasa de descuento del 5%, se obtienen los siguientes resultados con respecto a la demanda inicial (en el momento en que comienza la explotación,  $t = 6$ ) que, como mínimo, garantiza un VAN social igual a cero.

<i>Tráfico desviado:</i>	13.067.586 viajeros
<i>  procedentes del avión:</i>	2.613.517 viajeros
<i>  procedentes del autobús:</i>	130.676 viajeros
<i>  procedentes del coche:</i>	522.703 viajeros
<i>  procedente del tren convencional:</i>	9.800.689 viajeros
<i>Tráfico generado:</i>	1.306.759 viajeros
<b>Demanda total:</b>	<b>14.374.344 viajeros</b>

Las cifras anteriores indican que si la demanda total es inferior a 14,3 millones de viajeros el primer año el proyecto no será socialmente rentable. Es evidente que se trata de una cifra aproximada, condicionada por los supuestos realizados acerca de los parámetros del modelo. A pesar de ello, el análisis realizado resulta muy útil, particularmente en el contexto del PEIT, ya que permite – una vez mejorado y adaptado a cada corredor en concreto – ofrece un procedimiento muy simple para clasificar y ordenar las posibles actuaciones a realizar en el horizonte 2009-2020.

Como es lógico, los cálculos realizados se modifican si también lo hacen los parámetros de referencia. Por ejemplo, si cambiamos los supuestos realizados con respecto al origen del tráfico desviado – asumiendo, por ejemplo, que el ferrocarril de alta velocidad capta la mayor parte de su tráfico desviado del transporte aéreo (95%) y de la carretera (coche, 4%; autobús, 1%),<sup>11</sup> la demanda total necesaria se incrementaría hasta 16,9 millones de viajeros, de los cuales 14,6 millones procederían del avión. Este incremento se debe a que al existir un menor ahorro de tiempo en el avión que en el tren convencional sería necesario un mayor número de viajeros para compensar los costes sociales del proyecto.

<sup>11</sup> Éste sería el caso de una línea de alta velocidad de nuevo trazado en una ruta en la que previamente no existía ferrocarril convencional.

Parámetro	Notación	Valor	Unidad de medida
Longitud de la línea	<b>L</b>	500	Kilómetros
Año de finalización de la construcción	<b>T'</b>	5	Año
Año de finalización del proyecto	<b>T</b>	40	Año
Capacidad media de cada tren	$\bar{q}$	350	Plazas
Factor de ocupación	$\lambda$	80%	%
Horas diarias de operación	<b>H</b>	18	Horas
Coste unitario de construcción por kilómetro	<b><i>ckm</i></b>	20.000.000	€/km
Proporción de valor residual de la infraestructura	<b><math>\delta</math></b>	10	%
Coste unitario de mantenimiento de la infraestructura	<b><i>ckm<sup>I</sup></i></b>	35.000	€/km
Coste unitario de adquisición del material rodante (por pasajero)	<b><i>c<sup>A</sup></i></b>	30	€/pasajero
Coste unitario de operación del material rodante (por tren)	<b><i>c<sup>O</sup></i></b>	18.500.000	€/tren
Coste unitario de mantenimiento del material rodante (por tren)	<b><i>c<sup>I</sup></i></b>	1.000.000	€/tren
Precio medio de un viaje en tren de alta velocidad (sólo ida)	<b><i>p<sub>I</sub></i></b>	88,5	€
Precio medio de un viaje en avión (sólo ida)	<b><i>p<sub>a</sub></i></b>	77	€
Precio medio de un viaje en autobús (sólo ida)	<b><i>p<sub>b</sub></i></b>	28	€
Precio medio (coste operativo) de un viaje en coche (sólo ida)	<b><i>p<sub>c</sub></i></b>	68,5	€
Precio medio de un viaje en tren convencional (sólo ida)	<b><i>p<sub>f</sub></i></b>	64,25	€
Costes medios evitables (avión)	<b><i>c<sub>a</sub></i></b>	77	€
Costes medios evitables (autobús)	<b><i>c<sub>b</sub></i></b>	28	€
Costes medios evitables (coche)	<b><i>c<sub>c</sub></i></b>	68,5	€
Costes medios evitables (ferrocarril convencional)	<b><i>c<sub>f</sub></i></b>	64,25	€

**Tabla 4. Resumen de los valores de los principales parámetros del modelo**

Parámetro	Notación	Valor	Unidad de medida
Tiempo total de viaje en tren de alta velocidad	$\tau^l$	2,77	Horas
Tiempo total de viaje en avión	$\tau_a$	2,94	Horas
Tiempo total de viaje en autobús	$\tau_b$	6,5	Horas
Tiempo total de viaje en coche	$\tau_c$	5,0	Horas
Tiempo total de viaje en ferrocarril convencional	$\tau_f$	4,15	Horas
Valor del tiempo (tren de alta velocidad)	$v^l$	15	€ / hora
Valor del tiempo (avión)	$v_a$	15	€ / hora
Valor del tiempo (autobús)	$v_b$	15	€ / hora
Valor del tiempo (coche)	$v_c$	15	€ / hora
Valor del tiempo (tren convencional)	$v_f$	15	€ / hora
Tráfico desviado desde avión	$s_a$	20	%
Tráfico desviado desde autobús	$s_b$	1	%
Tráfico desviado desde coche	$s_c$	4	%
Tráfico desviado desde ferrocarril convencional	$s_f$	75	%
Coefficiente de tráfico generado sobre desviado	$\alpha$	10	%
Tasa anual de crecimiento de la demanda	$\theta$	3	%

**Tabla 4. Resumen de los valores de los principales parámetros del modelo (cont.)**

Finalmente, de manera análoga y partiendo de los cálculos iniciales, resulta posible realizar diferentes tipos de análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros del modelo, algunos de los cuales se resumen en el cuadro siguiente.

	<b>Tráfico desviado</b>	<b>Tráfico generado</b>	<b>Demanda total</b>
<b>Situación inicial</b>	<b>13.067.585</b>	<b>1.306.759</b>	<b>14.374.344</b>
Incremento de la capacidad de los trenes ( $\bar{q} = 450$ plazas)	10.393.224	1.039.322	11.432.547
Reducción del factor de ocupación ( $\lambda = 60\%$ )	21.281.900	2.128.190	23.410.090
Incremento del coste de construcción (ckm = 30 mill.)	19.443.431	1.944.343	21.387.774
Reducción del coste de adquisición de trenes ( $c^A = 15$ €/pas.)	8.210.666	821.066	9.031.733
Incremento del valor del tiempo ( $v = 30$ €/h)	7.801.363	780.136	8.581.500
Reducción de la tasa de crecimiento de la demanda ( $\theta = 1\%$ )	17.113.024	1.711.302	18.824.326

#### 4 CONCLUSIONES

Es muy probable que el ferrocarril de alta velocidad se convierta en España, a lo largo de los próximos años, en el modo dominante de transporte de viajeros a media y larga distancia en varios corredores. Esto se debe a que, junto a su indiscutible éxito tecnológico, la alta velocidad ferroviaria aporta, desde el punto de vista económico, grandes beneficios a la sociedad en su conjunto, cuantificados fundamentalmente en la reducción de tiempos de viaje, el aumento de la fiabilidad, comodidad y seguridad en el transporte, la reducción de la congestión y los accidentes en los modos alternativos, así como aquellos que se derivan de la capacidad de la red convencional que queda disponible para otros tráficos, como por ejemplo el de mercancías.

En este trabajo hemos planteado la cuestión de cuándo y en qué casos los beneficios sociales mencionados son mayores que los costes en los que sociedad incurre por llevar a cabo la construcción y explotación de las líneas de alta velocidad. Dicho con otras palabras, la pregunta no es si estamos a favor o no de la alta velocidad, sino si estamos dispuestos a pagar sus costes de construcción y explotación.

Debido a que los recursos disponibles son limitados y resulta necesario elegir entre usos alternativos de los mismos, resulta imprescindible contar con herramientas que permitan evaluar *ex ante* la rentabilidad social de las inversiones. Esto no significa necesariamente que determinados proyectos no se lleven a cabo, sino que su periodificación temporal se realice en función de la valoración real de los usuarios. Construir infraestructuras costosas cuyo nivel de demanda sea excesivamente bajo supone en muchos casos no sólo un despilfarro notable de recursos sino un compromiso futuro de financiación de déficits que pueden poner en peligro otro tipo de inversiones.

En este trabajo hemos mostrado que la evaluación económica de los proyectos de inversión permite comparar a través de técnicas relativamente sencillas los beneficios que aportan a la sociedad distintos tipos de intervención pública en los mercados de transporte con el coste de oportunidad de los recursos utilizados en dichas intervenciones. De esta manera la propia sociedad dispondrá de mayor información para tomar las decisiones más acertadas. Por esta razón, las principales recomendaciones que se deducen de este trabajo son dos. En primer lugar, se debería reforzar el papel del análisis económico de los nuevos proyectos de inversión en infraestructura de alta velocidad ferroviaria, los cuales se están construyendo con una aportación significativa de fondos nacionales y comunitarios. La alta velocidad ferroviaria no es buena ni mala en un sentido global. Hay proyectos socialmente rentables y otros que no lo son, y los economistas pueden ayudar a la identificación de aquellos por los que merece la pena dejar de atender otras necesidades sociales a las que irremediablemente habrá habido que renunciar para llevarlos a cabo. Por otra parte, existe un campo de colaboración importante entre la economía y la ingeniería en el diseño de modelos de evaluación de proyectos. La determinación práctica del coste de oportunidad requiere de mediciones y cuantificaciones técnicas que a menudo sólo son conocidas por expertos del sector. En la medida en que dichos modelos resulten más precisos los proyectos de alta velocidad ferroviaria no sólo serán técnicamente exitosos sino también social y económicamente deseables.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor agradece la inestimable ayuda en la preparación de los datos de José Francisco Expósito Concepción (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria). Parte del material de este trabajo procede del proyecto “Evaluación socioeconómica y financiera de proyectos de transporte” (PT2007-001-IAPP), financiado por el CEDEX (Ministerio de Fomento). Puede obtenerse más información sobre este proyecto en [www.evaluaciondeproyectos.es](http://www.evaluaciondeproyectos.es)

## REFERENCIAS

- [1] DE RUS, G.: “La medición de la rentabilidad social de las infraestructuras de transporte”, *Investigaciones Regionales*, 2009, 14, 187-210.
- [2] ASCHAUER, D.: “Is public expenditure productive?”, *Journal of Monetary Economics*, 1989, 23(2), 177-200.
- [3] GRAMLICH, E.: “Infrastructure investment: a review essay”, *Journal of Economic Literature*, 1994, 32, 1176-1196.
- [4] CAMPOS, J. y G. DE RUS: “Dotación de infraestructuras y política europea de transporte”, *Papeles de Economía Española*, 2002, 91, 169-181.
- [5] CAMPOS, J. y G. DE RUS: “Some stylized facts about high-speed rail: A review of HSR experiences around the world”, *Transport Policy*, 2009, 16, 19-28.
- [6] DE RUS, G. y G. NOMBELA: “Is the investment in high speed rail socially profitable?”, *Journal of Transport Economics and Policy*, 2007.
- [7] DE RUS, G. y C. NASH: ¿En qué circunstancias está justificado invertir en líneas de alta velocidad ferroviaria? Documento de trabajo. Fundación BBVA. 2009.
- [8] CAMPOS, J.: “Spain: the end of an era”, en Gómez-Ibáñez, J. y De Rus, G. (eds.) *Competition in Railways*, Edward Elgar. New York.
- [9] MINISTERIO DE FOMENTO: *Plan Sectorial del Transporte por Ferrocarril 2005-2012*. Disponible en [www.mfom.es](http://www.mfom.es). 2007.
- [10] ADIF: *Financiación Europea de las Líneas Europeas de Alta Velocidad*. Dirección General Económico Financiera. Diciembre de 2008.
- [11] DE RUS, G.: *Análisis Coste-Beneficio*. 2008. Editorial Ariel. Madrid.
- [12] CAMPOS, J. y G. DE RUS: “El coste de una línea de alta velocidad: una simulación”. Documento de Trabajo. Fundación BBVA. 2009.