



Modelo Nacional de Transportes de España

**Diseño general del
Modelo Nacional de
Transportes**

Abril de 2021

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y MARCO GENERAL.....	6
1.1	Software de modelización	6
1.2	Abstracción del sistema de transporte.....	6
1.2.1	Abstracción del sistema territorial.....	7
1.2.2	Abstracción de la red de transporte.....	9
1.2.3	Elementos de conexión	10
1.3	Prerrequisitos generales del modelo.....	11
1.4	Zonificación.....	12
1.5	Red de transporte.....	14
1.5.1	Red de carreteras.....	14
1.5.2	Red de ferrocarril	16
1.5.3	Red aérea y marítima	18
2	DISEÑO DEL MODELO DE VIAJEROS	20
2.1	Introducción	20
2.1.1	Premisas básicas de modelización	20
2.2	Zonificación.....	21
2.2.1	Ámbito nacional.....	21
2.2.2	Ámbito internacional	23
2.2.3	Zonas multimodales.....	23
2.3	Obtención de las matrices de viajeros	24
2.3.1	Matrices de movilidad interprovincial	24
2.3.1	Ajustes de las matrices de movilidad interprovincial	25
2.3.2	Segmentación de la demanda	26
2.3.3	Desagregación de la demanda por zonas de transporte.....	28
2.4	Oferta de servicios de transporte público.....	29
2.4.1	Oferta de autobús interprovincial	29
2.4.2	Oferta modo aéreo	30
2.4.3	Oferta de ferris de pasajeros	30
2.5	Estructura del modelo de viajeros	31
2.6	Modelo de generación	32
2.6.1	Recopilación de variables socioeconómicas	32
2.6.2	Demanda inducida.....	39
2.7	Modelo de distribución de viajes	40
2.7.1	Introducción.....	40
2.7.2	Formulación del modelo de distribución	41
2.8	Modelo de reparto modal.....	42
2.8.1	Introducción.....	42
2.8.2	Los modos de transporte	43
2.8.3	La estructura del modelo.....	43
2.8.4	Variables explicativas	44
2.8.5	Consideración de los costes de viaje.....	45
2.8.6	Valor del tiempo	45
2.8.7	Cálculo de demanda inducida por cambios en el sistema de transporte	46
2.9	Modelo de asignación de viajeros.....	47

2.9.1	<i>Metodología implementada</i>	47	3.6	Modelos de distribución de mercancías	86
2.9.2	<i>Consideración de la capacidad de la oferta de transporte</i> ...	47	3.6.1	<i>Factor de crecimiento simplemente acotado a origen</i>	88
2.10	Calibración y validación de los modelos de viajeros	50	3.6.2	<i>Factor de crecimiento simplemente acotado a destino</i>	88
2.10.1	<i>Modelos de generación y distribución</i>	50	3.6.3	<i>Factor de crecimiento doblemente acotado</i>	89
2.10.2	<i>Modelo de reparto modal</i>	53	3.7	Modelos de reparto modal y asignación de mercancías	90
2.10.1	<i>Modelos de asignación</i>	56	3.7.1	<i>Periodo de simulación</i>	90
2.10.1	<i>Validación del modelo</i>	56	3.7.2	<i>Definición de las funciones de utilidad y coste generalizado</i>	91
2.10.2	<i>Prueba de realismo</i>	58	3.7.3	<i>Modo carretera</i>	97
3	DISEÑO DEL MODELO DE MERCANCÍAS	60	3.7.4	<i>Modo ferrocarril</i>	102
3.1	Zonificación.....	60	3.7.5	<i>Modo marítimo</i>	106
3.2	Clasificación de las mercancías.....	63	3.7.6	<i>Modo aéreo</i>	112
3.3	Construcción de las matrices de demanda de mercancías	64	3.7.7	<i>Implementación de las formulaciones en Visum</i>	116
3.3.1	<i>Matriz de etapas modo carretera</i>	64	3.8	Calibración y validación de los modelos de mercancías	121
3.3.2	<i>Matriz de etapas modo ferrocarril</i>	65			
3.3.3	<i>Matriz de etapas modo marítimo</i>	68			
3.3.4	<i>Matriz de etapas modo aéreo</i>	69			
3.3.5	<i>Matriz de viajes</i>	71			
3.3.6	<i>Resumen de la demanda en el año base 2017</i>	73			
3.4	Estructura del modelo de mercancías	77			
3.5	Modelos de generación de mercancías.....	77			
3.5.1	<i>Zonas internas</i>	78			
3.5.2	<i>Zonas externas</i>	85			
3.5.3	<i>Zonas portuarias</i>	85			

Índice de tablas

Tabla 1.	Valoración características software comerciales	6	Tabla 27.	Análisis de sensibilidad y elasticidad del modelo frente a una reducción del 10% en los tiempos de viaje en vehículo privado ..	59
Tabla 2.	Zonificación del MNT. Zonas de ámbito nacional	12	Tabla 28.	Análisis de sensibilidad y elasticidad del modelo frente a una reducción del 10% en los tiempos de viaje en tren	59
Tabla 3.	Zonificación del Modelo Nacional de Transportes. Zonas de ámbito internacional.....	13	Tabla 29.	Zonas portuarias de intercambio modal marítimo - terrestre.....	60
Tabla 4.	Parámetros de la red de carreteras.....	15	Tabla 30.	Zonificación del MNT. Zonas de intercambio modal carretera - ferrocarril	61
Tabla 5.	Categorías de carreteras.....	15	Tabla 31.	Clasificación de mercancías propuesta para el MNT	63
Tabla 6.	Parámetros de la red de ferrocarril.....	17	Tabla 32.	Variables seleccionadas en los modelos de producción de zonas internas	81
Tabla 7.	Número de puertos y aeropuertos incluidos en el Modelo.	18	Tabla 33.	Variables seleccionadas en los modelos de atracción de zonas internas	81
Tabla 8.	Aeropuertos y helipuertos nacionales.....	18	Tabla 34.	Modelos de producción. Zonas Internas.....	82
Tabla 9.	Puertos nacionales.	19	Tabla 35.	Modelos de atracción. Zonas Internas.....	83
Tabla 10.	Zonificación del MNT. Zonas de ámbito nacional	23	Tabla 36.	Comparativa de tendencias entre producción de viajes estimada y evolución observada del transporte interior	84
Tabla 11.	Número de viajes por día promedio en Julio y Octubre.....	24	Tabla 37.	Valor del tiempo de las mercancías estimado	97
Tabla 12.	Reparto modal de los viajes	25	Tabla 38.	Correspondencia entre categorías de mercancía y tipos de vehículo por carretera	98
Tabla 13.	Reparto de desplazamientos por motivo	25	Tabla 39.	Correspondencia entre el tipo de mercancía y el tipo de tren (2017)	103
Tabla 14.	Reparto de desplazamientos por ocupación	27	Tabla 40.	Porcentaje de carga neta media en el retorno por tipo de tren.....	104
Tabla 15.	Reparto de desplazamientos por motivo	27	Tabla 41.	Equivalencia entre las categorías del MNT y las formas de presentación de las mercancías en el modo marítimo	107
Tabla 16.	Combinaciones de grupos de población y motivos de viaje	27	Tabla 42.	Costes de escala. Factores implicados en los calculos de las tasas y tarifas	111
Tabla 17.	Variables del modelo de generación atracción	37	Tabla 43.	Correspondencia entre el tipo de mercancía y el tipo de aeronave (a nivel nacional)	113
Tabla 18.	Ratios de generación calibrados por día tipo y estrato de demanda	38	Tabla 44.	Correspondencia entre el tipo de mercancía y el tipo de aeronave (a nivel internacional)	114
Tabla 19.	Parámetro α para cada estrato de demanda. Cualquier día tipo.	42			
Tabla 20.	Parámetro γ para cada estrato de demanda. Cualquier día tipo.	42			
Tabla 21.	Valor del tiempo para cada estrato de demanda.....	45			
Tabla 22.	Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo J99 .	50			
Tabla 23.	Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo O99	51			
Tabla 24.	Comparación observado modelado de reparto modal agregado. Día Tipo J99	54			
Tabla 25.	Validación de del modo tren. Día Tipo J99	57			
Tabla 26.	Comparación observado modelado de número de pasajeros en los 10 mayores aeropuertos.....	57			

Tabla 45. Cadenas multimodales definidas en Visum..... 119

Índice de figuras

Figura 1.	Abstracción del sistema territorial	8
Figura 2.	Abstracción de la red de transporte.....	9
Figura 3.	Abstracción de la red de transporte con conectores	10
Figura 4.	Esquema de la dimensión espacial del modelo y tipos de tráfico	20
Figura 5.	Zonificación interna del modelo de viajeros	22
Figura 6.	Demanda por día y tipo de viaje.....	26
Figura 7.	Distribución de viajes (en proporción respecto al total) de acuerdo con los estratos de demanda en día laborable de julio.....	28
Figura 8.	Esquema del flujo de trabajo.....	29
Figura 9.	Esquema de cuatro etapas (viajeros)	31
Figura 10.	Etapas del modelo de generación.....	32
Figura 11.	Ejemplo de ubicación de centroides según el reparto de población	33
Figura 12.	Densidad de empleos	33
Figura 13.	Densidad del potencial educativo	34
Figura 14.	Densidad del potencial turístico	34
Figura 15.	Densidad del potencial de viviendas secundarias	35
Figura 16.	PIB per cápita provincial. Año 2017. Fuente: INE.....	35
Figura 17.	Evolución del PIB per cápita	36
Figura 18.	Correlación entre el PIB y el volumen de viajeros.....	39
Figura 19.	Coeficiente de correlación lineal entre PIB y volúmenes de viaje a nivel provincial para distintos estratos de demanda.	40
Figura 20.	Etapas del modelo de generación.....	40
Figura 21.	Captura de pantalla de la parametrización en Visum. La función Logsum es introducida manualmente dentro de la cadena de procedimientos del modelo	42
Figura 22.	Etapas del modelo de reparto modal	43
Figura 23.	Estructura del modelo de elección discreta empleado	44
Figura 24.	Etapas del modelo de asignación.....	47
Figura 25.	Proceso de ajuste de tiempos de recorrido	48
Figura 26.	Selección de los arcos penalizados.....	48
Figura 27.	Factor de penalización.....	49
Figura 28.	Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo J99	51
Figura 29.	Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo O99	52
Figura 30.	Distribución de frecuencias de viajes totales clasificados por distancia. Contraste entre observado y modelado	52
Figura 31.	Diagrama de dispersión matriz OD interprovincial observada (estudio de movilidad) y modelada. Día Tipo J99.....	53
Figura 32.	Diagrama de dispersión matriz OD interprovincial. Detalle de celdas < 20,000 viajes. Día Tipo J99.....	53
Figura 33.	Histograma de distancias. Modo vehículo privado. Día Tipo J99...	55
Figura 34.	Histograma de distancias. Modo autobús. Día Tipo J99.....	55
Figura 35.	Histograma de distancias. Modo ferrocarril. Día Tipo J99	56
Figura 36.	Imagen ilustrativa del proceso de calibrado de la asignación del vehículo privado	56
Figura 37.	Localización de las zonas de intercambio modal marítimo - terrestres	61
Figura 38.	Localización de las zonas de intercambio modal carretera - ferrocarril.....	62
Figura 39.	Metodología seguida para obtener la matriz O-D de toneladas transportadas por ferrocarril.....	67
Figura 40.	Proceso metodológico para la obtención de la matriz de flujos por modo aéreo	70
Figura 41.	Estructura por bloques de las matrices de mercancías en el año base (2017)	74

Figura 42.	Resumen de la matriz total de viajes de mercancías “observada” en el año base (2017) por bloques. Unidad: toneladas/año	75
Figura 43.	Resumen de la matriz total de etapas de mercancías “observada” en el año base (2017) por bloques. Unidad: toneladas/año	76
Figura 44.	Esquema del modelo de “cuatro etapas” (mercancías)	77
Figura 45.	Submodelo de generación de mercancías	78
Figura 46.	Comparación entre la generación estimada por los modelos y la evolución del transporte (zonas internas)	84
Figura 47.	Resumen metodológico de los modelos de distribución de mercancías por bloques de la matriz de viajes	87
Figura 48.	Toneladas medias operadas por día de la semana	91
Figura 49.	Toneladas medias operadas por día y por trimestre	91
Figura 50.	Esquema de modos y sistemas de transporte	117
Figura 51.	Diagrama de flujo para las etapas de reparto modal y asignación en Visum	120

1 INTRODUCCIÓN Y MARCO GENERAL

El presente documento se enmarca dentro del proyecto “Encargo para la construcción, calibración y validación de un modelo nacional de transportes de viajeros y mercancías” (MNT) que INECO desarrolla para el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) y tiene por objetivo exponer las principales características del diseño del MNT.

El diseño se define teniendo en cuenta que el MNT debe ser una herramienta de apoyo a decisiones estratégicas y a largo plazo, siendo la robustez una de sus características principales.

El MNT se concibe como un **modelo de 4 etapas** centrado en la **movilidad interprovincial tanto de viajeros como de mercancías**. La modelización toma **2017 como año base de calibración**. Para el caso de viajeros se modelizan **los modos**: vehículo privado, ferrocarril, autobús, marítimo y aéreo. Por su parte, los modos de transporte modelizados para mercancías son: carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo.

Uno de los principales condicionantes a la hora de definir el proceso metodológico de detalle es la vinculación del modelo de flujos de mercancías con el modelo de flujos de viajeros.

Ambos sistemas se integran en las etapas de asignación, conjugando los tráficos de diferente naturaleza de tal forma que se representen adecuadamente los volúmenes reales.

1.1 SOFTWARE DE MODELIZACIÓN

Se ha seleccionado el **Visum como software de modelización** tras la valoración de cualitativa de los siguientes paquetes comerciales disponibles:

- TransCAD, desarrollado por Caliper
- EMME, desarrollado por INRO

- CUBE, desarrollado por Citilabs
- VISUM, desarrollado por PTV

Se ha analizado la adecuación de cada uno a las características del Modelo de Transporte Interprovincial de España y a las condiciones de contorno. En concreto se han valorado las siguientes características:

Tabla 1. Valoración características software comerciales

	CUBE	TransCAD	VISUM	EMME
Flexibilidad	Alta	Baja	Media	Baja
Adaptación de la modelización estratégica	Alta	Media	Alta	Media
Usabilidad y amigabilidad	Baja	Media	Alta	Alta
Entorno e integración	Baja	Baja	Alta	Baja

Fuente: Ineco

La evaluación conjunta de los diferentes aspectos permite vislumbrar ventajas en la utilización de VISUM como software para el desarrollo del Modelo Nacional de Transporte Interprovincial.

Adicionalmente se ha valorado positivamente la compatibilidad con otras herramientas de modelización en desarrollo a nivel europeo como el TRIMODE TRIMODE (Transport Integrated MODEL for Europe), que se está desarrollando en Visum.

1.2 ABSTRACCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE

La modelización y, en concreto, la modelización de sistemas de transporte consiste en la abstracción de los elementos de un sistema real mediante expresiones matemáticas que sean capaces de representar, en mayor o menor medida, las diferentes relaciones observadas. Cuanto mayor sea el nivel de

abstracción definido, la capacidad del modelo para representar el sistema real será más limitada. En contraposición, un modelo muy complejo, correspondiente a un nivel bajo de abstracción, será capaz de representar un mayor número de relaciones reales, pero la necesidad de información aumentará exponencialmente y la robustez del modelo se verá comprometida. Por ello, es crucial adecuar el nivel de abstracción de un modelo a los objetivos del mismo, ajustando la complejidad de la formulación a las necesidades del proyecto en cuestión.

1.2.1 ABSTRACCIÓN DEL SISTEMA TERRITORIAL

Los sistemas de transporte están íntimamente ligados al sistema socioeconómico y el sistema territorial de su ámbito. Por ello, en los procedimientos de modelización de transporte es necesario simplificar estas relaciones geográficas y socioeconómicas en un conjunto de elementos que actuarán como generadores y atractores de viajes. Estos elementos se denominan zonas de transporte (ZT o TAZ), y el conjunto de estas se denomina **zonificación**.

Tras la caracterización de las zonas mediante parámetros socioeconómicos, es posible realizar un nivel más de abstracción, representando cada zona por un único punto con atributos asociados que denominaremos **centroide**.

Por tanto, en el modelo, las diferentes zonas quedan representadas por un punto. Esto implica que cualquier actividad de transporte con origen y destino en la propia zona, queda fuera del marco de modelización. A estos flujos se les denomina *intrazonales* y, en los casos en que la modelización de estas actividades resulte de importancia, se recurre a procedimientos auxiliares externos al modelo.

La siguiente figura muestra el proceso de abstracción mediante el cual representamos el sistema territorial y socioeconómico de un ámbito con un conjunto de puntos con atributos asociados.

Figura 1. Abstracción del sistema territorial



Fuente: Ineco

1.2.2 ABSTRACCIÓN DE LA RED DE TRANSPORTE

Los procedimientos de modelización de transporte descansan sobre la base de la *teoría de grafos*. Los grafos son sistemas compuestos por nodos y arcos que pueden emplearse para representar sistemas de elementos y sus relaciones.

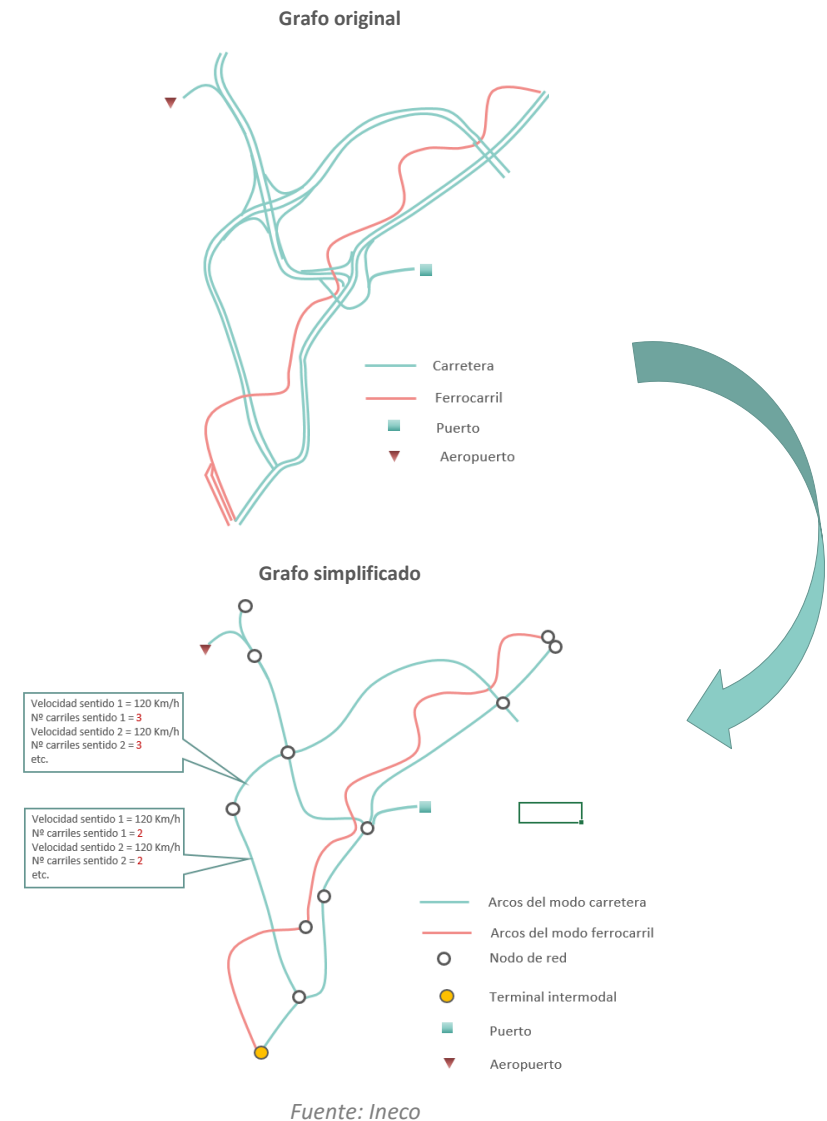
En el caso concreto de las redes de transporte, su transposición a grafos es semidirecta. Si bien es cierto que se pueden descargar en formato grafo de fuentes oficiales, es necesario llevar a cabo un arduo trabajo de limpieza que, en la mayoría de las ocasiones, no es automatizable para que se ajuste a las necesidades del modelo que va a representar.

La infraestructura de transporte se modeliza como **arcos** del grafo, incluyendo todos sus atributos asociados que pueden intervenir en los procesos de decisión. Algunos de estos parámetros asociados a la red de transporte son la capacidad, la impedancia (tiempo, velocidad, coste) o las restricciones (por ejemplo, modos de transporte permitidos). Todos estos atributos son empleados para medir la “dificultad” de atravesar un determinado arco del grafo.

Las intersecciones, o puntos donde confluyen dos o más tramos de la red, se modelizan como **nodos** del grafo. Cada nodo puede también llevar asociados atributos que determinen el comportamiento del sistema de transporte. Existen casos de nodos especiales que sirven para representar diferentes elementos de un sistema de transporte.

Por ejemplo, algunos nodos del grafo pueden representar terminales intermodales, puertos o aeropuertos. Estos nodos permiten matemáticamente la transferencia de flujos de un modo de transporte a otro. El nodo en cuestión lleva asociado atributos que miden la dificultad (impedancia) de realizar estas operaciones de transferencia, como por ejemplo la prohibición de giros en los mismos.

Figura 2. Abstracción de la red de transporte



1.2.3 ELEMENTOS DE CONEXIÓN

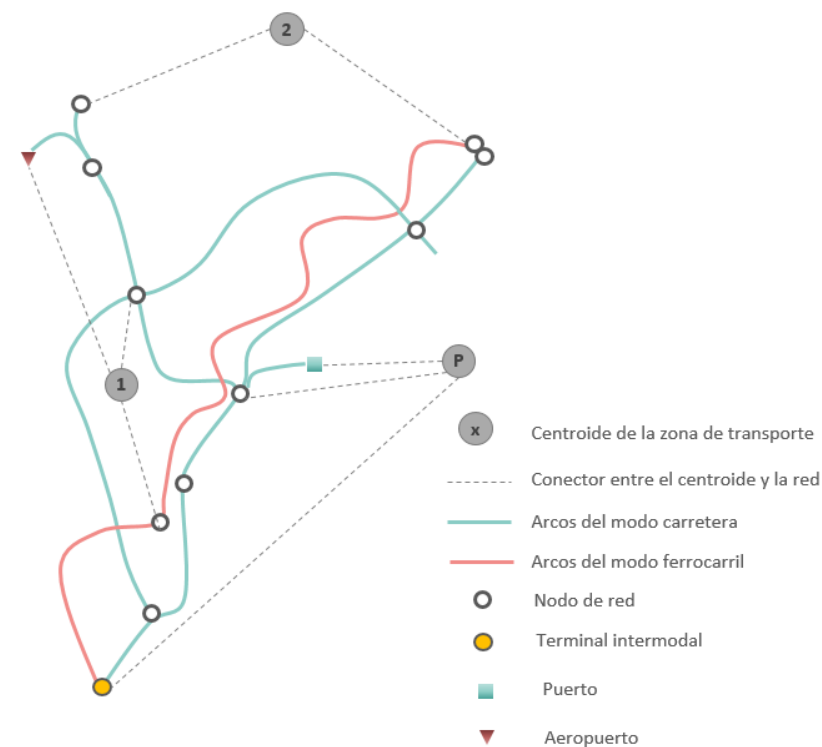
Según lo expuesto anteriormente, el sistema territorial ha quedado modelizado en un sistema de puntos (centroides) con características socioeconómicas donde se generará la demanda de transporte. Por su parte, la red de transportes se representa mediante un grafo con arcos y nodos que modeliza la dificultad de moverse entre diferentes puntos a través de la red.

Como último eslabón de la abstracción del sistema de transporte es necesario definir unos elementos auxiliares que vinculen ambos subsistemas. A estos elementos los denominaremos **conectores**. Un conector es un arco que une un centroide con un nodo de la red de transporte y llevará asociado un conjunto de atributos que representen la dificultad o impedancia de transitar entre ambos puntos.

Conceptualmente, un conector representa los movimientos intrazonales necesarios para acceder a la red modelizada. Un determinado viaje contiene una etapa que se desarrolla en el interior de una zona y que conlleva un coste que el modelo no es capaz de representar (por no estar modelizada la red de transportes interna de la zona). En muchos casos, este desplazamiento intrazonal puede ser determinante en la elección de modo o ruta, por lo que tiene que ser representado mediante algún mecanismo.

Por ejemplo, en una determinada zona, el coste de acceso medio a la red de carreteras no será el mismo que el coste de acceso a una terminal ferroviaria. Esta diferencia de utilidad o coste deberá ser debidamente representada por la impedancia de los conectores.

Figura 3. Abstracción de la red de transporte con conectores



Fuente: Ineco

1.3 PRERREQUISITOS GENERALES DEL MODELO

De forma general, se han establecido una serie de prerrequisitos para la construcción del Modelo Nacional de Transporte, con el objetivo de facilitar su uso y mantenimiento, así como posibilitar futuras actualizaciones:

- **Integración entre ambos modelos:** a pesar de que los modelos de mercancías y viajeros se desarrollen en paralelo, utilizando metodologías específicas, es preciso mantener un alto grado de integración entre los modelos, de modo que sea posible combinar sus resultados. El tipo de actuaciones que está previsto analizar con el Modelo Nacional de Transporte pueden afectar tanto a viajeros como mercancías, por lo que es necesario establecer el impacto combinado de las actuaciones modelizadas en la red de transporte.
- **Integración con datos externos al modelo:** hace referencia a la integración del modelo tanto con sus fuentes de datos como con los sistemas a los que sus resultados deban alimentar. Se busca la estandarización de estos procesos, así como documentando convenientemente del modo en que se estructure y codifique la información del modelo.
- **Actualización:** se aspira a que el modelo sea una herramienta de trabajo viva y fácilmente utilizable. Dado que las condiciones de partida del modelo, sus variables explicativas, irán evolucionando con el tiempo, el modelo también tendrá que ser actualizado regularmente. Este prerrequisito implica lo siguiente:
 - Preferencia por la simplicidad. El modelo de por sí ya es una herramienta compleja, en la medida de lo posible, se preferirán soluciones de modelización sencillas.
 - Selección de fuentes de datos disponibles a futuro en las mismas condiciones en que lo estén en el momento de

formulación del modelo. En definitiva, los inputs del modelo deben de ser accesibles con una periodicidad al menos anual.

- Documentación del modelo.
- **Mantenimiento:** en relación a lo anterior, además de actualizado, el modelo deberá ser mantenido en lo que a la plataforma software que lo soporta se refiere.
- **Escalabilidad funcional:** El modelo objeto del contrato tiene un determinado alcance espacial, funcional y un determinado grado de resolución (movilidad interprovincial de largo recorrido), sin embargo, la plataforma de modelización se configurará de modo que permita futuras ampliaciones funcionales, por ejemplo: rezonificaciones para llevar el modelo a un mayor grado de detalle, adición de nuevos modos de transporte, etc.

1.4 ZONIFICACIÓN

Como se ha comentado anteriormente, las zonas de transporte (ZT), o zonificación del modelo, son áreas en las que se divide el ámbito de estudio, y en las cuales quedan agregadas las características de los territorios objeto de la modelización. Determinan el origen y el destino de los viajes dentro del sistema de transporte, es decir, cada viaje comienza en una zona y termina en otra zona, representado físicamente por su centroide.

La zonificación establecida inicialmente divide el territorio en **86 zonas de transporte**, de modo que sea compatible con la información de demanda disponible para los modelos de viajeros y mercancías. Las zonas de transporte definidas se clasifican en internas y externas de la siguiente manera:

- Zonas internas: aquellas incluidas en el ámbito de interés del estudio (nacional).
- Zonas externas: situadas fuera del área de estudio (extranjero), pero con influencia en su sistema de transporte.

A continuación se describe la zonificación inicial en el ámbito nacional y el extranjero:

Ámbito Nacional: La zonificación se corresponde con la clasificación NUTS-3. 59 zonas coincidentes con las provincias peninsulares, las siete islas principales de las Islas Canarias (Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote, La Palma, Gomera y Hierro), las tres islas principales de las Islas Baleares (Mallorca, Menorca e Ibiza) y las dos ciudades autónomas Ceuta y Melilla.

Tabla 2. Zonificación del MNT. Zonas de ámbito nacional

ID ZONA	NOMBRE	ID ZONA	NOMBRE	ID ZONA	NOMBRE
ES01	Álava	ES25	Lleida	ES49	Zamora
ES02	Albacete	ES26	La Rioja	ES50	Zaragoza
ES03	Alicante	ES27	Lugo	ES51	Ceuta
ES04	Almería	ES28	Madrid	ES52	Melilla
ES05	Ávila	ES29	Málaga	ES53	Ibiza
ES06	Badajoz	ES30	Murcia	ES54	Menorca
ES07	Mallorca	ES31	Navarra	ES55	Hierro
ES08	Barcelona	ES32	Ourense	ES56	La Palma
ES09	Burgos	ES33	Asturias	ES57	La Gomera
ES10	Cáceres	ES34	Palencia	ES58	Fuerteventura
ES11	Cádiz	ES35	Gran Canaria	ES59	Lanzarote
ES12	Castellón	ES36	Pontevedra		
ES13	Ciudad Real	ES37	Salamanca		
ES14	Córdoba	ES38	Tenerife		
ES15	A Coruña	ES39	Cantabria		
ES16	Cuenca	ES40	Segovia		
ES17	Girona	ES41	Sevilla		
ES18	Granada	ES42	Soria		
ES19	Guadalajara	ES43	Tarragona		
ES20	Guipúzcoa	ES44	Teruel		
ES21	Huelva	ES45	Toledo		
ES22	Huesca	ES46	Valencia		
ES23	Jaén	ES47	Valladolid		
ES24	León	ES48	Vizcaya		

Fuente: Ineco

Ámbito Internacional: Se han considerado tres niveles de zonas externas según su proximidad e influencia en el área de estudio. El grado de detalle en la zonificación disminuye a medida que las zonas externas se alejan del área de estudio.

- **Zonas externas de nivel 1**, que se corresponden con Portugal y Francia, donde la zonificación es NUTS-2 y agregación de NUTS-2 respectivamente. Hay 10 zonas de este nivel.
- **Zonas externas de nivel 2**, que representan al resto de países más cercanos de Europa y África, y cuya zonificación en el modelo se corresponde con NUTS-0 (nivel país). En este nivel de zonificación se encuentran Andorra, Reino Unido, Italia, Suiza, Austria, Alemania, Bélgica, Holanda, Luxemburgo y Marruecos. Hay 10 zonas de este nivel.
- **Zonas externas de nivel 3**, que representan al resto de países del mundo, y cuya zonificación en el modelo se corresponde con agrupación de NUTS-0 (agrupación de países). Hay 7 zonas en este nivel.

Tabla 3. Zonificación del Modelo Nacional de Transportes. Zonas de ámbito internacional

	NOMBRE	PAÍS / ÁREA	NIVEL DE ZONIFICACIÓN	TIPO
PT01	Norte	PORTUGAL	NUTS-2	Zona Externa nivel 1
PT02	Algarve			
PT03	Alentejo			
PT04	Centro			
PT05	Lisboa			
FR01	Suroeste	FRANCIA	Agrupación de NUTS-2	
FR02	Mediterráneo			
FR03	Nordeste			
FR04	Centro-Norte			
FR05	Noroeste			
MA01	Marruecos	MARRUECOS	NUTS-0 (País)	Zona Externa nivel 2
EXT01	Andorra	ANDORRA		
EXT02	Reino Unido	REINO UNIDO		
EXT03	Italia	ITALIA		
EXT04	Suiza	SUIZA		
EXT05	Austria	AUSTRIA		
EXT06	Alemania	ALEMANIA		
EXT07	Bélgica	BÉLGICA		
EXT08	Holanda	HOLANDA		
EXT09	Luxemburgo	LUXEMBURGO		
EXT10	Resto Magreb	RESTO MAGREB	Agrupación de NUTS-0 (País)	Zona Externa nivel 3
EXT11	Resto Europa	RESTO EUROPA		
EXT12	Norte América	NORTE AMÉRICA		
EXT13	Sudamérica	SUDAMÉRICA		
EXT14	Asia-Oriente Medio	ASIA-ORIENTE MEDIO		
EXT15	Oceanía	OCEANÍA		
EXT16	Resto África	RESTO ÁFRICA		

Fuente: Ineco

1.5 RED DE TRANSPORTE

La red de transporte para el Modelo en Visum se ha generado a partir de diferentes bases de datos de infraestructuras de transporte. Estas bases de datos presentan un mayor grado de detalle del requerido para un modelo nacional, por lo que se ha realizado un filtrado inicial para asegurarse de que tan solo la infraestructura acorde al grado a la escala macroscópica de la modelización es capturada en el modelo de transporte.

Adicionalmente, para definir las redes de transporte en el Modelo Nacional es necesario llevar a cabo un conjunto de tareas de limpieza y preparación de los elementos que emplea Visum para la simulación. Este análisis tiene como objeto asegurar la conectividad de las redes de carreteras y ferrocarriles, a la vez que se capturan la características principales de cada arco de transporte incluido en el modelo.

1.5.1 RED DE CARRETERAS

Para la red de carreteras se ha descargado la base de datos de referencia (Redes de transporte) del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional¹. Dicha red cuenta con un nivel de detalle y de información muy superior al necesario para el desarrollo de un modelo macroscópico, por lo que mantener ese nivel de detalle podría generar inconsistencias en los resultados de la modelización, siendo necesaria su simplificación.

En primer lugar, se establece un criterio de filtrado, en el cual se seleccionan únicamente las carreteras de mayor importancia nacional para los desplazamientos de medio y largo recorrido. Estas son las carreteras que el IGN categoriza como principales y de orden primero, correspondientes con autopistas, autovías y carreteras nacionales, eliminando de este modo cualquier elemento de la red de menor jerarquía. Adicionalmente, para

mejorar la conectividad de la red, se han incluido otras vías de menor orden. Una vez seleccionadas las carreteras a nivel nacional, se ha obtenido el resto de la red. El nivel de detalle de la red fuera de España es menor que el de la red nacional. Para Portugal se ha empleado el Mapa nacional de carreteras de Portugal que proporciona el organismo Infraestructuras de Portugal². En el resto de Europa se han introducido las carreteras correspondientes a los Corredores de la Red TEN-T Básica³. Adicionalmente, en Francia, se han tenido en cuenta las carreteras más importantes en la frontera con España con la finalidad de garantizar el acceso a todos los centroides definidos en la zonificación.

Finalizada la selección de los elementos de la red de carreteras que componen el Modelo, se ha procedido a la comprobación de la conectividad de los tramos y así garantizar que es posible reproducir itinerarios completos.

En Visum es preciso definir los *modos* o sistemas de transporte que utilizarán la red de carreteras durante la modelización. En este caso, se han definido los siguientes:

- Autobús, identificado mediante el código “B”
- Vehículo privado ligero, identificado con el código “C”
- Vehículo pesado, desagregado en tres sistemas de transporte específicos de mercancías (C_01, C_02, C_03) según se expone en el apartado Modelos de reparto modal y asignación, 3.7).

A continuación, se ha realizado una jerarquización según del tipo de vía definiendo un total de 38 categorías que permiten agrupar los tramos que reúnen una serie de características comunes. Para cada una de estas categorías se diferencian a nivel nacional: autopista de peaje, sin peaje y de

¹ [www.ign.es/web/ign/portal//
http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE](http://www.ign.es/web/ign/portal//http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=CAANE)

² <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/pt-pt/rede/rodoviaria/mapa-da-rede>

³ <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/site/en/maps.html>

poblado; autovía y autovía de poblado; carreteras convencionales de más de dos carriles y de dos carriles, diferenciando estas entre principal y principal poblado; vía urbana y vía urbana rápida. Para el resto de zonas externas se ha considerado una diferenciación entre principal y secundaria.

Las siguientes tablas muestran la estructura de partida de la base de datos del Modelo para carreteras.

Tabla 4. Parámetros de la red de carreteras.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
NÚMERO	Identificador único del elemento de Visum
Nº CARRILES	Número de carriles por sentido
ORDEN	Principal / Primer Orden / Segundo Orden / Tercer Orden
LONGITUD	Longitud en kilómetros
VELOCIDAD	Velocidad en km / h
CALZADA	Única / Duplicada
CLASE	Autopista / Autovía / Multicarril / Convencional
ESTADO FÍSICO	En uso / En construcción
ACCESO	Acceso libre / Peaje
PEAJE LIGEROS	Coste por kilómetro en peaje para vehículos ligeros
PEAJE PESADOS	Coste por kilómetro en peaje para vehículos pesados
TIPO DE VÍA	Codificación según la tabla de tipos de vías para carreteras
TEN-T	Pertenencia a los Corredores TEN-T
MODO	Identificador del modo B, C, C_01, C_02, C_03
ID_TRAMO	Identificador de tramo según IGN

Fuente: Ineco

Tabla 5. Categorías de carreteras.

NOMBRE	LÍMITE VELOCIDAD	VELOCIDAD PESADOS
Autopista peaje	120km/h	85km/h
Autopista sin peaje	120km/h	85km/h
Autopista poblado	110km/h	85km/h
Autovia	120km/h	85km/h
Autovia poblado	110km/h	85km/h
Carr conv >2 carr ppal	100km/h	75km/h
Carr conv >2 carr ppal poblado	90km/h	70km/h
Carr conv >2 carr 1 orden	90km/h	70km/h
Carr conv >2 carr 1 orden poblado	80km/h	65km/h
Carr conv 2 carr ppal	90km/h	70km/h
Carr conv 2 carr ppal poblado	80km/h	65km/h
Carr conv 2 carr 1 orden	80km/h	65km/h
Carr conv 2 carr 1 orden poblado	70km/h	60km/h
Carr conv 2 carr 2 orden	70km/h	60km/h
Carr conv 2 carr 3 orden	60km/h	55km/h
Otras / accesos	70km/h	60km/h
Via urbana	50km/h	40km/h
Via urbana rápida	70km/h	60km/h
Marruecos ppal	90km/h	70km/h
Marruecos sec	65km/h	55km/h
Portugal ppal	120km/h	85km/h
Portugal sec	90km/h	70km/h
Portugal ter	70km/h	60km/h
Alemania ppal	130km/h	85km/h

NOMBRE	LÍMITE VELOCIDAD	VELOCIDAD PESADOS
Resto ppal	130km/h	85km/h
Resto sec	100km/h	75km/h
Holanda ppal	130km/h	85km/h
Bélgica ppal	120km/h	85km/h
Bélgica sec	90km/h	70km/h
Francia ppal	130km/h	85km/h
Francia sec	80km/h	65km/h
Francia ter	70km/h	60km/h
Italia ppal	130km/h	85km/h
Italia sec	90km/h	70km/h
Suiza ppal	120km/h	85km/h
Suiza sec	80km/h	65km/h
Austria ppal	130km/h	85km/h
Austria sec	100km/h	75km/h

Fuente: Ineco.

La red finalmente implementada en el Modelo cuenta con un total de unos 73.000 km, de los cuales, 47.000 km pertenecen a España, 7.000 km a Francia, 4.000 km a Portugal y 15.000 km al resto de países incluidos en el modelo.

Para la introducción de los peajes, se han empleado los precios medios en euros por km al 31 de diciembre de 2017, publicados en el “Informe 2017 sobre el sector de autopistas de peaje en España” publicado por la Delegación del Gobierno en las Sociedades Concesionarias de Autopistas Nacionales de Peaje.

Para poder emplear estos costes kilométricos en el modelo, se ha tenido en cuenta la longitud de los arcos de la red que componen cada autopista en la

red introducida, y a partir de esta longitud y la distancia que se ha considerado para el cálculo de los precios medios por parte de la Delegación del Gobierno en las Sociedades Concesionarias de Autopistas Nacionales de Peaje, se han obtenido unos coeficientes correctores de los costes kilométricos.

Se han considerado los precios medios ponderados por tiempo (en el caso de diferentes tarifas según la franja horaria). Para la determinación del peaje correspondiente a los vehículos pesados, se ha optado por un promedio de las dos categorías de vehículos en que se desglosan esta tipología de transporte.

1.5.2 RED DE FERROCARRIL

La red de ferrocarril a nivel nacional se obtiene de la base de datos de referencia del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional⁴. Para el resto de Europa y Portugal, la red ferroviaria procede de la información geográfica de *OpenStreetMap*.

Se lleva a cabo una limpieza de los elementos innecesarios de la red para el desarrollo de un modelo macroscópico. A continuación, se enumeran los criterios de simplificación establecidos para la simplificación realizada a partir de los parámetros de la red del IGN:

- **Tipo de línea.** Se eliminan aquellas que cuentan con el código de: metro, tranvía, cremallera y tren ligero. Puesto que estos responden a movimientos de corto recorrido que quedan fuera del alcance del modelo.
- **Tipo de tramo.** Se diferencia entre tramos troncales y playa de vías, eliminándose estas últimas.
- **Estado físico.** Se eliminan los tramos clasificados como fuera de servicio y en construcción.

⁴ www.ign.es/web/ign/portal

La información del IGN se contrasta con los datos de la Declaración sobre la Red de Adif de 2017 para poder definir la red en el estado del año base del Modelo. En los parámetros descriptivos de la red se ha establecido una simplificación para las longitudes máximas de tren. La longitud máxima de tren se diferencia entre básica y especial, estando ambas en el entorno de los 500 metros. Por ello, se establece este como valor medio para todas las líneas, a excepción de aquellas que cuentan con apartaderos de 750 metros con esta longitud. Estas últimas son, la línea Madrid-Albacete-Valencia y Figueres-Barcelona. Para las líneas de alta velocidad, se les asigna una longitud de 400 metros, que es la longitud máxima disponible en 2017 para viajeros, siendo posible el ajuste de este parámetro en un futuro, con vistas a que se puedan emplear estas vías para mercancías.

A nivel internacional, se han considerado las vías correspondientes a la red básica y de alta velocidad transeuropea y, además, las redes de los Corredores TEN-T. Debido a su carácter fronterizo con España, se realiza un estudio más detallado para las redes de Francia y Portugal, mientras que para el resto del Modelo se adoptarán los parámetros estándar que se indican más adelante.

Las redes internacionales se han obtenido de *OpenStreetMap* y se han completado los parámetros con las declaraciones de red de Francia y Portugal, y con parámetros estándar para el resto de la red. Los parámetros estándar considerados son:

- Ancho de vía UIC.
- Red convencional electrificada.
- Velocidad de operación máxima de 150 km/h.
- No se ha considerado diferenciación de alta velocidad.

- Longitud máxima de tren de 500 metros.

Esta simplificación se lleva a cabo puesto que el objetivo del Modelo es a nivel nacional y las principales afecciones al mismo vendrán dadas por la movilidad de los países fronterizos, Francia y Portugal. Por lo que llevar a cabo un estudio más profundo en el resto de los elementos de la red no va a generar afecciones significativas en la modelización a nivel nacional en España.

Las principales fuentes de datos para la obtención de información complementaria han sido las entidades: Adif (España)⁵, Infraestructuras de Portugal (Portugal)⁶, SNCF (Francia)⁷. Como visores interactivos consultados se han empleado: Open Railway Map⁸, TENtec Interactive Map Viewer⁹, Railways Through Europe¹⁰.

La siguiente tabla muestra la estructura de la base de datos en el modelo para la red de ferrocarril.

Tabla 6. Parámetros de la red de ferrocarril.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
NÚMERO	Identificador único del elemento de Visum
LONGITUD	Longitud en kilómetros
VELOCIDAD	Velocidad en km / h
ANCHO VÍA	Ibérico / Métrico / Mixto / UIC
AVE	Alta velocidad/ Línea convencional
ELECTRIFICADA	Con o sin electrificación
LONG. MAX	Longitud máxima de tren
SLOPE	Rampa máxima característica
MERCANCÍAS	Corredor de mercancías si/no

⁵ <http://www.adif.es/>

⁶ <https://www.infraestruturasdeportugal.pt/>

⁷ <https://www.sncf.com/fr>

⁸ <https://www.openrailwaymap.org/>

⁹ <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map>

¹⁰ <http://bueker.net/trainspotting/>

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
TIPO DE VÍA	Codificación según la tabla de tipos de vías para ferrocarril
TEN-T	Pertenencia a los corredores TEN-T
MODO	Identificador del sistema de transporte R, F_01, F_02
ID_TRAMO	Identificador de tramo según IGN

Fuente: Ineco

La red ferroviaria implementada en Visum cuenta con un total de 55.000 km aproximadamente, de los cuales, casi 15.300 km pertenecen a España, 8.400 a Francia, 2.300 a Portugal y los otros 29.200 km al resto de Europa.

Para la red se ha realizado una jerarquización según tipo de vías en 32 categorías, de las cuales 25 pertenecen a vías convencionales, con velocidades de entre 50 km/h y 220 km/h, 5 a vías de alta velocidad, con velocidades de entre 200 km/h y 300 km/h, una para FEVE y otra para EUSKOTREN.

1.5.3 RED AÉREA Y MARÍTIMA

Para ambos modos de transporte se han incluido, como infraestructuras nodales, los puertos y aeropuertos de la red de transporte del Instituto Geográfico Nacional. Para las zonas externas, se han considerado los puertos y aeropuertos más representativos de cada una de ellas.

Debido a las peculiaridades del transporte aéreo y marítimo, las rutas entre nodos de transporte para estos modos se han representado por simplicidad en Visum mediante líneas rectas, permitiendo la conexión entre todos los puertos y entre todos los aeropuertos del Modelo. Sin embargo, los costes y tiempos entre nodos de transporte para estos modos son representativos de las rutas seguidas en cada caso.

El Modelo contiene un total de 73 aeropuertos y 71 puertos, que se distribuyen territorialmente como muestra la tabla siguiente:

Tabla 7. Número de puertos y aeropuertos incluidos en el Modelo.

ZONAS	Nº AEROPUERTOS	Nº PUERTOS
España	48	47
Francia	5	5
Portugal	4	5
Resto	16	14
Total	73	71

Fuente: Ineco

En el caso de los aeropuertos, se han incluido a nivel nacional los 48 aeropuertos y helipuertos gestionados por AENA, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Aeropuertos y helipuertos nacionales

Nº	NOMBRE	Nº	NOMBRE
1	AEROPUERTO BURGOS	25	AEROPUERTO DE MÁLAGA - COSTA DEL SOL
2	AEROPUERTO DE A CORUÑA	26	AEROPUERTO DE MELILLA
3	AEROPUERTO DE ADOLFO SUÁREZ MADRID - BARAJAS	27	AEROPUERTO DE MENORCA
4	AEROPUERTO DE ALBACETE	28	AEROPUERTO DE MURCIA - SAN JAVIER
5	AEROPUERTO DE ALICANTE - ELCHE	29	AEROPUERTO DE PALMA DE MALLORCA
6	AEROPUERTO DE ALMERÍA	30	AEROPUERTO DE PAMPLONA
7	AEROPUERTO DE ASTURIAS	31	AEROPUERTO DE REUS
8	AEROPUERTO DE BADAJOZ	32	AEROPUERTO DE SABADELL
9	AEROPUERTO DE BARCELONA - EL PRAT	33	AEROPUERTO DE SALAMANCA
10	AEROPUERTO DE BILBAO	34	AEROPUERTO DE SAN SEBASTIÁN
11	AEROPUERTO DE CORDOBA	35	AEROPUERTO DE SANTIAGO
12	AEROPUERTO DE EL HIERRO	36	AEROPUERTO DE SEVILLA
13	AEROPUERTO DE FUERTEVENTURA	37	AEROPUERTO DE SON BONET
14	AEROPUERTO DE GIRONA - COSTA BRAVA	38	AEROPUERTO DE TENERIFE NORTE

Nº	NOMBRE	Nº	NOMBRE
15	AEROPUERTO DE GRAN CANARIA	39	AEROPUERTO DE TENERIFE SUR
16	AEROPUERTO DE GRANADA - JAÉN F.G.L.	40	AEROPUERTO DE VALENCIA
17	AEROPUERTO DE HUESCA	41	AEROPUERTO DE VALLADOLID
18	AEROPUERTO DE IBIZA	42	AEROPUERTO DE VIGO
19	AEROPUERTO DE JEREZ	43	AEROPUERTO DE VITORIA
20	AEROPUERTO DE LA GOMERA	44	AEROPUERTO DE ZARAGOZA
21	AEROPUERTO DE LA PALMA	45	AEROPUERTO MADRID-CUATRO VIENTOS
22	AEROPUERTO DE LANZAROTE	46	HELIPUERTO DE ALGECIRAS
23	AEROPUERTO DE LEÓN	47	HELIPUERTO DE CEUTA
24	AEROPUERTO DE LOGROÑO - AGONCILLO	48	AEROPUERTO SANTANDER-SEVE BALLESTEROS

Fuente: Ineco

A nivel nacional se han incluido los 46 puertos de interés general gestionados por Puertos del Estado, más el puerto de Denia, gestionado por la Generalitat Valenciana:

Tabla 9. Puertos nacionales.

Nº	NOMBRE	Nº	NOMBRE
1	PUERTO A CORUÑA	23	PUERTO DE IBIZA
2	PUERTO DA PASAIA	24	PUERTO DE LA ESTACA VALVERDE
3	PUERTO DE AGAETE GRAN CANARIA	25	PUERTO DE LA SABINA FORMENTERA
4	PUERTO DE ALCUDIA	26	PUERTO DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
5	PUERTO DE ALGECIRAS	27	PUERTO DE LOS CRISTIANOS TENERIFE
6	PUERTO DE ALICANTE	28	PUERTO DE MAHÓN MENORCA
7	PUERTO DE ALMERÍA	29	PUERTO DE MÁLAGA
8	PUERTO DE ARRECIFE DE LANZAROTE	30	PUERTO DE MARIN Y RIA DE PONTEVEDRA
9	PUERTO DE AVILES	31	PUERTO DE MELILLA
10	PUERTO DE BARCELONA	32	PUERTO DE MORRO JABLE FUERTEVENTURA
11	PUERTO DE BILBAO	33	PUERTO DE MOTRIL
12	PUERTO DE CÁDIZ	34	PUERTO DE PALMA DE MALLORCA
13	PUERTO DE CARTAGENA	35	PUERTO DE PLAYA BLANCA LANZAROTE
14	PUERTO DE CASTELLÓN	36	PUERTO DE PUERTO ROSARIO FUERTEVENTURA
15	PUERTO DE CEUTA	37	PUERTO DE SAN SEBASTIÁN DE LA GOMERA
16	PUERTO DE CIUADELA MENORCA	38	PUERTO DE SANTA CRUZ DE LA PALMA
17	PUERTO DE CORRLEJO FUERTEVENTURA	39	PUERTO DE SANTA CRUZ DE TENERIFE
18	PUERTO DE DENIA	40	PUERTO DE SANTANDER
19	PUERTO DE FERROL	41	PUERTO DE SEVILLA
20	PUERTO DE GANDÍA	42	PUERTO DE TARIFA
21	PUERTO DE GIJON	43	PUERTO DE TARRAGONA
22	PUERTO DE HUELVA	44	PUERTO DE VALENCIA
		45	PUERTO DE VALLE GRAN REY LA GOMERA
		46	PUERTO DE VIGO
		47	PUERTO DE VILAGARCIA

Fuente: Ineco

2 DISEÑO DEL MODELO DE VIAJEROS

2.1 INTRODUCCIÓN

El Modelo Nacional de Transporte de viajeros se plantea como una herramienta nacional de planificación estratégica para la modelización de viajes de larga distancia. Como se ha explicado en el capítulo anterior, el grado de detalle del modelo de viajeros está condicionado por la naturaleza estratégica del modelo, así como por la información disponible para su construcción.

Respecto a la tipología del modelo de viajeros, éste se ha desarrollado siguiendo el paradigma de las cuatro etapas. Esta metodología es preferible para la modelización de la movilidad de larga distancia, frente a otras más adecuadas para el ámbito urbano, como la modelización basada en actividad.

Los diferentes datos de entrada se configuran como las variables de modelo. De esta forma, variaciones en los parámetros de demanda, oferta o usos del suelo se traducirán en cambios en los resultados del modelo como puedan ser flujos de tráfico en la red o emisiones.

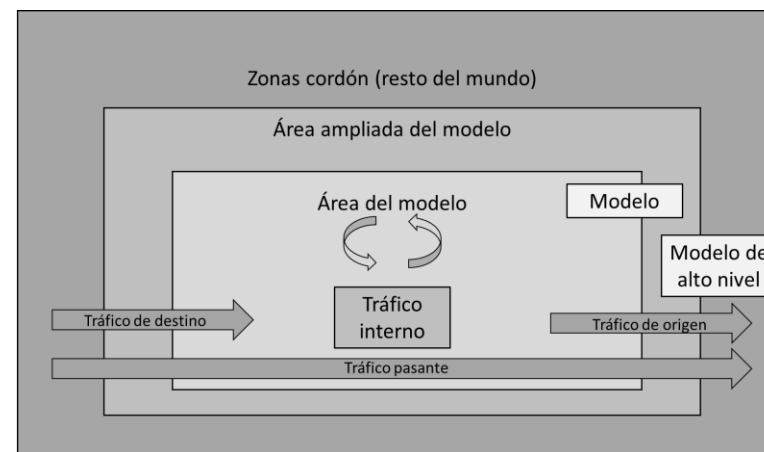
La movilidad que se plantea modelizar es aquella de componente interprovincial de larga distancia. Sin embargo, este segmento de movilidad incluye viajes habituales casa-trabajo que presentan características diferentes al resto de movilidad de larga distancia.

2.1.1 PREMISAS BÁSICAS DE MODELIZACIÓN

El área de influencia directa del modelo viene dada por el ámbito espacial sobre el que se espera que el modelo dé resultados con suficiente fiabilidad. El área de influencia directa del modelo lo forma todo el territorio nacional tanto peninsular como insular y las ciudades autónomas del norte de África.

El área de influencia directa del modelo interacciona con su entorno, es decir, existen viajes entre el área de influencia directa y el exterior, así como viajes pasantes entre ámbitos externos que atraviesan el ámbito interno.

Figura 4. Esquema de la dimensión espacial del modelo y tipos de tráficos



Fuente: PTV

De esta manera, es preciso distinguir entre:

- **Ámbito interno** del modelo, es la ya definida área de influencia directa.
- **Ámbito externo**, que lo forma el resto del mundo.

Conforme a las fuentes de datos de demanda del modelo, el año base de calibrado del modelo es 2017. Así mismo, los años futuros de modelización son 2030 y 2050, como se explica en la encomienda de los trabajos.

Además del año base de calibrado, en la dimensión temporal del fenómeno a modelizar hay que definir su grado de resolución. En el modelo nacional de transporte, la unidad mínima de tiempo modelizada es el día. Para modelizar

la variabilidad de las condiciones de movilidad durante el año se establecen los siguientes días tipo:

- Día laborable tipo (excepto viernes) en época no estival
- Viernes tipo en época no estival
- Domingo tipo en época no estival
- Día laborable tipo (excepto viernes) en época estival
- Viernes tipo en época estival
- Domingo tipo en época estival

Aparte de resultados para cada uno de estos días tipo, se proyectarán resultados anuales a partir de la contribución agregada de cada uno de estos días tipo.

Se anota en este punto, una limitación del modelo, al no haberse incluido en el alcance de los trabajos la modelización específica de los sábados, a pesar de las singulares condiciones de movilidad de este día respecto al resto de la semana. La contribución de la movilidad de los sábados a la movilidad anual se considera de forma derivada a los otros días tipo.

2.2 ZONIFICACIÓN

Como se ha detallado en el capítulo anterior, las zonas de transporte son áreas en las que se divide el ámbito de estudio, y en las cuales quedan agregadas las características de los territorios objeto de la modelización. Determinan el origen y el destino de los viajes dentro del sistema de transporte, es decir, cada viaje comienza en una zona y termina en otra zona, representado físicamente por su centroide.

Para el modelo de viajeros del Modelo Nacional de España, la zonificación establecida inicialmente divide el territorio en 86 zonas de transporte, para ser homogénea al nivel de detalle de la información de demanda de movilidad interprovincial disponible obtenida a partir de datos de telefonía móvil en el territorio nacional.

La zonificación definida para el modelo de viajeros cuenta con diversos niveles de detalle que se describen a continuación:

2.2.1 ÁMBITO NACIONAL

Zonificación inicial

La zonificación planteada inicialmente se corresponde con la clasificación NUTS-3¹¹. Este planteamiento está condicionado por los datos de movilidad interprovincial disponibles para el desarrollo del modelo. En concreto, se definen un total de 59 zonas, coincidentes con las provincias peninsulares, las siete islas principales de las Islas Canarias (Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote, La Palma, Gomera y Hierro), las tres islas principales de las Islas Baleares (Mallorca, Menorca e Ibiza) y las dos ciudades autónomas Ceuta y Melilla.

En este punto, es necesario resaltar que la zonificación planteada inicialmente para representar el territorio peninsular español restringe la funcionalidad del modelo. En primer lugar, existe gran heterogeneidad en la población representada por cada zona, ya que, por ejemplo, las dos provincias más pobladas (Madrid y Barcelona) aglutinan más de 25% del total nacional. Así mismo, la dimensión de las provincias peninsulares y la distribución de población dentro de ellas se traduce en considerables diferencias en la accesibilidad a la red de transporte dentro de cada provincia.

En términos de modelización, esta limitación se podría traducir bien en la necesidad de desagregar las zonas peninsulares, dividiendo las matrices de

¹¹ <https://ec.europa.eu/eurostat/web/nuts/background>

demanda interprovincial, o en definir una compleja red de conectores, lo cual puede dificultar la calibración del modelo base y definición de escenarios.

Zonificación instrumental

Por esto motivo, se planteó el uso de una zonificación instrumental más desagregada manteniendo, en cualquier caso, la búsqueda de representatividad de los resultados a nivel interprovincial y de largo recorrido. La implementación de una zonificación más desagregada presenta las siguientes ventajas respecto al planteamiento inicial:

- Representar de forma más detallada las diferentes características de los asentamientos en cada zona de transporte.
- Tomar en consideración variaciones en accesibilidad dentro de cada zona de transporte (en un modelo de transporte los viajes de cada zona se concentran en sus centroides).
- Simplificar la definición de conectores para el reparto de demanda. Por lo general, la capacidad de explicar la diversidad territorial mediante el reparto de demanda por conectores es muy limitada.
- Facilitar la calibración del modelo. Con zonas demasiado agregadas para la escala del modelo, resulta complejo realizar la calibración del modelo.

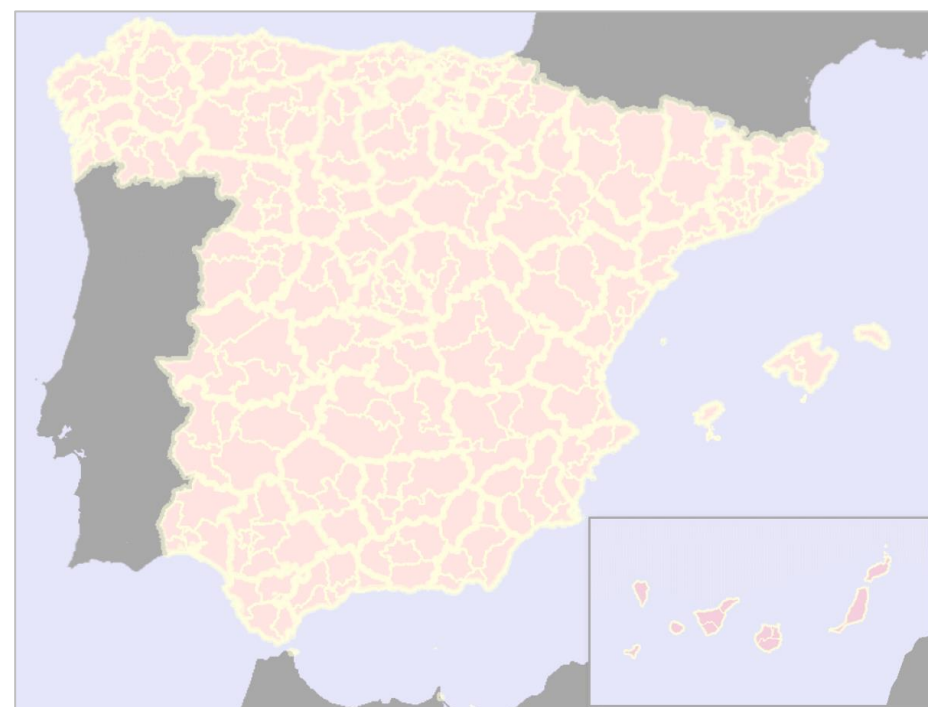
La zonificación instrumental se ha desarrollado a partir de la zonificación utilizada por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en su estudio de movilidad de 2019. Para dicho estudio, el INE dividió el territorio nacional en 3.214 zonas, buscando una cierta uniformidad en la población representada por cada zona. Por ello, se compone de agregación de municipios, municipios individuales, así como entidades inframunicipales.

Para la definición de la zonificación instrumental en primer lugar se han agrupado las zonas del INE a nivel municipal. Posteriormente, se ha procedido a agregar la zonificación a nivel municipal de forma manual, atendiendo a la distribución de la población en el territorio y a las condiciones de accesibilidad

al sistema de transporte (corredores y nodos del sistema). En total se ha obtenido una zonificación interna de 279 zonas, la cual proporciona un nivel de detalle adecuado para el desarrollo del Modelo Nacional de Transporte.

La siguiente figura muestra la zonificación instrumental utilizada en el Modelo Nacional de Transportes de viajeros. En la figura es posible apreciar que la zonificación instrumental mantiene la consistencia con la propuesta inicial basada en las provincias peninsulares y las islas y territorios autónomos.

Figura 5. Zonificación interna del modelo de viajeros



Fuente: PTV

A continuación, se presenta el número de zonas en la que se ha desagregado cada una de las zonas consideradas en la propuesta inicial.

Tabla 10. Zonificación del MNT. Zonas de ámbito nacional

ID inicial	Nombre	Número de zonas	ID inicial	NOMBRE	Número de zonas	ID inicial	NOMBRE	Número de zonas
ES01	Álava	5	ES25	Lleida	4	ES49	Zamora	5
ES02	Albacete	4	ES26	La Rioja	3	ES50	Zaragoza	5
ES03	Alicante	5	ES27	Lugo	6	ES51	Ceuta	1
ES04	Almería	6	ES28	Madrid	8	ES52	Melilla	1
ES05	Ávila	3	ES29	Málaga	6	ES53	Ibiza	1
ES06	Badajoz	6	ES30	Murcia	6	ES54	Menorca	1
ES07	Mallorca	2	ES31	Navarra	7	ES55	Hierro	1
ES08	Barcelona	14	ES32	Ourense	5	ES56	La Palma	1
ES09	Burgos	7	ES33	Asturias	8	ES57	La Gomera	1
ES10	Cáceres	5	ES34	Palencia	4	ES58	Fuerteventura	1
ES11	Cádiz	4	ES35	Gran Canaria	3	ES59	Lanzarote	1
ES12	Castellón	5	ES36	Pontevedra	5			
ES13	Ciudad Real	5	ES37	Salamanca	6			
ES14	Córdoba	5	ES38	Tenerife	3			
ES15	A Coruña	8	ES39	Cantabria	6			
ES16	Cuenca	4	ES40	Segovia	4			
ES17	Girona	6	ES41	Sevilla	8			
ES18	Granada	5	ES42	Soria	3			
ES19	Guadalajara	5	ES43	Tarragona	5			
ES20	Guipúzcoa	4	ES44	Teruel	4			
ES21	Huelva	5	ES45	Toledo	7			
ES22	Huesca	4	ES46	Valencia	7			
ES23	Jaén	6	ES47	Valladolid	4			
ES24	León	8	ES48	Vizcaya	7			

Fuente: Ineco

2.2.2 ÁMBITO INTERNACIONAL

Tal y como se especifica en el apartado 1.4, se han considerado tres niveles de zonas externas según su proximidad e influencia en el área de estudio. El grado de detalle en la zonificación disminuye a medida que las zonas externas se alejan del área de estudio.

- **Zonas externas de nivel 1**, que se corresponden con Portugal y Francia, donde la zonificación es NUTS-2 y agregación de NUTS-2 respectivamente. Hay 10 zonas de este nivel.
- **Zonas externas de nivel 2**, que representan al resto de países más cercanos de Europa y África, y cuya zonificación en el modelo se corresponde con NUTS-0 (nivel país). En este nivel de zonificación se encuentran Andorra, Reino Unido, Italia, Suiza, Austria, Alemania, Bélgica, Holanda, Luxemburgo y Marruecos. Hay 10 zonas de este nivel.
- **Zonas externas de nivel 3**, que representan al resto de países del mundo, y cuya zonificación en el modelo se corresponde con agrupación de NUTS-0 (agrupación de países). Hay 7 zonas en este nivel.

2.2.3 ZONAS MULTIMODALES

Las zonas multimodales son zonas especiales, puntuales, ubicadas en nodos del sistema del transporte en los cuales es posible el intercambio modal dando lugar a cadenas de viaje que emplean distintos sistemas de transporte en el modelo.

A las zonas internas y externas se añaden zonas especiales para los principales aeropuertos de la España peninsular, para las principales estaciones de ferrocarril y para los puertos. El uso de estas zonas especiales permite tener mayor control en la modelización de los viajes multimodales, asegurando que los intercambios se hagan en estas zonas. En total, se contabilizan un total de

25 zonas para los aeropuertos, otras 25 para estaciones de ferrocarril y 23 para los puertos.

2.3 OBTENCIÓN DE LAS MATRICES DE VIAJEROS

2.3.1 MATRICES DE MOVILIDAD INTERPROVINCIAL

El punto de partida para la obtención de las matrices de viajeros son las matrices de movilidad interprovincial desarrolladas como parte del “*Estudio de movilidad interprovincial de viajeros aplicando la tecnología big data*”, elaborado en 2018¹². Estas matrices fueron estimadas a partir de registros de telefonía móvil anonimizados, recopilados durante los meses de julio, agosto y octubre de 2017.

Las matrices de movilidad interprovincial estiman los viajes y etapas de desplazamientos interprovinciales en la península y entre islas o territorios autónomos. Debido a la naturaleza del modelo, tan solo se toman en consideración desplazamientos de larga distancia, definidos como aquellos entre dos zonas diferentes y con una longitud de al menos 50 kilómetros. En el caso de Alicante, Barcelona, Madrid y Vizcaya este límite se ha fijado en 10 kilómetros, debido al elevado número de desplazamientos desde provincias adyacentes. Es también importante indicar que las matrices de movilidad interprovincial no proporcionan desplazamientos intrazonales.

En el territorio nacional, las matrices de movilidad interprovincial están disponibles al nivel de resolución de la zonificación inicial. En realidad, la zonificación inicial planteada para el modelo nacional viajeros estuvo determinada por los resultados de este estudio.

Hay que poner de relieve que la identificación de algunas características de los desplazamientos se ha hecho con algoritmos. Por ejemplo, se ha analizado las

localizaciones y duraciones de las estancias para identificar motivos de viajes. Se han empleado técnicas de “map matching” para determinar el modo de transporte. Por eso los datos no gozan de los niveles de precisión y de certeza que se pueden obtener con una encuesta directa a los ciudadanos.

Los resultados son matrices de viajes entre provincias para dos periodos tipo: julio y octubre. En las tablas siguientes se proponen algunas cifras clave del estudio.

Tabla 11. Número de viajes por día promedio en Julio y Octubre

Día	Residentes en España		Residentes en el extranjero	
	Julio	Octubre	Julio	Octubre
Lunes	3.731.000	2.688.600	338.400	224.800
Martes	3.329.100	2.738.300	340.200	230.000
Miércoles	3.412.500	2.659.400	348.000	234.400
Jueves	3.489.300	2.720.300	361.600	241.100
Viernes	4.163.700	3.304.100	353.400	229.200
Sábado	3.760.700	2.965.300	256.600	153.600
Domingo	4.505.400	3.058.900	201.700	104.900
Promedio	3.770.200	2.876.400	314.300	202.600

Fuente: Ineco. Elaborado a partir de datos del MITMA

Para los desplazamientos intraautonómicos no fue posible determinar si los viajes se hicieron en autobús o en coche. Entonces se han etiquetado como “carretera”. El reparto modal para un día tipo en los meses de julio y octubre, calculado como la media de los días promedio (de lunes a domingo), es el siguiente:

¹² <https://observatoriotransporte.mitma.gob.es/estudio-experimental>

Tabla 12. Reparto modal de los viajes

Modo	Julio		Octubre	
	Número	%	Número	%
Autobús	66.000	2%	59.000	2%
Avión	108.400	3%	91.200	3%
Barco	84.400	2%	58.300	2%
Carretera	1.673.100	41%	1.248.300	41%
Privado	1.940.700	48%	1.414.100	46%
Tren	211.900	5%	208.100	7%
Total	4.084.500	-	3.079.000	-

Fuente: Ineco. Elaborado a partir de datos del MITMA

En la base de datos de movilidad interprovincial se pudo distinguir 4 tipos de actividades para los residentes en España a los que se añaden los desplazamientos de los no residentes. En este sentido se ha considerado necesaria una mayor segmentación de las matrices de movilidad para el desarrollo del modelo de viajeros.

La siguiente tabla muestra el motivo en el destino de viaje para un día tipo en los meses de julio y octubre, calculado como la media de los días promedio (de lunes a domingo).

Tabla 13. Reparto de desplazamientos por motivo

Motivo	Julio		Octubre	
	Número	%	Número	%
Casa	923.200	23%	843.400	27%
Esporádica	2.206.000	54%	951.400	31%
Frecuente	487.400	12%	907.400	29%
Trabajo/Estudio	153.700	4%	174.300	6%
No residente	314.300	8%	202.600	7%
Total	4.084.500	-	3.079.000	-

Fuente: Ineco. Elaborado a partir de datos del MITMA

2.3.1 AJUSTES DE LAS MATRICES DE MOVILIDAD INTERPROVINCIAL

A nivel de las necesidades del modelo, estas matrices presentan una serie de limitaciones que hay que solventar antes de emplearlas como un elemento de entrada en el mismo. En concreto:

- Ajustar las matrices a los periodos representativos a modelizar dentro del MNT:
 - Periodo 1: laborable medio fuera de verano
 - Periodo 2: laborable medio de verano
 - Periodo 3: viernes medio fuera de verano
 - Periodo 4: domingo medio fuera de verano
 - Periodo 5: viernes medio de verano
 - Periodo 6: domingo medio de verano

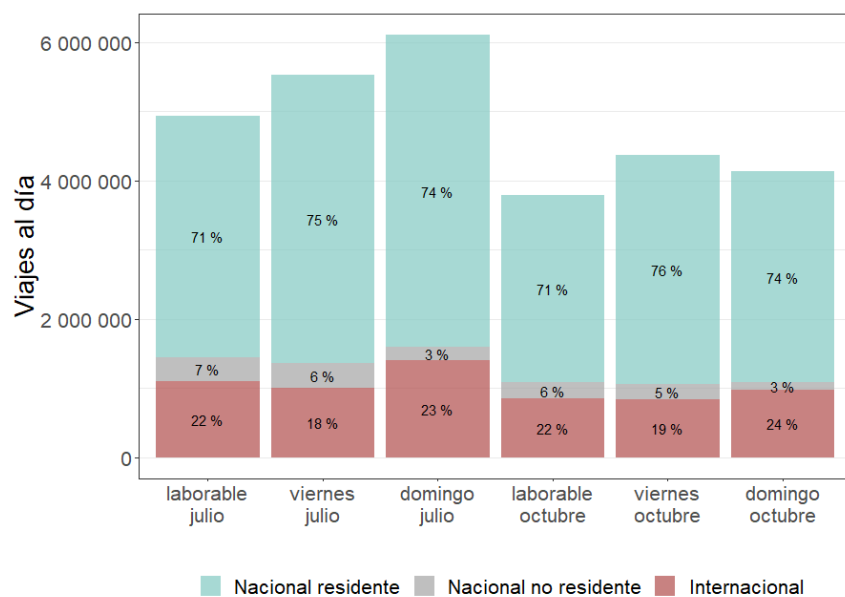
La demanda para los días laborables medios se ha obtenido como el promedio de los registros de lunes a jueves, para los periodos de verano y fuera de verano.

- Separar los desplazamientos entre provincias pertenecientes a una misma comunidad autónoma en autobús y vehículo privado, ya que se agrupan en un único modo denominado carretera. Para ello se ha empleado una metodología simplificada basada en la utilización de datos estadísticos de la “Encuesta de Movilidad de las Personas Residentes Movilia 2006-2007”.
- Incluir y adaptar los desplazamientos al extranjero a la zonificación del Modelo Nacional. La base de datos publicada como parte del Estudio de la Movilidad Interprovincial de Viajeros aplicando la Tecnología Big Data no incluye desplazamientos al extranjero, por lo que éstos se han obtenido de una versión previa de las matrices proporcionada por el MITMA. Estos datos de partida agrupan los desplazamientos

internacionales en una única zona, habiendo sido preciso su desagregación conforme a la zonificación definida para las zonas externas. Para realizar esta disociación se ha optado por el empleo de los microdatos correspondientes a los datos de FRONTUR incluidos en las bases de datos de información turística que contempla SIET-DATATUR (sistema de información de estadísticas turísticas) del año 2014 para la distribución entre las zonas externas y del año 2017 para el reparto modal. La elección de estas fuentes de datos se debe a que, entre las disponibles, son las que más se ajustan a las necesidades requeridas por variables estudiadas y segregación zonal.

La siguiente figura presenta la demanda de larga distancia modelizada para desplazamientos nacionales e internaciones por día tipo.

Figura 6. Demanda por día y tipo de viaje



Fuente: Ineco. Elaborado a partir de datos del MITMA

2.3.2 SEGMENTACIÓN DE LA DEMANDA

Las matrices de movilidad interprovincial no proporcionan suficiente grado de detalle para el desarrollo del modelo de viajeros, por lo que ha sido necesario segmentar las matrices por estratos de demanda y motivo de viaje. En primer lugar, en las matrices de demanda de movilidad interprovincial no se identifica un motivo único de viaje y los repartos proporcionados para el origen y destino de viaje no son consistentes con los registros de otros modelos de transporte a escala macroscópica. Asimismo, la segmentación de demanda por grupos de población en la base de datos de partida también resulta insuficiente.

Segmentación por grupos de población

Los grupos de población se refieren a segmentos de población con comportamientos similares a la hora de viajar.

Atendiendo a la disponibilidad de datos de demanda, en concreto, a la posibilidad de relacionar patrones de viajes con adscripción a categoría social de quienes viajan, se decide utilizar los siguientes grupos de población:

- Ocupados
- Estudiantes
- Jubilados
- Otros

La movilidad de los menores de 15 años no es modelizada de forma explícita, debido al hecho de que éstos habitualmente viajan con sus padres u otras personas. La movilidad de los menores de 15 años se considera mediante un factor constante diferenciado por motivo de viaje.

Tabla 14. Reparto de desplazamientos por ocupación

Motivo	Viajes	%
Ocupados	20.025.300	45%
Labores del hogar	4.551.900	10%
Parados y otros	2.278.300	5%
Jubilados	7.752.600	18%
Estudiantes	8.422.700	19%
Menor no escolarizado	1.154.700	3%
Total	44.185.500	

Fuente: PTV

Tabla 15. Reparto de desplazamientos por motivo

Motivo	Viajes	%
Vacaciones	35.437.800	12%
Ocio	86.457.500	28%
Motivos profesionales	65.411.900	21%
Visitas a familiares o amigos	47.962.300	16%
Ir a 2ª residencia	42.186.500	14%
Otros	29.071.400	9%
Total	306.527.400	

Fuente: PTV

Segmentación por motivos de viaje

Los grupos de población se cruzan con los motivos por los que se viaja para dar lugar a los mencionados estratos de demanda.

Atendiendo a los datos de demanda de movilidad disponibles, concretamente a los datos de demanda de las matrices de movilidad interprovincial y a la encuesta Movilia de 2007¹³, se decide clasificar los motivos de viaje del siguiente modo:

- Trabajo (ir/volver al trabajo)
- (Otros asuntos) profesionales
- Educación universitaria
- Segunda residencia
- Vacaciones
- Otros asuntos

Combinaciones de grupos de población y motivos de viaje

Lógicamente, no todos los grupos de población definidos realizan viajes de cada uno de estos motivos. Por ejemplo, los “estudiantes” son el único grupo que se mueve por motivo “educación universitaria” y, los “ocupados” los únicos que se mueven por motivos “trabajo” o “asuntos profesionales”.

De esta manera, se han seleccionado 14 combinaciones de grupos de población y motivo. Todas ellas acumuladas cubren aproximadamente el 99% de todos los viajes.

Tabla 16. Combinaciones de grupos de población y motivos de viaje

	Trabajo	Profesional	Educación	Segunda residencia	Vacaciones	Otros
Ocupados	11	12		14	15	16
Estudiantes			23		25	26
Jubilado				34	35	36
Otros				44	45	46

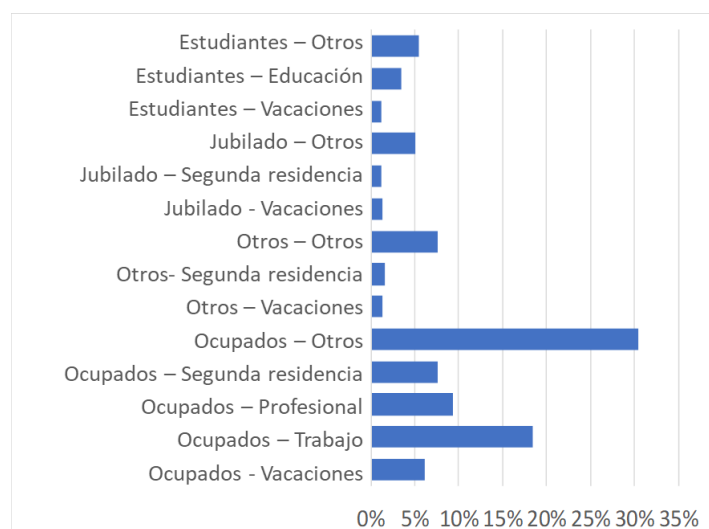
Fuente: PTV

¹³ Se ha utilizado esta fuente de datos en lugar de las matrices de movilidad interprovincial, debido a que proporciona un reparto por motivos más coherente.

La demanda derivada de cada motivo presenta diferentes patrones en los distintos días tipo: las distancias recorridas, la distribución en pares OD, la duración de la estancia en el destino.

La siguiente figura presenta la distribución de viajes para los estratos de demanda considerados en un laborable medio de julio.

Figura 7. Distribución de viajes (en proporción respecto al total) de acuerdo con los estratos de demanda en día laborable de julio



Fuente: PTV

Los viajes por motivo trabajo o profesional y los de motivo universitario acumulan aproximadamente un 30% de un día laborable medio de julio. En este mismo día tipo, los viajes por vacaciones o segunda residencia suponen un 10% cada uno. Casi el 50% de los viajes son por otros asuntos tales como compras, ocio, visita a familiares y amigos.

Tráfico internacional

El modelo de demanda reproduce la demanda de viaje de los residentes en España, para los que se disponen de datos socioeconómicos empleados en la etapa de generación. Pero el tráfico de larga distancia e interprovincial también incluye viajes que exceden a esta categoría:

- Viajes de extranjeros dentro de España
- Viajes entre España y otro país extranjero, tanto de españoles hacia el extranjero o volviendo, como de extranjeros.
- Viajes entre países extranjeros que cruzan España.

Para la primera de estas categorías, la matriz de movilidad interprovincial contabiliza estos movimientos, de modo que, podrán ser introducidos en el modelo a partir de las matrices por modos para este colectivo.

En el segundo caso, se emplean matrices por modo elaboradas a partir de la encuesta Frontur (2017) y que incluyen los viajes de entrada y salida de España tanto de residentes como de no residentes.

En último lugar, los desplazamientos que cruzan España han sido estimados a partir de los viajes en tránsito en la encuesta Frontur, junto con datos de los institutos estadísticos de Francia y Portugal.

2.3.3 DESAGREGACIÓN DE LA DEMANDA POR ZONAS DE TRANSPORTE

Como se ha indicado anteriormente, la base de datos de movilidad interprovincial utiliza la zonificación inicial (con 59 zonas en España), por lo que no dispone de la resolución precisa para el desarrollo del Modelo Nacional de viajeros.

Por este motivo, es necesario desagregar los registros de las matrices de movilidad interprovincial al nivel de detalle de la zonificación instrumental.

Ante la falta de información más detallada sobre el origen y destino de los viajes, esta desagregación y segmentación se ha efectuado mediante el modelo de generación detallado en el capítulo 2.6.

2.4 OFERTA DE SERVICIOS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Dentro del procedimiento de modelización se incluye la representación de los servicios de transporte público. Los servicios codificados son aquellos relevantes para la movilidad interprovincial que usan la red de transporte de interés general (RTIG). **Los parámetros a codificar para los servicios interprovinciales relevantes son costes medios, tiempos de viajes, rutas y paradas.**

La recolección de esta información se ha desarrollado empleando, por una parte, datos procedentes de los operadores y los organismos reguladores y por otra, datos recolectados a través de metabuscadores y planificadores de viaje que integran información publicada por los operadores a través de sus canales de venta.

El flujo de trabajo seguido para el desarrollo de los trabajos consiste en tres pasos fundamentales:

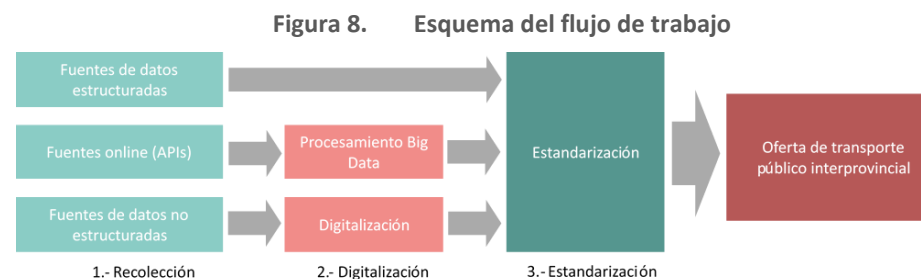
- Recopilación de la información
- Digitalización
- Estandarización

A su vez, el proceso incluye operaciones de extrapolación y depuración de la información cuando se detectan lagunas o inconsistencias entre las fuentes de información

Dicho proceso se efectúa en paralelo para cada uno de los sistemas de transporte público estudiados:

- Oferta de autobús interprovincial

- Oferta modo aéreo
- Oferta de ferrocarril interprovincial
- Oferta de ferris de pasajeros



Fuente: Ineco

2.4.1 OFERTA DE AUTOBÚS INTERPROVINCIAL

En el caso del transporte regular de viajeros por carretera, los trabajos realizados se han centrado en el procesamiento de la información disponible referente a **las concesiones VAC del MITMA**, así como la obtención de **otros servicios** de autobús de **otras fuentes regionales y mediante buscadores**.

Ha sido necesario llevar a cabo una tarea de consolidación de bases de datos existentes, combinando diferentes fuentes de información. En concreto, las principales fuentes de información para definir la oferta interprovincial de autobús son las siguientes.

- Concesiones VAC del MITMA
- Red de autobuses regionales de Cataluña
- Información obtenida a partir de buscadores de viaje

Para el análisis de las tarifas de autobús se han empleado APIs de planificadores de viaje que permiten extraer diferentes indicadores de oferta entre un origen y un destino.

Para aquellas relaciones donde no ha sido posible obtener información de las tarifas, se realiza una extrapolación a partir del coste medio por kilómetro de este tipo de servicios, que resulta en un valor tendencial medio de **0,078 €/km**.

La oferta de transporte de viajeros por ferrocarril incluida en el Modelo Nacional engloba los **servicios de RENFE, FEVE, Euskotren y otros operadores internacionales**. En todos los casos se han simplificado los servicios, recogiendo solo aquellos que realizan desplazamientos interprovinciales para el ámbito nacional o entre grandes ciudades para tráfico internacional.

Las tarifas ferroviarias han sido estimadas a partir de datos contenidos en el observatorio del ferrocarril en España¹⁴, complementados con consultas a buscadores de viaje para su validación.

Las tarifas ferroviarias han sido aplicadas por tipo de servicio, AVE, Avant, Media Distancia etc. De media se ha obtenido coste por kilómetro de **0,11 €/km**. Por tipo de servicio, se observa que los costes por kilómetro más altos se dan en los servicios de Alta Velocidad (AVE y Avant), mientras que los más bajos se ofrecen en los servicios TRENHOTEL y Regional.

2.4.2 OFERTA MODO AÉREO

La principal fuente de información para la obtención de las rutas de la oferta de transporte aéreo de pasajeros es la **base de datos de AENA**.

La entidad pública AENA dispone de un servicio web a través del cual obtener descargas personalizadas de datos de operaciones. En este caso se han empleado todos los datos correspondientes a 2017.

Esta información incluye los orígenes, los destinos y la duración de cada una de las operaciones.

A partir de los datos recogidos se ha procedido a realizar un filtrado de estos, eliminando aquellos que no corresponden con vuelos directos (salvo en el caso de los insulares). Se han tomado datos de los servicios ofertados en verano y otoño de 2017

Además de esta información, ha sido necesario recurrir a otros servicios para la recopilación de horarios, tiempos de viaje y tarifas de las relaciones aéreas. En este caso se ha extraído información de un buscador web para cada relación seleccionada de la base de datos de AENA. Estos datos fueron extraídos en marzo de 2019.

Es evidente que la alta variabilidad de las tarifas de transporte aéreo dificulta la labor de fijar un coste único para un par origen-destino. Los valores presentados en este trabajo corresponden al valor promedio de los precios publicados con un mes de antelación a la salida del vuelo.

Adicionalmente, se han estudiado los viajes interinsulares en el archipiélago balear y canario y las posibilidades de transporte aéreo desde las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Estas tarifas, también se han obtenido a través de buscadores de vuelos.

2.4.3 OFERTA DE FERRIS DE PASAJEROS

Este modo de transporte es especialmente relevante para ciertas relaciones entre la Península y las áreas insulares o ciudades autónomas. Especial importancia tiene el transporte de viajeros en modo marítimo entre la Península y Ceuta y Melilla, resultando en algunas ocasiones el único modo disponible.

¹⁴ <https://www.mitma.gob.es/ferrocarriles/observatorios/observatorio-del-ferrocarril-en-espana>

La **principal fuente de información** han sido los datos facilitados por la **Dirección General de la Marina Mercante**. Estos datos enumeran los servicios de transporte regular de pasajeros subvencionados, que son todos los que tienen origen o destino en territorio insular.

Además de esta fuente de datos, ha sido necesario recurrir a las páginas de las diferentes navieras para recopilar la información relativa a horarios y frecuencias del servicio:

- **Trasmediterránea:** oferta trayectos regulares entre los principales puertos de la península y los de Ceuta, Melilla, Baleares, Canarias, Marruecos y Argelia.
- **BALEARIA:** conecta las cuatro islas Baleares además de las mismas con la península a través de los puertos de Barcelona, Valencia y Denia. También conecta la península con Ceuta, Melilla, Canarias y Marruecos.
- **FRS:** es una empresa focalizada en los desplazamientos en el estrecho de Gibraltar, aunque dispone también de conexiones con los puertos de Las Palmas, Tenerife y Lanzarote.
- **ARMAS:** es la naviera más importante de las islas Canarias, dando conexión a todas las islas. Ofrece también servicio entre España y Marruecos.
- **FRED OLSEN:** es otra empresa con gran papel en los trayectos interinsulares. Conecta las islas de Tenerife, Lanzarote, Gran Canaria, Fuerteventura, La Palma y La Gomera, tanto viajes internos como con la península, ya que dispone de conexión con el puerto de Huelva.
- **LINEAS ROMERO:** es una empresa naviera de tamaño mediano que opera con ferris entre los Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa.

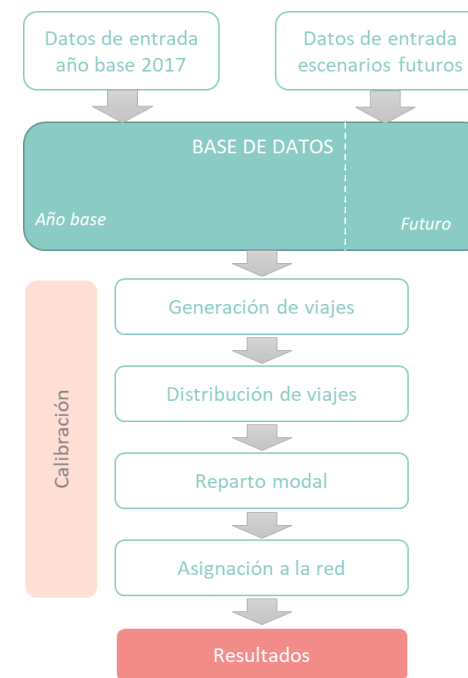
Las tarifas para este modo de transporte han sido extraídas de buscadores de viajes.

2.5 ESTRUCTURA DEL MODELO DE VIAJEROS

El **Modelo Nacional de Transporte** se desarrolla siguiendo el paradigma de las cuatro etapas. Esta metodología es la más adecuada para la modelización de la movilidad de larga distancia frente a otras más adecuadas para el ámbito urbano, como la modelización basada en actividad.

La siguiente figura ilustra el paradigma de las cuatro etapas gráficamente.

Figura 9. Esquema de cuatro etapas (viajeros)



Fuente: Ineco

Los diferentes datos de entrada se configuran como las variables de modelo. De esta forma, variaciones en los parámetros de demanda, oferta o usos del suelo se traducirán en cambios en los resultados del modelo como puedan ser flujos de tráfico en la red o emisiones.

Para el desarrollo del Modelo Nacional del Transporte se requiere disponer de los diferentes datos de entrada para el año base (2017). Estos datos suponen la realidad observada y se emplean en los procedimientos de calibración y validación. Una vez calibrados los modelos, la herramienta puede ser empleada para el estudio de múltiples escenarios a través de la introducción de previsiones a futuro de los datos de entrada como puedan ser: previsiones de población, nuevas infraestructuras, variación de los servicios, etc.

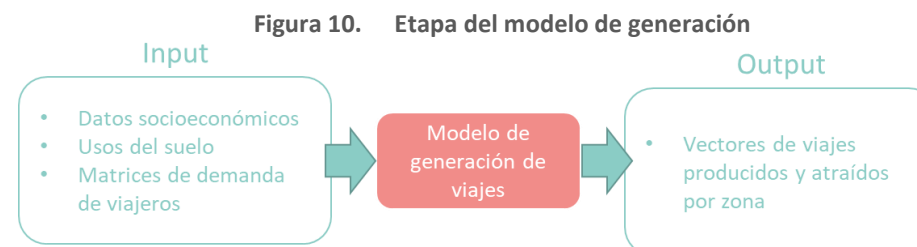
2.6 MODELO DE GENERACIÓN

El modelo de generación de viajes permite representar los mecanismos de producción y atracción de viajes en cada una de las zonas del modelo.

Por una parte, las producciones de viajes se calculan en base a variables socioeconómicas que definen una segmentación de la población en grupos de comportamiento homogéneo frente a la movilidad.

Para cada uno de los grupos de población y motivos de viaje se estiman ratios de producción de viajes, que representan el número de viajes de un motivo realizados por un viajero en un determinado horizonte temporal.

Para el cálculo de las atracciones zonales se emplea información relativa a los usos del suelo y a variables relacionadas con la actividad económica (empleo, turismo, industria, etc.). Posteriormente los viajes atraídos se balancean a las producciones.



Fuente: Ineco

Debe notarse que una vez desarrollado y calibrado el modelo de generación es posible, a partir de la proyección de variables socioeconómicas y usos del suelo, estimar la generación de viajes futura de una determinada zona mediante los **vectores de producción y atracción de viajes**.

La calibración de modelos de generación consiste en encontrar los parámetros que minimizan las diferencias entre las producciones y atracciones observadas y las calculadas por el modelo. La matriz base empleada para la calibración es la matriz de viajes (no de etapas) disponible como dato de partida.

2.6.1 RECOPIACIÓN DE VARIABLES SOCIOECONÓMICAS

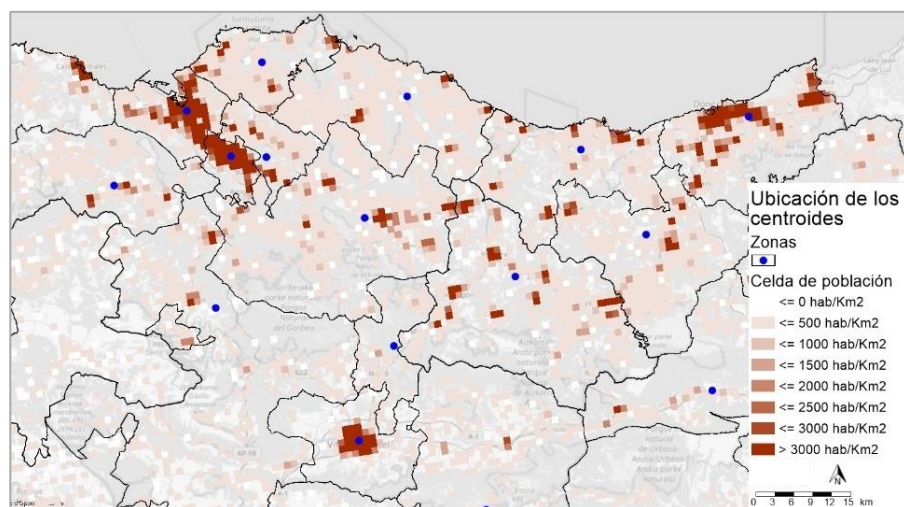
Población

Se considera la población residente en España, de más de 15 años, registrada por el Padrón Continuo de 2017. Los datos a nivel municipal son agregados a nivel de la zonificación del modelo.

Por otra parte, se ha empleado un fichero GIS que contiene los datos de población del censo de 2011 (fuente INE) referidos a una rejilla de 1 Km² con el fin de ubicar los centroides de las zonas del modelo atendiendo a densidades de población.

La siguiente figura muestra un ejemplo de análisis realizado para la ubicación de centroides en cada zona, atendiendo al reparto de población.

Figura 11. Ejemplo de ubicación de centroides según el reparto de población



Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

Ocupación

De cara a la modelización de la movilidad, resulta interesante segmentar la población respecto a su ocupación.

Para ello, es necesario acudir a datos territoriales de población activa y, dentro de ésta, de población activa empleada y desempleada. A su vez, se pueden considerar distintos segmentos para el sector inactivo ya sean jubilados, estudiantes, etc.

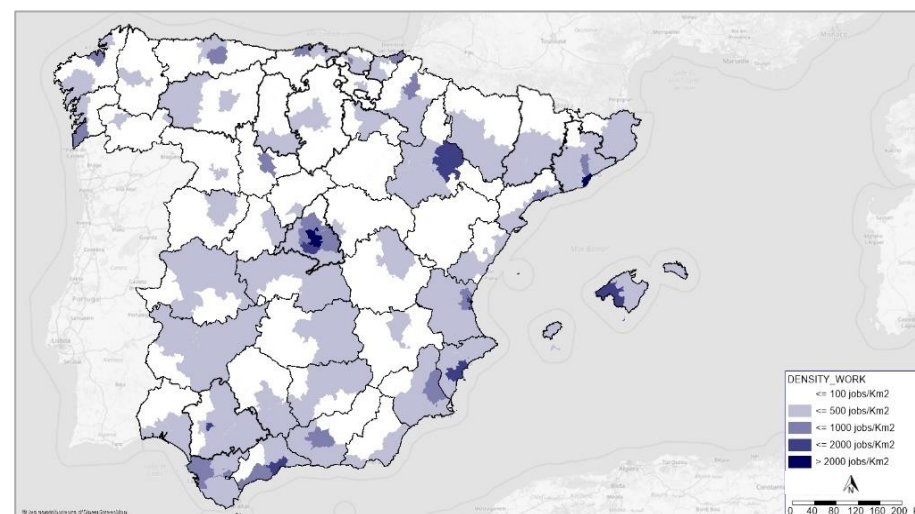
Estos datos, en general, disponibles en el INE a nivel provincial, se distribuyen al nivel zonal del modelo de forma proporcional a la población zonal.

Centros de trabajo

Para la consideración de los centros de trabajo y distribución de empleos, se emplean los datos de altas en la Seguridad Social disponibles a nivel municipal (fuente web del INSS) y por meses. A efectos de su uso en el modelo y,

atendiendo a los periodos temporales a modelizar, se procede a promediar los datos de los meses de julio y octubre, agregándolos posteriormente a nivel de las zonas del modelo. La siguiente figura muestra la densidad de empleos por zona instrumental del modelo de viajeros.

Figura 12. Densidad de empleos



Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

Universidad y educación

Se caracterizan particularmente la oferta y demanda del sistema universitario.

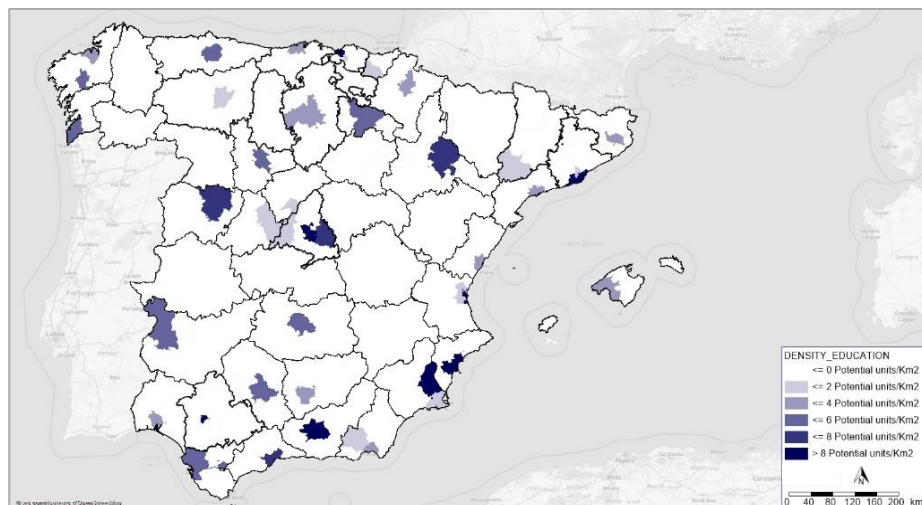
Para ello se emplean como fuentes los datos publicados por el Ministerio de Ciencia e Innovación en relación con:

- Estudiantes matriculados en universidades en el curso 2017-2018.
- Ubicación de centros universitarios.

Con estos datos, se puede realizar una estimación del número de estudiantes universitarios que estudian en cada zona del modelo y, con ello, formular un

parámetro de potencial atractor de movilidad de cada zona por este motivo. La siguiente figura muestra el número de estudiantes por zona.

Figura 13. Densidad del potencial educativo



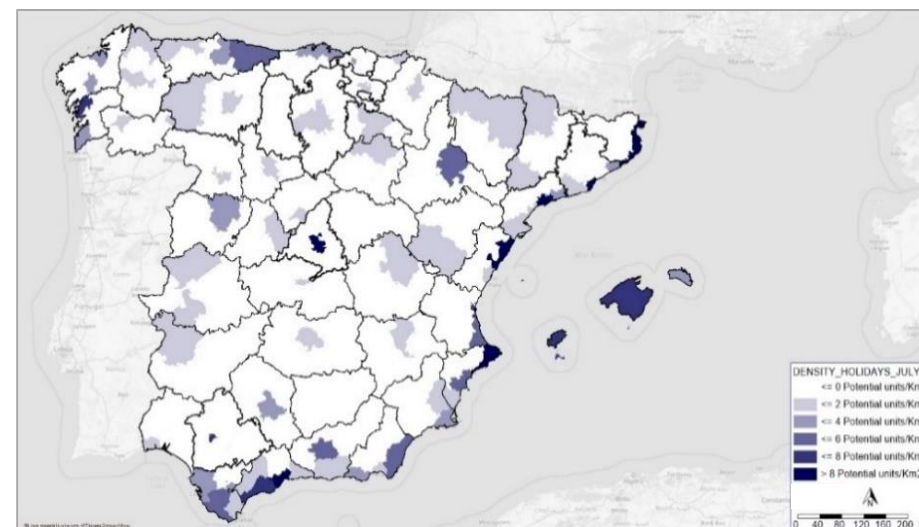
Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

Turismo

El INE dispone de estadísticas sobre el número de viajeros en áreas turísticas por mes y categoría de establecimiento (hoteles, campings, apartamentos turísticos y alojamientos rurales).

Con estos datos se puede formular un indicador de potencial atractor turístico por zonas (ver Figura 14).

Figura 14. Densidad del potencial turístico

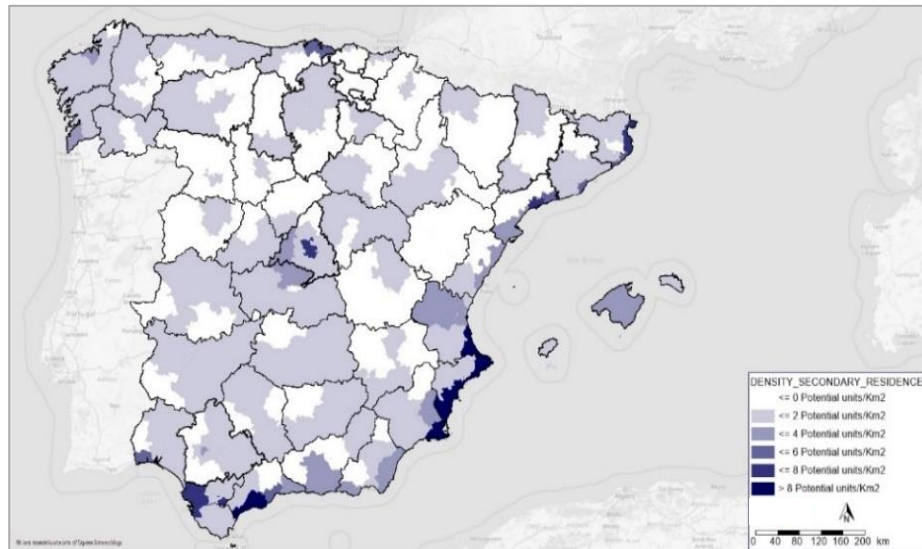


Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

Residencias secundarias

El censo de 2011 (INE) proporciona el número de vivienda secundarias en cada municipio. Se agregan estos datos para obtener la información a nivel de las zonas del modelo (ver Figura 15).

Figura 15. Densidad del potencial de viviendas secundarias

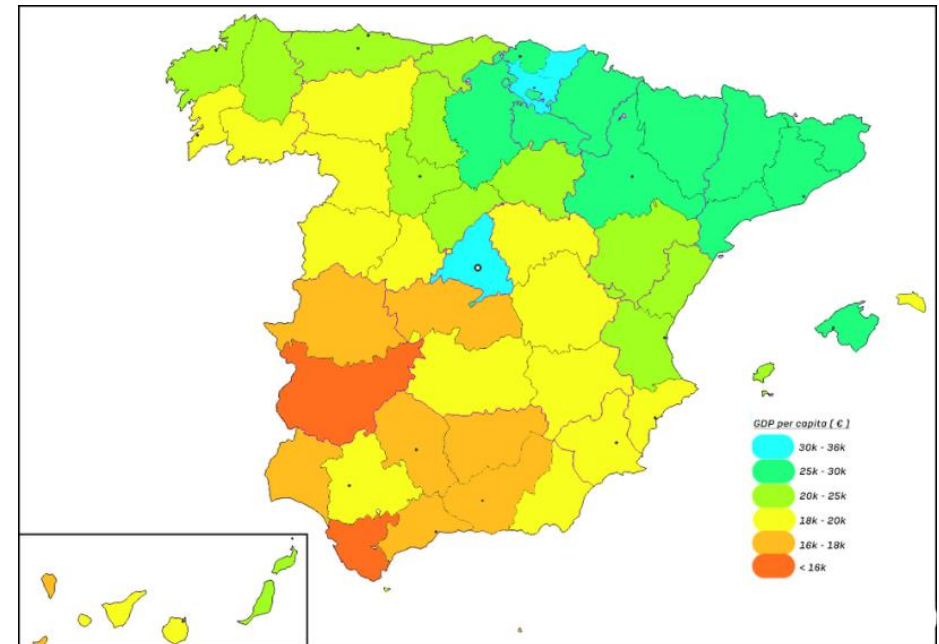


Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

Producto interior bruto

El Producto Interior Bruto (PIB) para el año 2017 ha sido obtenido de la serie estadística del INE a nivel provincial. La siguiente figura muestra la información obtenida para desarrollar el modelo de generación.

Figura 16. PIB per cápita provincial. Año 2017. Fuente: INE

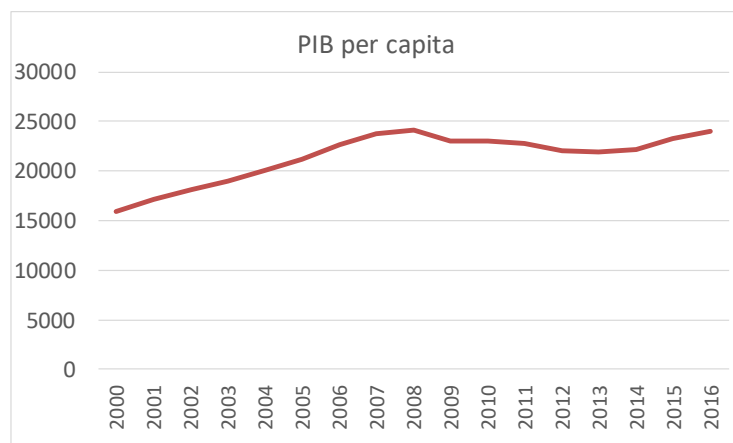


Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

Respecto a la evolución del PIB per cápita, entre 2000 y 2008 se registró un incremento estable e importante, con una tasa de crecimiento del 5% interanual. Entre 2008 y 2013, en cambio, se observa un ligero descenso mientras que, desde el 2014 el crecimiento interanual vuelve a ser positivo con tasas del orden del 3%.

Este último periodo de crecimiento se extiende, aunque con diferencias, a todas las provincias españolas.

Figura 17. Evolución del PIB per cápita



Fuente: PTV. Elaborado a partir de información del INE

La tabla de la página siguiente resume las variables explicativas del modelo de generación y atracción y sus fuentes.

Tabla 17. Variables del modelo de generación atracción

Variable	Descripción	Formato	Fuente	Generación / atracción	Nivel de la referencia espacial fuente	Procesado
Trabajadores	Personas > 16 años ocupadas	Valor absoluto	INE EPA	Generación	Provincial	se reparte a nivel municipal en proporción a la población > 15 años del municipio respecto de la pob > 15 años de la provincia. Resultados municipales se agregan por zonas de transporte.
Resto de población	Población > 16 años inactiva excepto estudiantes y jubilados + Población activa desempleada	Valor absoluto	INE EPA	Generación	Provincial	
Jubilados	Personas jubiladas	Valor absoluto	INE EPA	Generación	Provincial	
Estudiantes	Personas > 16 años estudiantes	Valor absoluto	INE EPA	Generación	Provincial	
Empleo	Mediante proxy afiliados a la Seguridad Social. Toma el valor medio de los afiliados en el último día del mes de Julio y del mes de octubre. Año base: 2017	Valor absoluto	INSS	Atracción	unicipal	Resultados municipales se agregan por zonas de transporte.
Vacaciones julio	Estancias en establecimientos turísticos en el mes de julio	Valor relativo de la zona respecto al total x 100.000	INE	Atracción	Puntos Turísticos	Existe una correspondencia entre "puntos turísticos" y municipios. Después, resultados municipales se agregan por zonas de transporte.
Vacaciones octubre	Estancias en establecimientos turísticos en el mes de octubre	Valor relativo de la zona respecto al total x 100.000	INE	Atracción	Puntos Turísticos	
Atracción educación	Atracción de la movilidad por motivo ESTUDIOS UNIVERSITARIOS mediante la variable proxy ESTUDIANTES MATRICULADOS	Valor relativo de la zona respecto al total x 100.000	Ministerio de ciencia e innovación	Atracción	Por universidad.	Tabla de correspondencia de universidades en municipios y posterior agregación a zonas de transporte
Segunda residencia	Número de segundas residencias según CENSO 2011	Valor relativo de la zona respecto al total x 100.000	INE_CENSO 2011	Atracción	Municipal	Resultados municipales se agregan por zonas de transporte.
Otros motivos	Otros motivos de desplazamientos mediante la variable proxy población total	Valor relativo de la zona respecto al total x 100.000	INE Padrón continuo	Atracción	Municipal	
Población total	Población total. Estadística del padrón continuo del INE. Año base 2017	Valor absoluto	INE Padrón continuo	Atracción	Municipal	

Fuente: PTV

Como resultado se obtienen las siguientes ratios de generación de viajes:

Tabla 18. Ratios de generación calibrados por día tipo y estrato de demanda

Día tipo	Ocupados					Otros			Jubilados			Estudiantes		
	Vacaciones	Trabajo	Profesional	Segunda residencia	Otros	Vacaciones	Segunda residencia	Otros	Vacaciones	Segunda residencia	Otros	Vacaciones	Educación	Otros
	HHd_W	HW_W	HP_W	HS_W	HO_W	HHd_O	HS_O	HO_O	HHd_R	HS_R	HO_R	HHd_S	HE_S	HO_S
Lab julio	0.0312	0.0200	0.0178	0.0223	0.0223	0.0290	0.0200	0.0245	0.0223	0.0200	0.0200	0.0379	0.0045	0.0245
Lab oct	0.0117	0.0437	0.0466	0.0204	0.0204	0.0175	0.0233	0.0204	0.0292	0.0233	0.0321	0.0087	0.0612	0.0204
Viernes jul	0.0443	0.0194	0.0166	0.0332	0.0332	0.0416	0.0305	0.0305	0.0277	0.0305	0.0166	0.0388	0.0055	0.0305
Viernes oct	0.0036	0.0250	0.0250	0.0232	0.0161	0.0071	0.0214	0.0143	0.0179	0.0214	0.0125	0.0054	0.0304	0.0196
Domingo jul	0.0387	0.0019	0.0039	0.0251	0.0290	0.0348	0.0232	0.0271	0.0193	0.0232	0.0213	0.0271	0.0039	0.0271
Domingo oct	0.0159	0.0040	0.0060	0.0317	0.0298	0.0179	0.0317	0.0278	0.0198	0.0317	0.0218	0.0139	0.0079	0.0218

Fuente: PTV

2.6.2 DEMANDA INDUCIDA

La inducción de demanda hace referencia a la aparición de nuevos viajes, que antes no se realizaban en ningún modo, por cambios en el sistema de transporte o en el contexto socioeconómico.

En el Modelo Nacional de Transporte, se consideran dos componentes principales a este respecto, viajes como resultado de variables macroeconómicas desarrolladas en este epígrafe y nuevos viajes asociados con la oferta de transporte disponible explicados en el apartado 2.8.7.

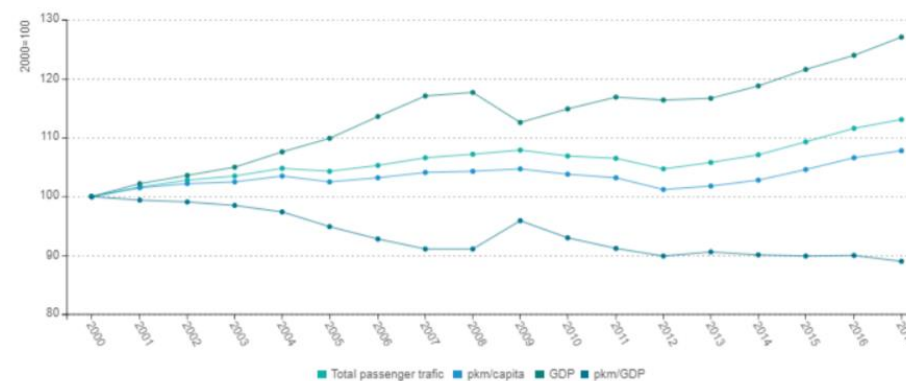
Correlación entre el producto interior bruto y la movilidad de viajeros

La primera componente resulta más difícil de estimar ya que, lo habitual, es no contar con indicadores desagregados a nivel zonal para evaluar el impacto de, por ejemplo, cambios el PIB o en la imposición de tasas al transporte.

El producto interior bruto y el volumen de viajes están generalmente correlacionados. Normalmente, un incremento en el PIB de un territorio se traduce en un ascenso de la movilidad.

En este sentido, la siguiente figura muestra la evolución del volumen de viajes y PIB desde el año 2000 en la Unión Europea. En la gráfica se observa, como desde el año 2012 el PIB y el volumen de viajes siguen crecimientos paralelos. Sin embargo, la evolución anual durante la crisis económica que comenzó en el año 2008 no parece tan clara.

Figura 18. Correlación entre el PIB y el volumen de viajeros



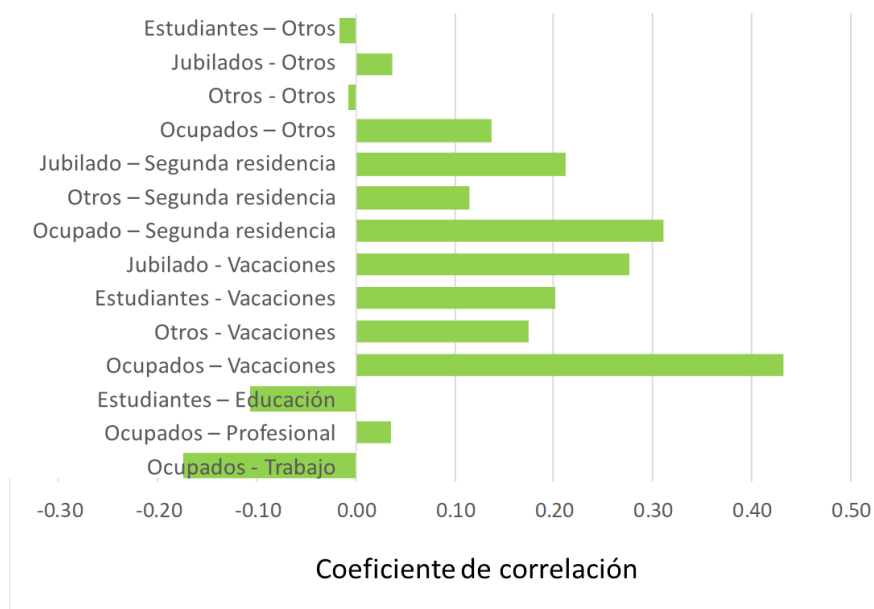
Fuente: *odyssee-mure.eu*

Volviendo al Modelo Nacional de Transporte, las tasas de generación de viajes por habitante a nivel provincial que se obtienen de los datos de movilidad interprovincial resultan muy dispares. Seguramente este hecho tiene que ver con cuestiones de proximidad y de accesibilidad, pero también puedan explicarse parcialmente por diferencias en PIB.

El PIB, como indicador que incluye información de rentas disponibles, encuentra reflejo en tasas de generación de viajes motivados por vacaciones o segundas residencias (ver Figura 19).

En sentido contrario, para viajes por motivos “trabajo”, “profesional” y “educación”, no se encuentra una correlación clara entre PIB y volumen de viaje. En algunos casos, como se recoge en el siguiente gráfico, la correlación entre volumen de viajes de un determinado estrado de demanda y PIB puede ser negativo. Significando que a mayor PIB tenderían a realizarse menos viajes por estos motivos. Esto puede explicarse por el hecho de que trabajadores residentes en áreas de alto PIB, como Madrid o Barcelona, no tendrían incentivos para trabajar (y desplazarse) lejos de sus provincias de residencias.

Figura 19. Coeficiente de correlación lineal entre PIB y volúmenes de viaje a nivel provincial para distintos estratos de demanda.



Fuente: PTV

De este gráfico, cabe deducir también que la influencia del PIB es relativamente alta para viajes menos frecuentes y con mayores tiempos de estancia en destino. Asimismo, se observan mayores correlaciones en los estratos de demanda referidos al grupo poblacional de los “ocupados” respecto a los otros grupos.

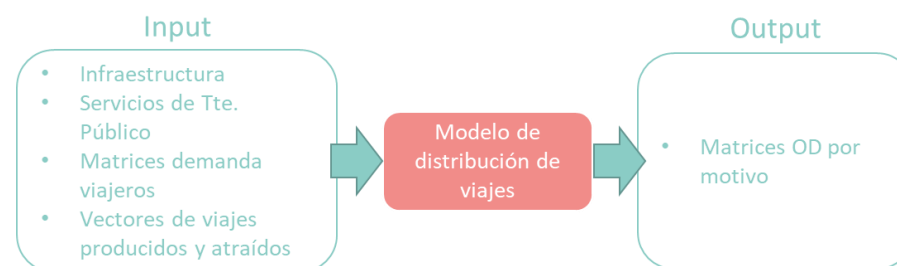
Esta correlación es muy importante para la definición de tasas de generación en escenarios futuros. Un incremento en el PIB, bien nacional o por provincias, se traduce en un incremento en los viajes por motivo “vacaciones” y “segunda residencias”, mientras que los viajes por el resto de los motivos no serían influidos.

2.7 MODELO DE DISTRIBUCIÓN DE VIAJES

2.7.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del modelo de distribución de viajes es representar los mecanismos que definen la magnitud de los viajes entre los diferentes orígenes y destinos por medio de una matriz.

Figura 20. Etapa del modelo de generación



Fuente: Ineco

En el enfoque clásico la función de impedancia se define según una agrupación multimodal de las variables más importantes (distancia, tiempo de viaje por modo, precio), sabiendo que las implicaciones de la elección de estas variables y el modo en que son combinadas son muy importantes.

Para la distribución espacial de los desplazamientos, las variables en la función de impedancia han tenido en consideración las expectativas del modelo y su estructura general

El enfoque empleado en esta etapa es de tipo “logsum”, frente al enfoque “clásico”, según se explica a continuación.

2.7.2 FORMULACIÓN DEL MODELO DE DISTRIBUCIÓN

Para el modelo de distribución espacial se ha empleado un enfoque tipo gravitatorio, en el que el coste generalizado agregado de viaje forma parte del proceso de elección de destino. La ventaja de esta formulación es que permite representar el hecho de que las opciones de destino y modo son una decisión combinada y no dos opciones independientes y sucesivas. Es decir, las opciones de transporte disponibles entre dos zonas determinan el número total de viajes entre éstas. Por lo tanto, en esta metodología la función de coste generalizado de la opción de destino es una función de las utilidades de los modos implicados en la opción modal.

Todas las variables que se incluyen en la opción modal se incluyen en la distribución, la especificación de la función de impedancia se realiza mediante la fórmula logsum.

El modelo de distribución espacial tipo gravitatorio toma, para cada estrato de demanda, la siguiente formulación:

$$V_{ij} = P_i \cdot \frac{A_j \cdot f(\omega_{ij})}{\sum_k A_k \cdot f(\omega_{ik})}$$

Donde:

V_{ij} = Número de viajes entre la zona i y la zona j

P_i = Viajes producidos en la zona i

A_j = Viajes atraídos por zona j

$f(\omega_{ij})$ = Función de impedancia

ω_{ij} = impedancia al transporte entre las zonas i y j

La función de impedancia ($f(\omega_{ij})$) empleada es de tipo combinada, con la impedancia enriquecida por un término relacionado con la distancia a vuelo de pájaro ($\gamma \cdot d_{ij}$).

$$f(Z_{ij}) = Z_{ij}^b \cdot e^{Z_{ij}}$$

Con

$$Z_{ij} = -\alpha \cdot \omega_{ij} + \gamma \cdot d_{ij}$$

Donde,

ω_{ij} = impedancia al transporte entre las zonas i y j

d_{ij} = Distancia directa (a vuelo de pájaro) entre las zonas i y j

α, γ, b = Parámetros del modelo a calibrar

Y la impedancia se define mediante una función Logsum:

$$\omega_{ij} = \ln \left\{ \sum_m e^{U_{i,j,m}} \right\}$$

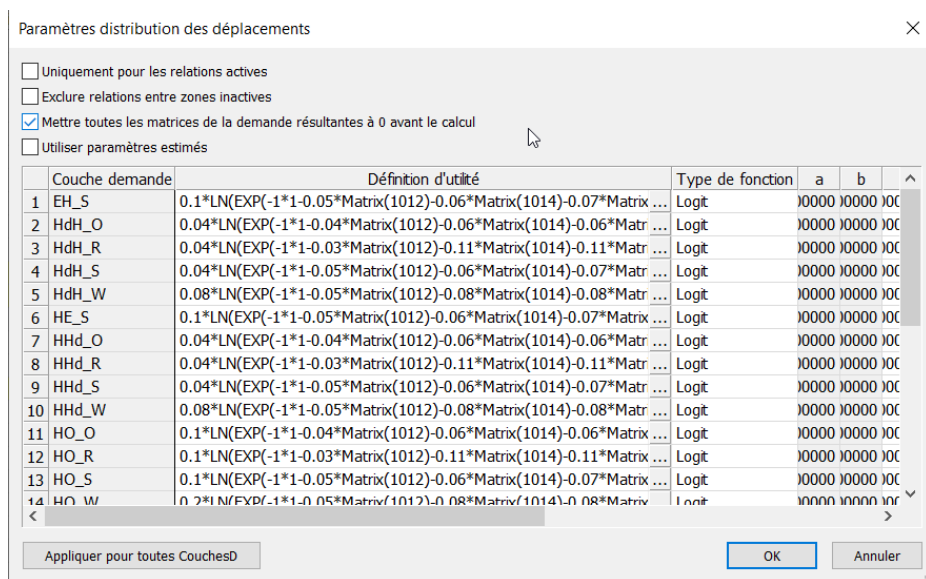
Donde,

ω_{ij} = impedancia al transporte entre las zonas i y j

$U_{i,j,m}$ = Utilidad del modo m para ir de la zona i a la zona j

Las utilidades de cada modo se definen a nivel de modelo de reparto modal, por lo que esto implica que los modelos de distribución espacial y de reparto modal están vinculados entre sí.

Figura 21. Captura de pantalla de la parametrización en Visum. La función Logsum es introducida manualmente dentro de la cadena de procedimientos del modelo



Fuente: PTV

En las siguientes tablas se resumen los parámetros de los modelos de distribución espacial. En este sentido, es de destacar que se ha aplicado la misma formulación (por estrato de demanda) para todos los días tipo.

Tabla 19. Parámetro α para cada estrato de demanda. Cualquier día tipo

α		Ocupados	Otros	Jubilados	Estudiantes
Hd	Vacaciones	0,06	0,04	0,04	0,04
W	Trabajo	0,16			
P	Profesional	0,08			
S	Segunda residencia	0,32	0,18	0,16	
O	Otro	0,32	0,16	0,16	0,16
E	Educación				0,12

Fuente: PTV

Tabla 20. Parámetro γ para cada estrato de demanda. Cualquier día tipo

γ		Ocupados	Otros	Jubilados	Estudiantes
Hd	Vacaciones	0,003	0,002	0,002	0,003
W	Trabajo	0,006			
P	Profesional	0,003			
S	Segunda residencia	0,004	0,004	0,006	
O	Otro	0,004	0,004	0,005	0,004
E	Educación				0,011

Fuente: PTV

2.8 MODELO DE REPARTO MODAL

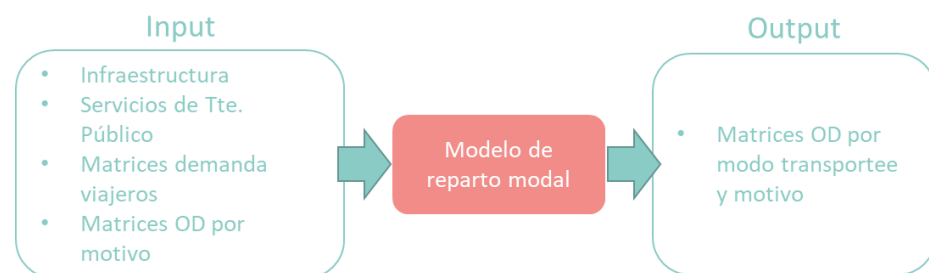
2.8.1 INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de evaluar los mecanismos que pueden modificar el reparto modal a futuro se construye un modelo de reparto modal. Estos modelos,

basados en la teoría de elección discreta, permiten cuantificar el impacto de diferentes políticas de transporte como la mejora de los servicios de transporte público o restricciones al uso de vehículo privado.

Los modelos de reparto modal toman como base las diferentes variables que intervienen en la elección del modo y que se ven alteradas por la variación en las políticas de transporte. A partir de estas variables se construyen las diferentes funciones de utilidad que posteriormente son empleadas para la elección de modo. La calibración se realiza a partir del reparto modal existente en la actualidad, obtenido a partir de las matrices de movilidad interprovincial disponibles.

Figura 22. Etapa del modelo de reparto modal



Fuente: Ineco

2.8.2 LOS MODOS DE TRANSPORTE

El modo ha sido formulado de modo que se consideran los siguientes modos o combinación de modos de transporte:

- Vehículo privado (C)
- Tren (R)
- Vehículo privado + Tren (C + R)

- Autobús + Tren (B + R)
- Autobús (B)
- Vehículo privado + Avión (C + A)
- Autobús + Avión (B + A)
- Tren + Avión (R + B)
- Vehículo privado + Ferry (C + M)

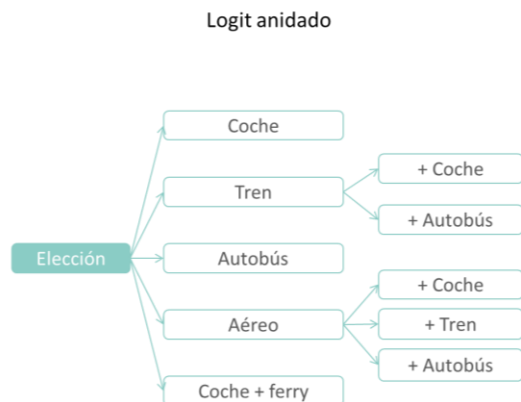
Para el modo “vehículo privado” se modeliza bajo el mismo modo de forma conjunta tanto el viaje del conductor como del resto de ocupantes. De este modo, el modelo de reparto modal calcula el número de personas viajando en coche indistintamente del asiento que ocupen en el vehículo.

Mediante un paso posterior, se podrán usar factores de ocupación de los coches para cada estrato de demanda. Téngase en cuenta que estos factores podrían ser muy diferentes entre sí dependiendo del estrato de demanda al que se refieren. Viajes en coche por motivo (ir al) “trabajo” se realizan principalmente en solitario, con una ratio de ocupación de alrededor de 1,1 personas. En cambio, la ocupación cuando el viaje es por motivo vacacional puede subir a entre 2 y 3 personas por vehículo.

2.8.3 LA ESTRUCTURA DEL MODELO

Se he empleado un modelo de elección discreta de tipo LOGIT anidado, que calcula la probabilidad de todos los modos agregando los diferentes atributos modales en utilidades generalizadas (función de utilidad).

Figura 23. Estructura del modelo de elección discreta empleado



Fuente: PTV

Este modelo se formaliza matemáticamente del siguiente modo:

Para cada estrato de demanda:

$$P_{gij}(m) = \frac{e^{U_{gij}(m)}}{\sum_k e^{U_{gij}(k)}}$$

Donde,

- m = modo
- $P_{gij}(m)$ = probabilidad de que el grupo de población g elija el modo m para un desplazamiento de i a j
- $U_{gij}(m)$ = utilidad del modo m para el grupo g para un desplazamiento de i a j
- La función de utilidad depende de distintos indicadores de oferta:

$$U_{gij}(m) = p_0 + p_i * X_i$$

La utilidad del modo es, por lo tanto, una combinación lineal de diferentes atributos de cada uno de los modos, que se ponderan utilizando los parámetros p_0, p_1, \dots, p_n . El valor de estos parámetros puede variar dependiendo del modo de transporte y del grupo de población.

En el caso de los modos anidados, la utilidad del modo m es una combinación de las utilidades de los sub-modos k :

$$U_{gij}(m) = \frac{1}{\lambda} \sum_k e^{-\lambda U_{gij}(k)}$$

Dónde λ es el parámetro de escala que representa el grado de independencia entre los modos. En el modelo se ha empleado $\lambda = 2$.

2.8.4 VARIABLES EXPLICATIVAS

Las variables explicativas (llamadas X_i) de la elección modal que se tienen en cuenta son:

- Tiempos de transporte por modo de transporte,
- Frecuencia de servicio (tren, avión, ferry)
- El número de conexiones ferroviarias y aéreas / tiempos de espera en las conexiones
- Los tiempos de acceso a los modos,
- Los costes

La limitación de la capacidad en el transporte colectivo y la saturación de la red viaria se toman en cuenta con penalizaciones añadidas a los tiempos de transporte como se explica en el informe metodológico.

Todas estas variables de oferta del sistema de transporte son calculadas directamente y mantenidas en todo momento actualizadas a partir de los

modelos de red implementados y alimentados, a su vez por los archivos GTFS importados. Para ello se emplea el cálculo de matrices de indicadores (skim matrices) para cada par origen destino y modo de transporte- Cabe señalar que los tiempos de viaje, los tiempos de espera y el número de conexiones son los mismos para todos los viajeros en el mismo origen-destino.

Para el vehículo privado, el tiempo generalizado se compone del tiempo de recorrido en flujo libre y de los peajes, convertidos en tiempos con un valor del tiempo. Además, con el uso del método de asignación estocástico, se añade una pausa de 20 minutos cada dos horas.

2.8.5 CONSIDERACIÓN DE LOS COSTES DE VIAJE

Se utilizan los valores del atributo “TARIFA” de las líneas de transporte público que procede de un trabajo específico para establecer los costes de los viajes (ver el informe “20190401_Oferta de transporte público interprovincial.pdf”) y sus posteriores actualizaciones.

Para el tráfico privado, los peajes están incluidos en los arcos del modelo de red viaria. El coste a aplicar en cada caso se obtiene multiplicando la longitud del tramo por el coste kilométrico (en el atributo “PEAJE_LIG”).

2.8.6 VALOR DEL TIEMPO

La valoración económica del tiempo por parte de los usuarios, supone un factor decisivo en el reparto de viajeros entre diferentes modos de transporte.

Con el objetivo de definir el valor del tiempo a utilizar en los desplazamientos estudiados en el Modelo Nacional de Transportes de España, se ha desarrollado una metodología para obtener este parámetro, fundamentada en la recopilación y análisis de bibliografía existente.

En primer lugar se han analizado las siguientes guías, manuales y recomendaciones sobre la determinación de valores del tiempo:

- Manual para la evaluación de inversiones de ferrocarril, 2016. ADIF

- Nota de servicio 3/2014 de la dirección general de carreteras
- Developing harmonised european approaches for transport costing and project assessment (HEATCO)

En segundo lugar, se ha analizado una recopilación de estudios y proyectos elaborados por Adif Alta Velocidad en diferentes corredores asociados a distintos ámbitos geográficos de España.

Estos estudios se centran en caracterizar la demanda de viajeros utilizando técnicas de investigación de campo basadas en Encuestas de Preferencias Reveladas (EPR) y Encuestas de Preferencias Declaradas (EPD).

Una vez analizada la bibliografía existente para la determinación del valor del tiempo, se ha optado por definir un valor del tiempo por motivo de viaje. Por consiguiente, el valor del tiempo utilizado no tiene en consideración el origen y destino de los viajes ni el modo utilizado. Esta metodología es consistente con otros modelos nacionales realizados en países europeos como Francia y Reino Unido. Los valores empleados finalmente en el Modelo Nacional de Transporte han sido obtenidos de HEATCO, como muestra la siguiente tabla.

Tabla 21. Valor del tiempo para cada estrato de demanda

Valor del tiempo [€/h]		Ocupados	Otros	Jubilados	Estudiantes
Hd	Vacaciones	15	10	10	10
W	Trabajo	20			
P	Profesional	30			
S	Segunda residencia	15	10	10	
O	Otro	15	10	10	10
E	Educación				10

Fuente: HEATCO

2.8.7 CÁLCULO DE DEMANDA INDUCIDA POR CAMBIOS EN EL SISTEMA DE TRANSPORTE

Como se indica en el apartado 2.6.2, el modelo de viajeros se consideran nuevos viajes generados por cambios en la oferta de transporte. Estos viajes se estiman en la fase de reparto modal, mediante la aplicación de elasticidades a variaciones en la desutilidad de viaje.

El cálculo de demanda inducida se realiza por par origen-destino y modo de transporte, de forma que la demanda inducida se asigna al modo para el que cambia la oferta en cada relación. En la aplicación de este procedimiento se consideran tanto incrementos como reducciones de demanda asociados a cambios en el sistema de transporte.

A continuación, se muestra la formulación empleada.

$$F_{ij,m} = \left(\frac{U_{ij,m}^{futuro}}{U_{ij,m}^{base}} \right)^{\varepsilon}$$

Donde,

- $F_{ij,m}$ = factor de demanda inducida para la relación i - j en el modo m
- $U_{ij,m}$ = utilidad del modo m para un desplazamiento de i a j
- ε = elasticidad de la demanda a cambios en la desutilidad

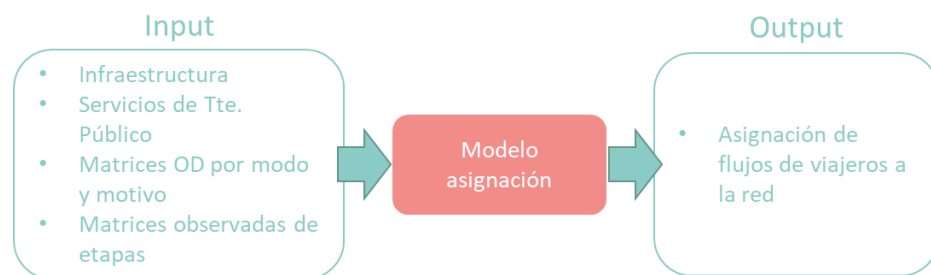
2.9 MODELO DE ASIGNACIÓN DE VIAJEROS

El modelo de asignación representa los procesos de elección de ruta y en el interaccionan íntimamente la demanda de transporte, las infraestructuras y servicios.

El proceso de asignación comprende la búsqueda de caminos, en el caso del vehículo privado y de conexiones de transporte público y el reparto de volúmenes contenidos en la matrices origen-destino por modo.

El resultado de esta fase es la asignación de demanda a la red viaria de carretera, o a los vehículos de transporte público. La siguiente figura ilustra gráficamente el proceso de asignación del Modelo Nacional de viajeros.

Figura 24. Etapa del modelo de asignación



Fuente: Ineco

2.9.1 METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

Asignación de tráfico privado

Se ha empleado un proceso tipo estocástico. Este método distribuye el tráfico entre los distintos caminos posibles para cada par origen destino considerando la elección de caminos subóptimos por parte de algunos viajeros.

Asignación de transporte público

Dada las características del modelo de tipo modelo para la planificación estratégica, se opta por el método basado en frecuencias que precisa de menor detalle en la introducción de escenarios futuros.

2.9.2 CONSIDERACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA OFERTA DE TRANSPORTE

RED VIARIA

En modelización macroscópica, la influencia de la capacidad del viaria en los tiempos de recorrido es gestionada mediante las denominadas *funciones volumen – demora*. De acuerdo con estas funciones, conforme la intensidad se aproxima a la capacidad, los tiempos de recorrido van aumentando, simulando el proceso de saturación viaria.

En el caso del Modelo Nacional de Transportes, al solo considerarse los desplazamientos interprovinciales, se han empleado procedimientos simplificados alternativos para tomar en consideración la congestión viaria.

Además de por la congestión, los tiempos de viaje de largo recorrido se han ajustado para tomar en cuenta las paradas de refresco y repostaje necesarias.

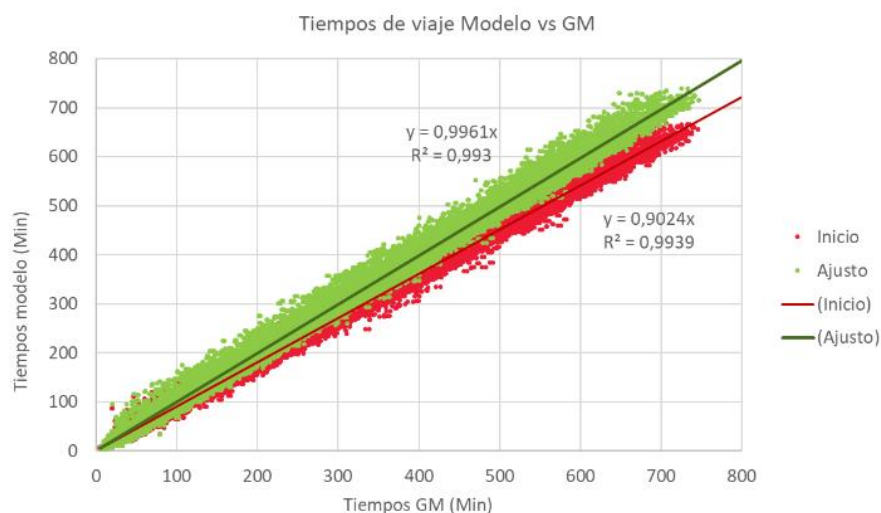
A continuación, se describe el modo en que se han realizado estas aproximaciones:

1^{er} Ajuste: Ajuste de tiempos de recorrido basado en información en tiempo real

Se compara los tiempos de viaje a nivel de relaciones zonales origen destino con planificadores de ruta y los tiempos de viaje en las matrices de indicadores de tiempos de viaje en el modelo. La ventaja de emplear datos planificadores de ruta para ajustar los tiempos de recorrido, es que éstos están basados en tiempos de viaje medios reales, obtenidos a partir de los GPS de teléfonos móviles.

Mediante este ejercicio se ha procedido a obtener factores de ajuste de los tiempos de recorrido para cada tramo de la red viaria. La siguiente figura muestra una comparativa entre los datos de planificadores de ruta y el modelo, con un grado de ajuste notable.

Figura 25. Proceso de ajuste de tiempos de recorrido



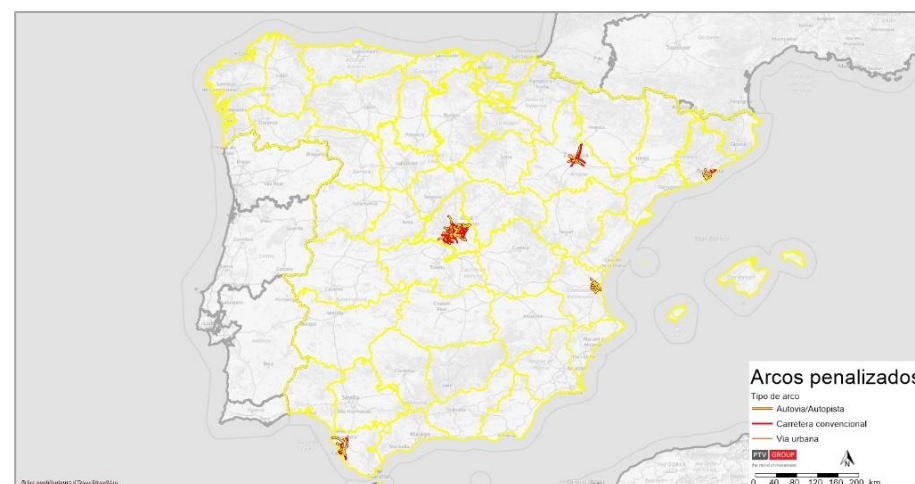
Fuente: PTV

2º Ajuste: Ajuste de penalización por congestión

Una vez ajustados los tiempos de recorrido a los registros de telefonía móvil, se ha procedido a ajustar las velocidades en las mayores zonas metropolitanas para representar la congestión experimentada en hora punta. Para poder aproximar estas penalizaciones en el modelo se ha empleado un procedimiento adicional que se aplica sobre los viajes por motivos “trabajo”, “profesional” y “educación”, más afectados por la congestión en áreas metropolitanas.

- En primer lugar, se seleccionan los arcos que atraviesan zonas que superan un determinado umbral de población. Para estos arcos se considera que la velocidad media es la mitad que la nominal.

Figura 26. Selección de los arcos penalizados



Fuente: PTV

- A continuación, se calcula para cada par OD, una matriz de penalizaciones de la velocidad de los arcos.
- Finalmente, se añade la penalización según su peso con respecto al tiempo “en flujo libre”:

$$\text{Si } \frac{p}{T_0} > 0,05 ; T_p = T_0 + 1,2 * p$$

$$\text{Si } \frac{p}{T_0} > 0,1 ; T_p = T_0 + 1,5 * p$$

$$\text{Si } \frac{p}{T_0} > 0,15 ; T_p = T_0 + 1,8 * p$$

Donde:

T_0 : tiempo de recorrido en flujo libre entre la zona de origen y la zona de destino

p : la penalización entre la zona de origen y la zona de destino

T_p : tiempo de recorrido con penalización entre la zona de origen y la zona de destino

Esa formulación implica que el impacto de la saturación es mayor si representa una parte importante del viaje.

SATURACIÓN EN EL TRANSPORTE PÚBLICO

El modelo contempla un método de limitación de la capacidad en el transporte público. Se define un coeficiente de penalización que depende de la tasa de ocupación de los servicios según la formulación siguiente:

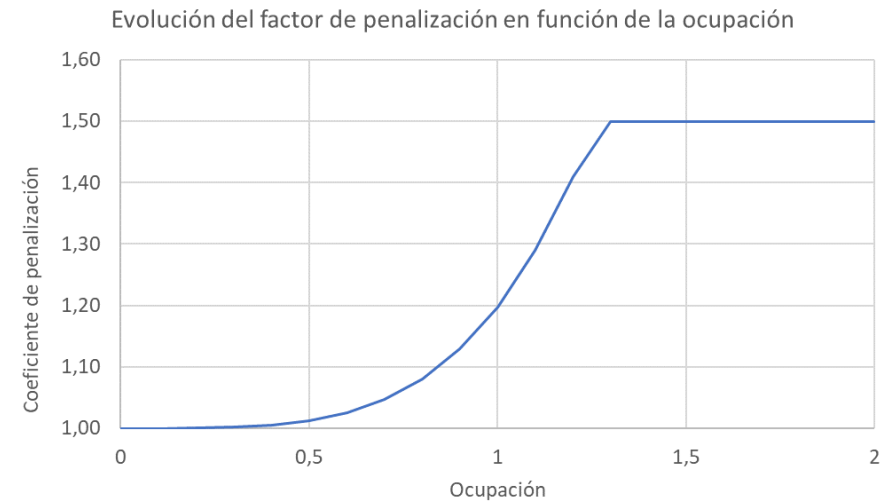
$$p = \min\left(1.5; \frac{sat^4}{1.5}\right)$$

Dónde:

Sat : ocupación

p : el coeficiente de penalización

Figura 27. Factor de penalización



Fuente: PTV

En la etapa de asignación, los tiempos de recorrido de los servicios son multiplicados por el coeficiente de penalización durante la búsqueda de itinerario. Al fin del procedimiento, los coeficientes son actualizados. A continuación, dentro de un bucle, sirven en el cálculo de los indicadores de manera que los tiempos penalizados puedan ser utilizados en las etapas de distribución y reparto modal, antes de asignar de nuevo. Esto se repite hasta que el modelo de demanda converja.

2.10 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE VIAJEROS

Los procedimientos de calibración y validación son el núcleo del proceso de modelización, ya que proporcionan una medida del nivel de precisión del modelo al representar la realidad observada. De la misma forma, puede entenderse como una medida de la fiabilidad del modelo en la representación de escenarios futuros.

Calibración y validación son conceptos diferentes que con frecuencia suelen confundirse, y cuyos procesos tienen finalidades diferentes.

- **Calibración** es el proceso de ajustar los parámetros de las diferentes expresiones matemáticas del modelo de tal forma que las salidas del modelo sean coherentes con los datos observados.
- La **validación** es un proceso consistente en comparar los resultados producidos por el modelo calibrado con datos reales independientes no empleados en el desarrollo de este.

Para ello, es necesario que la **información usada** en la calibración del modelo se mantenga **separada e independiente** de aquella utilizada para la validación, de manera que el proceso de validación constituya una verdadera validación del funcionamiento del modelo calibrado.

2.10.1 MODELOS DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

En este epígrafe se describen los criterios utilizados en el proceso de calibración para la obtención de los parámetros de modelización presentados en cada fase de modelización.

Se han empleado los siguientes **criterios de calibración**:

- La distancia media de viaje por estrato de demanda
- La distribución del número de viajes por rangos de distancias (histograma de distancias)

- Matrices O-D por estrato de demanda

Se recuerda que los *estratos de demanda* sirven para clasificar a la población cuyo patrón de movilidad de larga distancia se pretende modelizar. Y que para cada estrato de demanda se calibran sus parámetros propios de comportamiento en cada etapa del modelo. Este proceder permite, en general, un mejor ajuste del modelo a la realidad observada.

Los resultados de la calibración se muestran a continuación mediante la comparación entre datos observados y modelados de los criterios de calibración seleccionados. En este sentido, es de resaltar que el documento de diseño solo incluye una selección de las comprobaciones realizadas en la fase de calibración a modo ilustrativo. El documento de calibración y validación presenta mayor grado de detalle sobre este proceso.

Distancia media de viaje por estrato de demanda

A modo ilustrativo se incluyen solo los resultados para los días tipo laborable de periodo estival (J99) y no estival (O99).

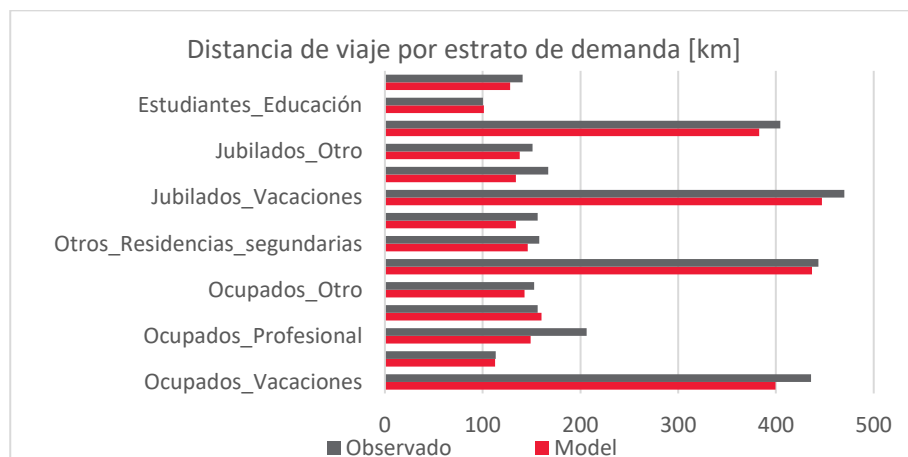
Tabla 22. Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo J99

Cod Estrato	Estrato de demanda	Observado	Modelado	% dif.
HHd_W	Ocupados_Vacaciones	436	400	-8%
HW_W	Ocupados_Trabajo	114	113	-1%
HP_W	Ocupados_Profesional	206	149	-28%
HS_W	Ocupados_Residencias_segundarias	156	160	3%
HO_W	Ocupados_Otro	153	143	-7%
HHd_O	Otros_Vacaciones	444	437	-2%
HS_O	Otros_Residencias_segundarias	158	146	-8%
HO_O	Otros_Otro	156	134	-14%
HHd_R	Jubilados_Vacaciones	470	447	-5%
HS_R	Jubilados_Residencias_segundarias	167	134	-20%
HO_R	Jubilados_Otro	151	138	-9%

Cod Estrato	Estrato de demanda	Observado	Modelado	% dif.
HHd_S	Estudiantes_Vacaciones	405	383	-5%
HE_S	Estudiantes_Educación	100	101	1%
HO_S	Estudiantes_Otro	141	128	-9%

Fuente: PTV

Figura 28. Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo J99



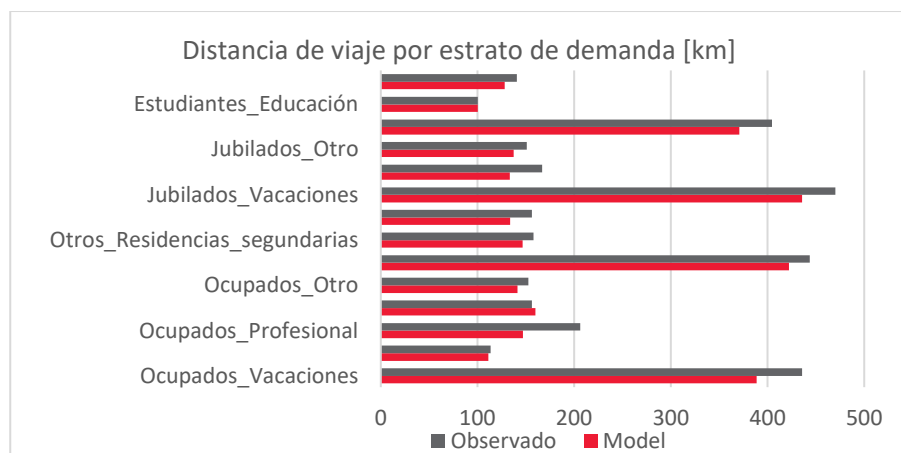
Fuente: PTV

Tabla 23. Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo O99

Cod Estrato	Estrato de demanda	Observado	Modelado	% dif.
HHd_W	Ocupados_Vacaciones	436	389	-11%
HW_W	Ocupados_Trabajo	114	111	-2%
HP_W	Ocupados_Profesional	206	147	-29%
HS_W	Ocupados_Residencias_segundarias	156	160	2%
HO_W	Ocupados_Otro	153	141	-7%
HHd_O	Otros_Vacaciones	444	422	-5%
HS_O	Otros_Residencias_segundarias	158	147	-7%
HO_O	Otros_Otro	156	134	-14%
HHd_R	Jubilados_Vacaciones	470	436	-7%
HS_R	Jubilados_Residencias_segundarias	167	134	-20%
HO_R	Jubilados_Otro	151	138	-9%
HHd_S	Estudiantes_Vacaciones	405	371	-8%
HE_S	Estudiantes_Educación	100	100	0%
HO_S	Estudiantes_Otro	141	128	-9%

Fuente: PTV

Figura 29. Distancia media de viaje por estrato de demanda. Día Tipo O99



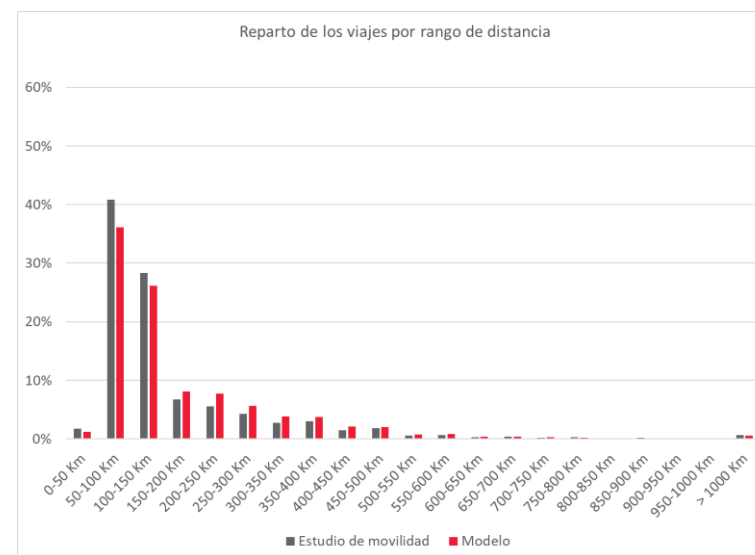
Fuente: PTV

Se observa como el modelo reproduce correctamente los diferentes patrones de viajes observados. Se destaca, por ejemplo, cómo los viajes por vacaciones son muy largos (400 km de media), los viajes profesionales son de medio alcance (unos 200 km de media) y el resto se encuadran en el rango de entre los 100 y los 150 km de media.

Histograma de distancias

La distribución de frecuencias de viajes por distancias para el día tipo J99 y para todos los estratos agregados es la siguiente:

Figura 30. Distribución de frecuencias de viajes totales clasificados por distancia. Contraste entre observado y modelado



Fuente: PTV

Se observa que apenas hay viajes de menos de 50 km, conforme a las características de los datos del estudio de movilidad de partida. Alrededor del 70% de los viajes se concentran en la franja entre 50 y 100 km.

Por otro lado, se observa cierta cantidad de viajes de muy larga distancia (mayores de 1.000 km) que se corresponden con los viajes entre la península y Canarias.

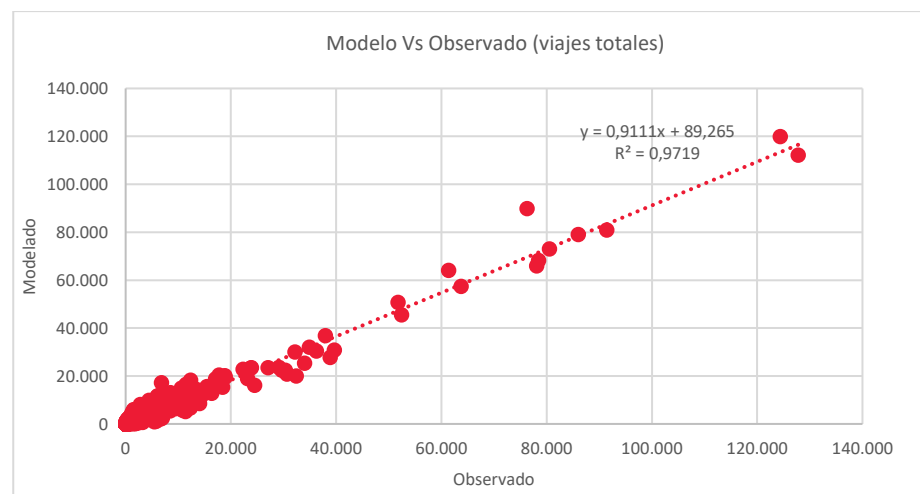
Si se analizan los resultados por estrato de demanda (ver documento de calibración y validación) también se observan niveles de ajustes muy ajustados. Si bien para algunos motivos, los volúmenes de algunos rangos puedan diferir, el patrón general de distribución para cada motivo consigue ser reproducido por el modelo.

En este sentido, se observa como cada motivo tiene su patrón, alguno con sus particularidades, como puede ser el motivo vacacional que no presenta un comportamiento gravitacional sino que reparte mucho más sus viajes por todo el espectro de distancias.

Matrices OD por estrato de demanda

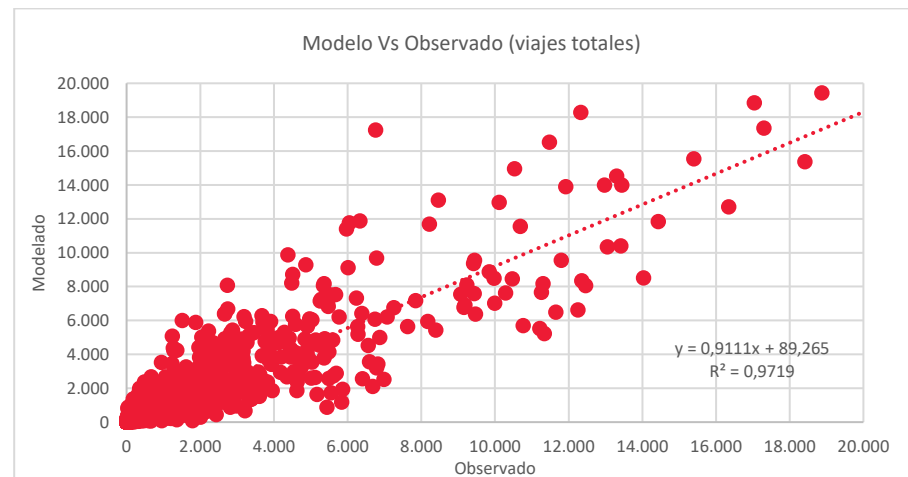
El siguiente nivel de detalle se corresponde a la distribución espacial de los viajes, en concreto a la capacidad del modelo de aproximar los flujos origen destino interprovinciales observados.

Figura 31. Diagrama de dispersión matriz OD interprovincial observada (estudio de movilidad) y modelada. Día Tipo J99



Fuente: PTV

Figura 32. Diagrama de dispersión matriz OD interprovincial. Detalle de celdas < 20,000 viajes. Día Tipo J99



Fuente: PTV

Se observa como el grado de correlación es muy alto, con R^2 del 0,97. De donde se deduce el comportamiento satisfactorio del modelo visto globalmente.

Se concluye que el grado de ajuste para las relaciones OD más importante es muy alto y que, para el resto, el ajuste es aceptable destacando el hecho de que no haya puntos totalmente discordantes (outliers).

2.10.2 MODELO DE REPARTO MODAL

Como prueba de calibrado se han empleado las siguientes comparaciones entre modelado y observado:

- Reparto modal agregado
- Reparto modal por rango de distancias
- Ajuste de los flujos origen destino interprovinciales por modos
- Reparto modal en corredores de transporte más demandados

Reparto modal agregado

De forma agregada, se observa un muy alto grado de ajuste de los volúmenes generados repartidos por modo de transporte.

Tabla 24. Comparación observado modelado de reparto modal agregado. Día Tipo J99

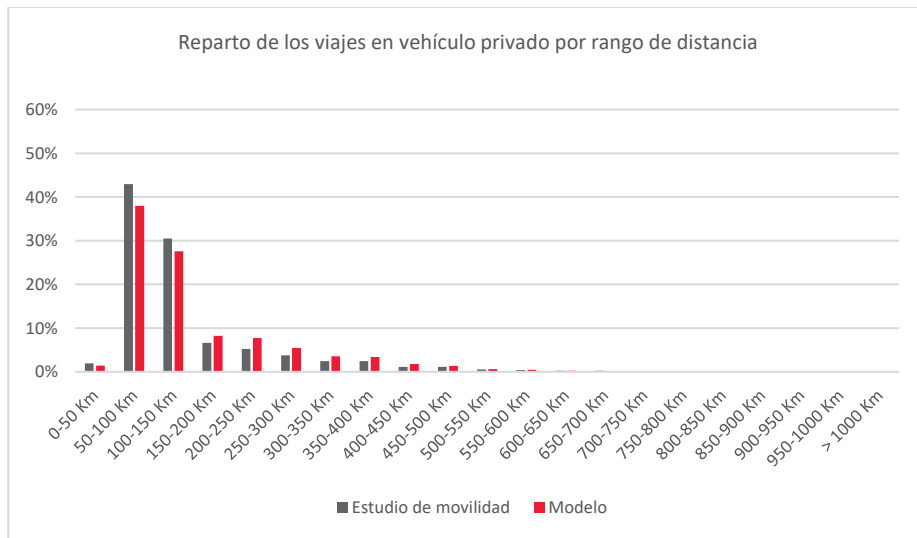
Cód.	Modo	Número de viajes			Reparto modal			Distancia media [Km]			
		Observado	Modelo	Diferencia	Observado	Modelo	Diferencia	Observado	Modelo	Diferencia	Diferencia %
C	Vehículo privado	3,002,500	3,010,500	8,000	86.0%	86.2%	0.2	145	160	14	10%
B	Autobús	113,800	108,600	-5,200	3.3%	3.1%	-0.1	166	169	3	2%
R	Tren	198,800	186,300	-12,500	5.7%	5.3%	-0.4	233	217	-17	-7%
A	Avión	101,800	120,600	18,800	2.9%	3.5%	0.5	729	650	-79	-11%
S	Barco	73,500	64,700	-8,800	2.1%	1.9%	-0.3	217	183	-34	-16%
	Total	3,490,400	3,490,700	300	100%	100%		169.6	180.5	10.9	6%

Fuente: PTV

Reparto modal por rango de distancias

La siguiente figura muestra un elevado grado de ajuste entre las distancias medias de viaje modeladas y observadas.

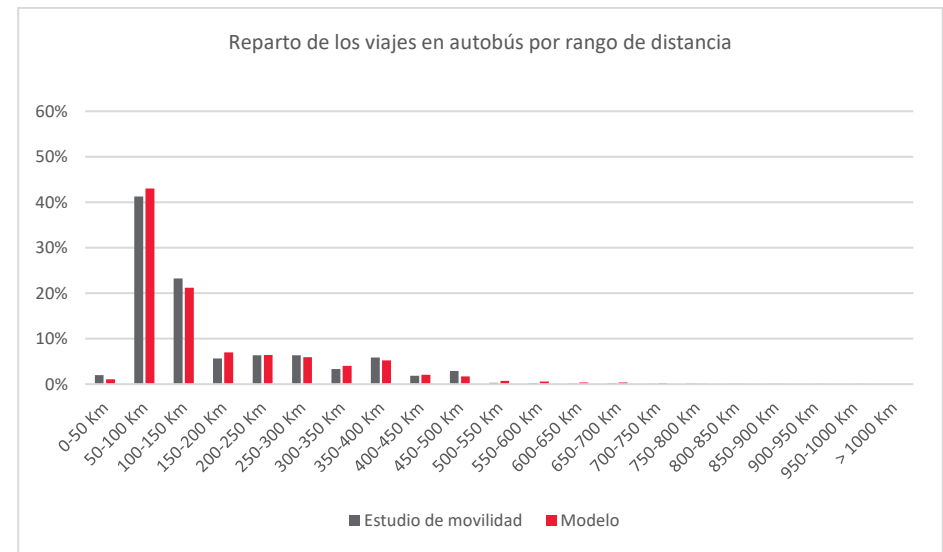
Figura 33. Histograma de distancias. Modo vehículo privado. Día Tipo J99



Fuente: PTV

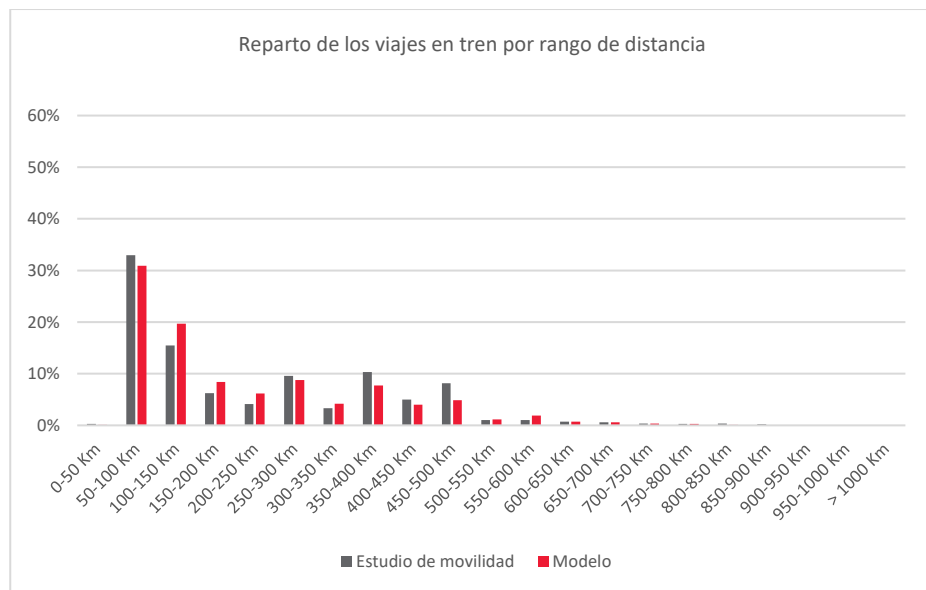
En los casos del tren y autobús (siguientes figuras) el grado de ajuste de la distribución es muy alto. Destaca el caso del tren en el rango entre los 50 y los 100 km en el que se mezclan viajes regionales de media distancias con algunos servicios de cercanías interprovinciales incluidos en el modelo.

Figura 34. Histograma de distancias. Modo autobús. Día Tipo J99



Fuente: PTV

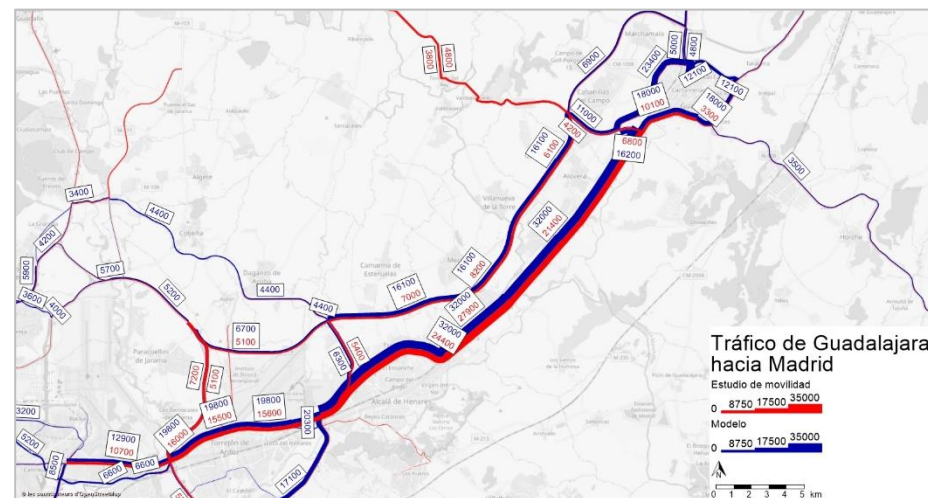
Figura 35. Histograma de distancias. Modo ferrocarril. Día Tipo J99



2.10.1 MODELOS DE ASIGNACIÓN

El modelo de asignación se ha calibrado mediante la comparación de flujos de demanda del modelo con datos observados. Por ello, se ajustan los parámetros para alcanzar un reparto de la carga entre itinerarios alternativos que se parezca al reparto observado en las rutas del estudio de movilidad.

Figura 36. Imagen ilustrativa del proceso de calibrado de la asignación del vehículo privado



2.10.1 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo se han realizado comprobaciones con datos de demanda de transporte independientes a aquellos empleados en el calibrado.

En concreto, se han empleado:

- **Modo ferroviario:** contraste de resultados del modelo con los datos observados de demanda.
- **Modo aéreo:** contraste de resultados del modelo con los datos procedentes de AENA.

Ferrocarril

Se comparan los resultados de volúmenes asignados diarios entre pares OD de estaciones y los registrados.

En la comparación se utiliza el indicador GEH de uso habitual para validaciones de modelos.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}}$$

Donde M es el valor modelado y C el registrado. Con los siguientes resultados de conjunto:

Tabla 25. Validación de del modo tren. Día Tipo J99

Categoría de GEH	Número de observaciones	Porcentaje
GEH <= 16	8 144	97,2%
16 <= GEH <= 32	199	2,4%
GEH > 32	39	0,5%
Total	8 382	100%

Fuente: PTV

Modo aéreo

Se utiliza en la validación datos del anuario de AENA. Estos datos son proporcionados con una desagregación temporal mensual para cada aeropuerto. Para poder realizar la comparación se ha procedido del siguiente modo:

Los resultados del modelo para cada día tipo de Julio se suman según el esquema siguiente: 17 x J99 + 4 x J04 + 5 x J06. Faltan los sábados que el modelo no contempla para obtener un número de pasajeros modelizado para Julio. Por ello, se aplica un coeficiente de 6/7 a los datos Aena para que los resultados del modelo se puedan comparar con estos datos, bajo la hipótesis simplificada de que los sábados cuentan como los otros días de la semana en el tráfico aéreo.

Tabla 26. Comparación observado modelado de número de pasajeros en los 10 mayores aeropuertos

Aeropuertos	Pasajeros	Pasajeros 6 días	Modelo	Diferencia
Adolfo Suárez Madrid-Barajas	5 088 000	4 361 140	4 208 370	-4%
Barcelona-el Prat	5 041 480	4 321 270	3 701 210	-14%
Palma de mallorca	4 157 380	3 563 470	2 020 120	-43%
Málaga-Costa del Sol	2 187 120	1 874 670	2 034 340	9%
Alicante-elche	1 632 870	1 399 600	891 800	-36%
Ibiza	1 369 180	1 173 580	778 970	-34%
Gran Canaria	1 087 410	932 060	820 000	-12%
Tenerife sur	931 940	798 800	580 870	-27%
Valencia	719 310	616 550	1 017 190	65%
Lanzarote	691 540	592 750	487 680	-18%
Total	27 565 683	23 627 730	20 612 030	-13%

Fuente: PTV

Se observa como el modelo presenta mayor ajuste con la realidad en los principales aeropuertos y se aproxima menos en los aeropuertos de tráfico débiles.

2.10.2 PRUEBA DE REALISMO

Las pruebas de realismo se utilizan habitualmente como parte del proceso de calibración/validación. El hecho de que un modelo esté bien calibrado no es garantía única de que sea apropiado para realizar proyecciones futuras fiables. Es decir, cambios en la oferta de transporte deberían traducirse en cambios realistas en la demanda, consistentes con experiencias previas, criterios internacionales y bibliografía existente.

El criterio de aceptación para la capacidad de predicción del modelo se ha realizado mediante análisis de elasticidad a la demanda. Se ha analizado la sensibilidad al coste para los viajes en vehículo privado, y al tiempo generalizado de viaje para el transporte público.

Los parámetros de aceptación han tendido en cuenta referencias bibliográficas, experiencias existentes y recomendaciones internacionales en el desarrollo de modelos.

La elasticidad de la demanda hace referencia al grado en que esta varía al cambiar determinada variable explicativa del modelo.

Se distinguen dos tipos de elasticidades:

- Elasticidad directa: hace referencia a la reacción de la demanda en un modo de transporte al modificar una variable de oferta de éste. Por ejemplo: cambio en la demanda de tráfico privado al reducir tiempos en la red viaria.
- Elasticidad cruzada: hace referencia a la reacción de la demanda en un modo de transporte al variar una variable de oferta de otro modo. Por ejemplo: el efecto en la demanda ferroviaria debido al cambio en tiempos de viaje en carretera del ejemplo anterior.

En resumen, en la fase de calibrado del modelo el análisis de elasticidades del modelo trata de evidenciar:

- Que el modelo reacciona a cambios en variables explicativas

- Que lo hace en el sentido que se espera que reaccione, y si no lo hiciera, que existe una explicación a tal fenómeno contraintuitivo
- Que la reacción es de un grado de magnitud realista de acuerdo con otras experiencias o casos documentados
- Que las elasticidades cruzadas son lógicas e, igualmente en un orden de magnitud razonable.

En el contexto del calibrado del modelo se han realizado distintas pruebas sintéticas de elasticidad, entre los que destacan los siguientes:

- Impacto en la demanda tanto directa como cruzada de una reducción de los tiempos de viajes **en coche** en un 10%
- Impacto en la demanda tanto directa como cruzada de una reducción de los tiempos de viajes **en tren** en un 10%

Las tablas de la página siguiente muestran los resultados de ambas pruebas de realismo

Los valores de elasticidad, evaluados en base al cambio porcentual en demanda, se consideran --a la conclusión del proceso de ajustes de calibrado-- adecuados y dentro del orden esperado para un modelo de estas características.

Tabla 27. Análisis de sensibilidad y elasticidad del modelo frente a una reducción del 10% en los tiempos de viaje en vehículo privado

Modo	Número de viajes			Reparto modal			Elasticidad	Distancia media [Km]			
	Base	Test	Diferencia	Base	Test	Diferencia		Base	Test	Diferencia	Diferencia %
Vehículo privado	3 012 500	3 045 000	32 500	86,3%	87,2%	0,009	-0,11	160	162	2	1,4%
Autobús	108 100	99 700	-8 400	3,1%	2,9%	-0,002	0,78	168	163	-6	-3,4%
Tren	184 700	168 100	-16 600	5,3%	4,8%	-0,005	0,90	217	211	-6	-2,6%
Avión	117 900	110 600	-7 300	3,4%	3,2%	-0,002	0,62	656	666	10	1,6%
Barco	67 500	67 300	-200	1,9%	1,9%	0,000	0,03	192	193	1	0,6%
Total	3 490 700	3 490 700	0	100%	100%			180,5	181,1	0,5	0,3%

Fuente: PTV

Tabla 28. Análisis de sensibilidad y elasticidad del modelo frente a una reducción del 10% en los tiempos de viaje en tren

Modo	Número de viajes			Reparto modal			Elasticidad	Distancia media [Km]			
	Base	Test	Diferencia	Base	Test	Diferencia		Base	Test	Diferencia	Diferencia %
Vehículo privado	3 012 500	3 003 800	-8 700	86,3%	86,1%	-0,002	0,03	160	160	0	-0,1%
Autobús	108 100	107 700	-400	3,1%	3,1%	0,000	0,04	168	168	-1	-0,4%
Tren	184 700	194 600	9 900	5,3%	5,6%	0,003	-0,54	217	220	3	1,5%
Avión	117 900	117 000	-900	3,4%	3,4%	0,000	0,08	656	657	1	0,2%
Barco	67 500	67 600	100	1,9%	1,9%	0,000	-0,01	192	192	0	0,2%
Total	3 490 700	3 490 700	0	100%	100%			180,5	180,6	0,0	0,0%

Fuente: PTV

3 DISEÑO DEL MODELO DE MERCANCÍAS

3.1 ZONIFICACIÓN

Para el modelo de mercancías del Modelo Nacional de Transporte se ha adoptado una zonificación correspondiente con los límites administrativos de España, como se expone con anterioridad. El territorio peninsular se divide a nivel provincial y se define una zona diferente para cada una de las islas, resultando un total de 59 zonas internas.

Por otro lado, se definen 27 zonas externas que comprenden el resto del mundo. Francia y Portugal se dividen en varias zonas, por tener mayor influencia en el sistema de transporte español. Por otro lado, hay zonas coincidentes con países y otras que agrupan varios de ellos.

Aparte de este sistema de zonificación (coincidente con el empleado en el modelo de viajeros), se definen en Visum una serie de **zonas auxiliares de intercambio modal**:

- **Marítimo-terrestre:** 23 zonas portuarias que representan el nodo de intercambio entre el modo marítimo y la carretera o el ferrocarril.
- **Carretera-ferrocarril:** 32 terminales ferroviarias intermodales.

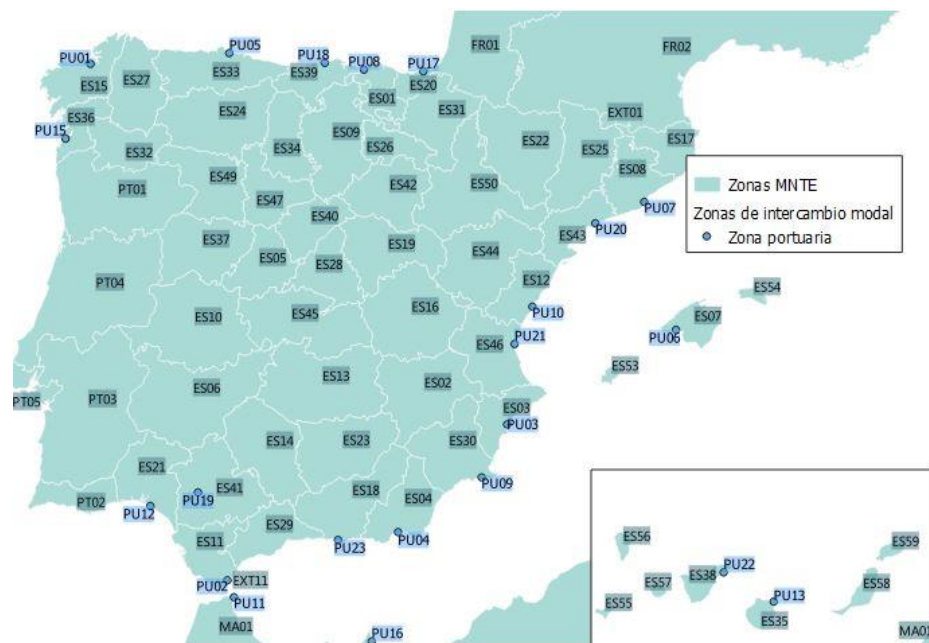
En las tablas y figuras siguientes, se enumeran y se ubican ambos grupos de zonas:

Tabla 29. Zonas portuarias de intercambio modal marítimo - terrestre

ID ZONA	NOMBRE	ZONA ASOCIADA	INTERNA
PU01	AAPP A Coruña-Ferrol	ES15	
PU02	AAPP Algeciras-Cádiz	ES11	
PU03	AP Alicante	ES03	
PU04	AP Almería	ES04	
PU05	AAPP Avilés-Gijón	ES33	
PU06	AP Baleares	ES07 / ES54 / ES53	
PU07	AP Barcelona	ES08	
PU08	AP Bilbao	ES48	
PU09	AP Cartagena	ES30	
PU10	AP Castellón	ES12	
PU11	AP Ceuta	ES51	
PU12	AP Huelva	ES21	
PU13	AP Las Palmas	ES35 / ES58 / ES59	
PU14	AP Málaga	ES29	
PU15	AAPP Vigo-Marín-Vilagarcía	ES36	
PU16	AP Melilla	ES52	
PU17	AP Pasaia	ES20	
PU18	AP Santander	ES39	
PU19	AP Sevilla	ES41	
PU20	AP Tarragona	ES43	
PU21	AP Valencia	ES46	
PU22	AP Tenerife	ES38 / ES55 / ES56 / ES57	
PU23	AP Motril	ES18	

Fuente: Ineco

Figura 37. Localización de las zonas de intercambio modal marítimo - terrestres



Fuente: Ineco

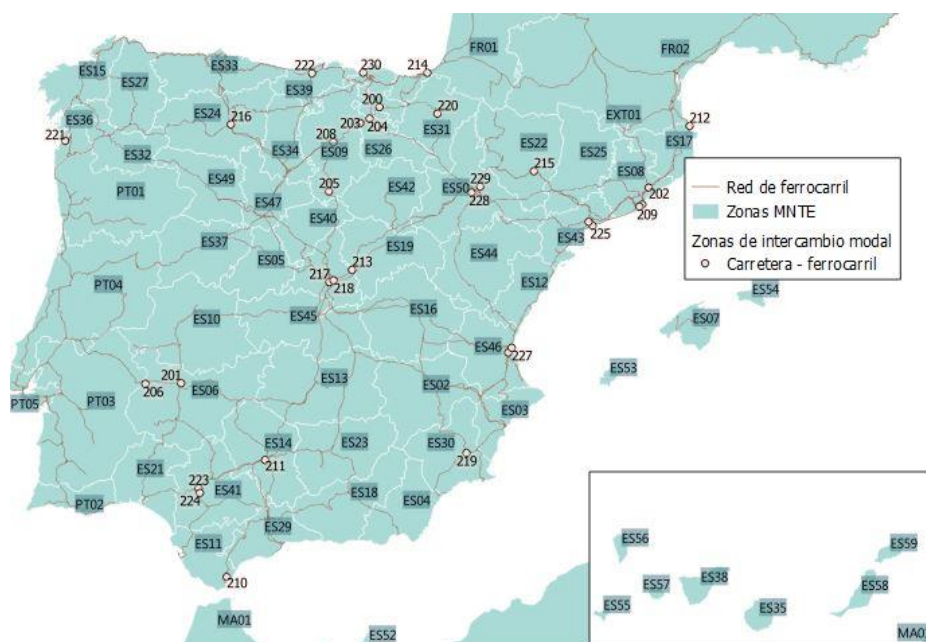
Tabla 30. Zonificación del MNT. Zonas de intercambio modal carretera - ferrocarril

ID ZONA	NOMBRE	PROVINCIA
200	I_CF_Jundiz	Álava
201	I_CF_Merida_Mercancias	Badajoz
202	I_CF_Granollers_Mercaderies	Barcelona
203	I_CF_Pancorbo	Burgos
204	I_CF_Miranda_de_Ebro_Mercancias	Burgos
205	I_CF_Aranda_de_Duero_(P.I._Prado_Marina)	Burgos
206	I_CF_Badajoz	Badajoz
207	I_CF_Barcelona_Morrot	Barcelona
208	I_CF_Villafria	Burgos
209	I_CF_Barcelona_Can_Tunis	Barcelona
210	I_CF_San_Roque-La_Linea_Mercancias	Cádiz
211	I_CF_Cordoba_Mercancias_/El_Higueron	Córdoba
212	I_CF_Portbou_Mercancias	Girona
213	I_CF_Azuquena	Guadalajara
214	I_CF_Irun_Mercancias	Gipuzkoa
215	I_CF_Selgua	Huesca
216	I_CF_Leon_Mercancias	León
217	I_CF_Madrid_Abrongal	Madrid
218	I_CF_Centro_Logistico_de_Vicalvaro	Madrid
219	I_CF_Murcia_Mercancias	Murcia
220	I_CF_Noain	Navarra
221	I_CF_Vigo_Guixar	Pontevedra
222	I_CF_Torrelavega_Mercancias	Cantabria
223	I_CF_Sevilla_Majarabique_Mercancias	Sevilla
224	I_CF_Sevilla_La_Negrilla	Sevilla
225	I_CF_Tarragona_Mercancias	Tarragona
226	I_CF_Silla_mercancias	Valencia

ID ZONA	NOMBRE	PROVINCIA
227	I_CF_Valencia_Fuente_de_San_Luis	Valencia
228	I_CF_Zaragoza_Plaza	Zaragoza
229	I_CF_Zaragoza_Corbera_Alta	Zaragoza
230	I_CF_Bilbao_Mercancias	Bizkaia
231	I_CF_Constanti	Tarragona

Fuente: Ineco

Figura 38. Localización de las zonas de intercambio modal carretera - ferrocarril



Fuente: Ineco

3.2 CLASIFICACIÓN DE LAS MERCANCÍAS

Partiendo de la envolvente de clasificaciones de mercancías aplicadas en los diferentes modos de transporte, se ha propuesto una clasificación específica para el MNT basada en los siguientes criterios:

- **Nivel de detalle equilibrado:** La clasificación debe permitir caracterizar las especificidades de los principales sectores del tejido productivo español generadores de flujos de mercancías, sin olvidar que un nivel de detalle demasiado eleva podría derivar en un modelo excesivamente complejo.
- **Posibilidad de reclasificar:** Las categorías originales de las bases de datos disponibles según la clasificación propuesta para el MNT.
- **Trazabilidad entre la naturaleza de la mercancía:** El sector económico en el que queda enmarcada y el tipo de vehículo empleado para el transporte en cada caso.

En la tabla siguiente se muestra la clasificación de mercancías propuesta para el MNT.

Tabla 31. Clasificación de mercancías propuesta para el MNT

Sector económico		Tipo mercancía	
SE1	Automoción	M1	Automóviles
		M2	Piezas de automóviles
SE2	Industria metalúrgica	M3	Productos de la industria siderúrgica: bobinas y perfiles de acero, chatarra, carriles, etc.
SE3	Energético	M4	Combustibles líquidos y gaseosos
SE4	Sector químico	M5	Productos de la industria química
SE5	Construcción	M6	Materiales de construcción: cemento, calizas, cenizas, etc.
SE6	Minería	M7	Minerales: carbón, sal, mineral de hierro, etc.
SE7	Madera & Papel	M8	Madera
		M9	Pasta de papel, bobinas de papel, etc.
SE8	Agrícola & Gran Consumo	M10	Graneles sólidos agroalimentarios (cereales, abonos, etc.)
		M11	Graneles líquidos agroalimentarios (leche, aceites, etc.)
		M12	Productos alimentarios perecederos
		M13	Otros productos manufacturados para gran consumo
SE9	Maquinaria y bienes de equipo no contemplados en otros apartados	M14	Máquinas, vehículos ferroviarios, barcos, remolques, vehículos industriales
SE10	Desconocido/varios	M15	Resto (*)

(*) Intermodal / Contenedor

Fuente: Ineco

3.3 CONSTRUCCIÓN DE LAS MATRICES DE DEMANDA DE MERCANCÍAS

Esta tarea tiene como objetivo determinar los flujos de mercancías que se transportan en el año base 2017 tomando como referencia el ámbito espacial del modelo (*zonificación*) para cada categoría de mercancía (*clasificación*), en los distintos modos de transporte.

Así pues, a partir del análisis y tratamiento de la información obtenida de las distintas fuentes oficiales, se han construido dos tipos de matrices de demanda “observadas”:

- **Matrices origen – destino de etapas.** Hacen referencia a cada uno de los trayectos realizados mediante un único modo de transporte. Se construyen, por tanto, cuatro matrices para cada categoría de mercancía: carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo. Estas matrices se toman como referencia para el proceso de calibración.
- **Matriz origen – destino de viajes.** Esta matriz representa el trayecto completo de las cadenas de transporte, pudiendo incluir una sola etapa (viajes unimodales) o dos etapas (viajes multimodales¹⁵). Se construye una única matriz de viajes para cada categoría de mercancía que se toma como punto de partida para el proceso de modelización.

A continuación, se exponen las fuentes de datos y metodología seguida para la construcción de las matrices de etapas por modo de transporte, así como de las matrices de viajes.

3.3.1 MATRIZ DE ETAPAS MODO CARRETERA

3.3.1.1 Fuentes de datos

Para la obtención de flujos de mercancías por carretera para 2017 de acuerdo con la zonificación y la clasificación de mercancías establecida, se han empleado las siguientes fuentes de datos:

- **Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera 2017**, empleada para la determinación de los flujos interprovinciales interiores de España. A partir de esta encuesta se determinan igualmente los tráficos RO-RO nacionales entre península y zonas insulares, Ceuta y Melilla.
- **Encuesta Transit 2010 (*Enquête Transit 2010*)**, empleada para la determinación del origen y destino de flujos por carretera que atraviesan los Pirineos. Por tanto, a partir de esta encuesta se obtienen los flujos rodados entre España con el resto de países europeos. Dado que la encuesta es del año 2010, se utilizan datos de comercio exterior (Eurostat) para la actualización de la información al año base 2017.
- **Encuesta sobre el transporte de mercancías por carretera 2008 (*Inquerito ao Transporte Rodoviária do Mercadorias 2008*)**. Encuesta elaborada en Portugal en 2008 mediante la cual se determinan los tráficos entre Portugal y España. Del mismo modo que la encuesta Transit, es necesario actualizar a 2017 los datos originales apoyándose en datos de Eurostat.

¹⁵ A efectos de construcción de estas matrices en el año base 2017 solamente se consideran cadenas marítimo-terrestres (carretera/ferrocarril).

- **Observatorio del transporte marítimo de corta distancia en España 2017**, empleado para determinar los flujos RO-RO internacionales, no incluidos en la Encuesta Permanente de Transporte por Carretera.
- **Datos de comercio exterior de la Agencia Tributaria**, empleado para determinar la distribución de los tráficos RO-RO en el lado tierra, entre los puertos y hacia/desde las provincias españolas.

3.3.1.2 Metodología

Los flujos de mercancías se representan en 15 matrices (correspondientes a las 15 categorías de mercancías definidas) de dimensiones 86 x 86, recogiendo todos los pares origen – destino de la zonificación del MNT para el año 2017. Para obtenerlas se han aplicado en cada una de las fuentes de datos, tres procesos fundamentales:

- Adaptación de la zonificación a la definida para el Modelo Nacional de Transporte: operaciones de agregación y desglose de las zonas empleadas en la fuente original.
- Adaptación de la tipología de mercancías a la definida para el Modelo Nacional de Transporte: operaciones de agregación y desglose de las categorías de la fuente original.
- Actualización de los datos: empleo de factores para homogeneizar el marco temporal de las diferentes fuentes, empleando 2017 como año base.

Posteriormente, se integran los resultados de cada fuente en la denominada Matriz de flujos por Carretera.

3.3.2 MATRIZ DE ETAPAS MODO FERROCARRIL

3.3.2.1 Fuentes de datos

Para la construcción de la matriz origen-destino de toneladas transportadas por ferrocarril en España en 2017 se ha partido fundamentalmente de dos bases de datos:

- Matriz O-D de toneladas transportadas en 2017, de Renfe Mercancías. En esta base de datos, Renfe registra las toneladas netas transportadas por origen-destino y mercado.
- Base de datos de circulaciones reales de mercancías en 2017, de Adif. Esta base de datos incluye todas las circulaciones de trenes de mercancías realizadas sobre la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG), por operador y origen-destino. La base de datos de Adif no contiene información sobre el tipo de tren ni la naturaleza de la mercancía, tampoco sobre las toneladas netas transportadas, pero sí se registra en cada caso las Toneladas Brutas Remolcadas (TBR)¹⁶ Programadas.

Además de las bases de datos anteriores, también se han utilizado otras fuentes de información complementarias:

- Plan de Transporte de Renfe Mercancías de marzo de 2017. En esta base de datos se registran las circulaciones de trenes de mercancías programadas por Renfe a lo largo de un determinado periodo. Del Plan de Transporte puede extraerse información más específica para el transporte de contenedores (etiquetado en la base de datos de toneladas como mercado intermodal, sin referencia a la

¹⁶ Las TBR incluyen la carga neta más la tara remolcada por las locomotoras, según el programa de transporte proporcionado por el operador ferroviario.

naturaleza de las mercancías), como aquellos que contienen mercancías peligrosas o productos perecederos.

- Informe del Observatorio del Ferrocarril (2017), de la Fundación de Ferrocarriles Españoles.

En este informe se publican datos globales sobre las toneladas publicadas por todos los operadores ferroviarios, distinguiendo entre Renfe Mercancías y los Operadores Ferroviarios Privados.

- Eurostat database: Railway transport measurement – goods (rail_go).
Esta base de datos se ha utilizado para analizar los flujos internacionales de mercancías transportados por ferrocarril.
- Datos de comercio exterior de la Agencia Tributaria (DUAs).

Esta base de datos se emplea para poder identificar las cadenas con etapa marítima (viajes) a partir de las relaciones terrestres (etapas) que presentan origen o destino en zonas portuarias.

No se disponen de bases de datos de toneladas transportadas por los operadores privados:

- Continental Rail (CR)
- Acciona Rail Service (ARS)
- Tracción Rail (TR)
- Comsa Rail Transport (CRT)
- Logitren (LT)
- Transfesa (TF)
- Low Cost (LC)
- Transitia (TA)

Tampoco de las toneladas transportadas por los ferrocarriles autonómicos, fuera de la RFIG.

- Euskotren-Euskocargo (EK, País Vasco).
- Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya (FGC, Cataluña).

3.3.2.2 Metodología

El objetivo del trabajo realizado es obtener una matriz origen-destino de toneladas transportadas por ferrocarril en España para el año base (2017), por tipo de mercancía según la clasificación propuesta para el MNT.

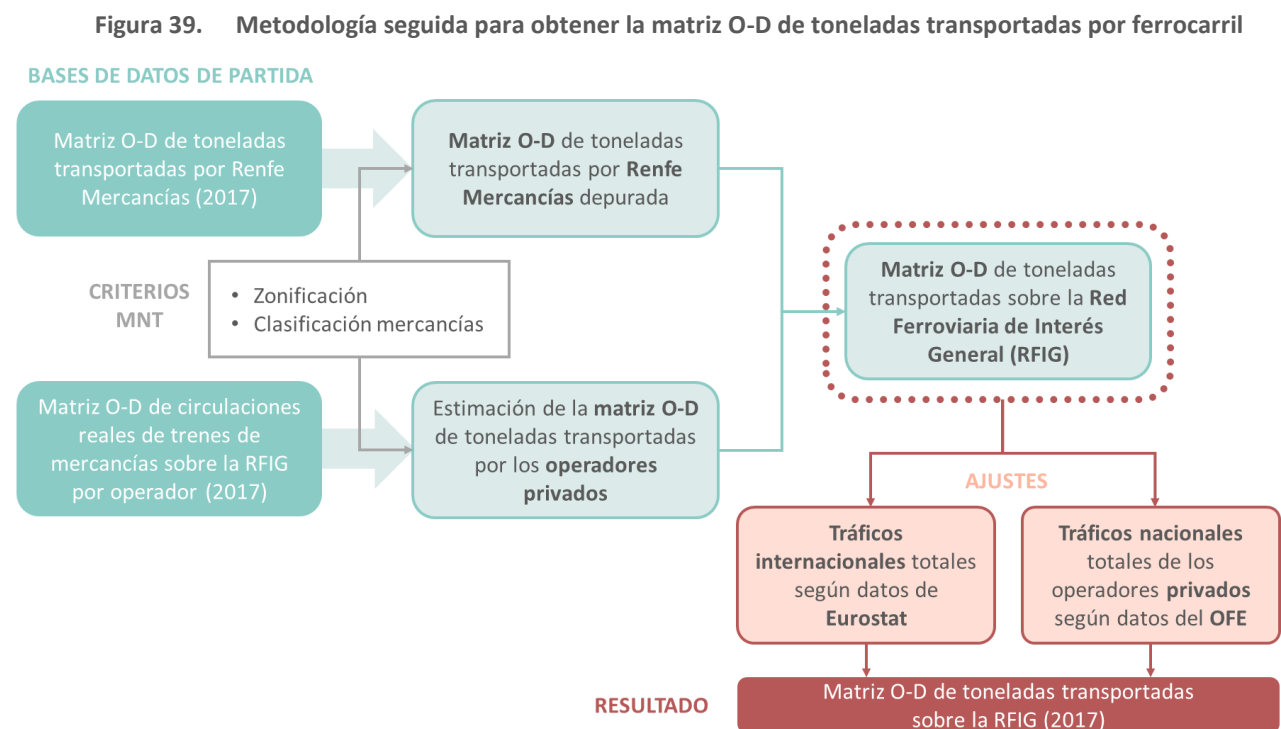
Según los datos publicados por el **Observatorio del Ferrocarril en España (OFE)**, en 2017 se transportaron un total de **28.305.950 toneladas por ferrocarril**, con el siguiente desglose por operador ferroviario:

- Renfe Mercancías: 19.633.230 toneladas, el 69,4%.
- Operadores Privados: CR (Continental Rail), ARS (Acciona Rail Service), TR (Tracción Rail), CRT (Comsa Rail Transport), LT (Logitren), Transfesa (TF), Low Cost (LC) y Transita (TA). En total movieron 8.033.610 toneladas, el 28,4%.
- FGC (Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya): 592.350 toneladas, el 2,1%.
- EK (Euskotren-Euskocargo): 46.750 toneladas, el 0,2 %.

Con las bases de datos disponibles, detalladas en el epígrafe anterior, se ha obtenido una matriz origen-destino de las toneladas transportadas sobre la RFIG (Renfe mercancías + Operadores Privados), lo que según los datos publicados por el OFE supone un total de 27.666.850 toneladas y

el 97,7% del total de toneladas transportadas por ferrocarril. El 2,3% restante correspondería a los ferrocarriles autonómicos.

La metodología seguida para obtener dicha matriz se resume en el siguiente esquema:



Fuente: Ineco

3.3.3 MATRIZ DE ETAPAS MODO MARÍTIMO

Los flujos de mercancías en cadenas con modo marítimo se han dividido, a efectos de la determinación de las matrices de demanda, en dos etapas:

- **Lado mar:** etapa desarrollada en modo marítimo con al menos un extremo del viaje (origen y/o destino) en algún puerto español.
- **Lado tierra:** etapa desarrollada en algún modo terrestre (carretera o ferrocarril) entre dos zonas españolas, de las cuales al menos una tiene un puerto.

Esta división dará lugar a flujos en tres matrices de etapas distintas:

- **Matriz de etapas en modo marítimo:** que se corresponde con el “Lado Mar”.
- **Matriz de etapas de carretera generadas por los puertos:** cuyos flujos ya están incluidos en la matriz de etapas de carretera pero que se determina mediante la definición de las zonas portuarias por interés para la modelización (distinguir el tráfico por carretera producido en los puertos de aquel producido en la provincia del puerto).
- **Matriz de etapas de ferrocarril generadas por los puertos:** ya incluida en la matriz de etapas de ferrocarril pero que se determina mediante la definición de las zonas portuarias por interés para el proceso de modelización.

Por otro lado, resulta de interés hacer una distinción entre el tráfico internacional import-export y el tráfico de cabotaje. En diversas ocasiones se diferencia entre ambos tráficos por haberse determinado a partir de fuentes y metodologías distintas.

Cabe señalar que los flujos en tránsito han sido eliminados del análisis por no considerarse de interés para el objetivo del Modelo Nacional de Transporte.

3.3.3.1 Fuentes

Para la determinación de los flujos marítimos se han empleado diferentes fuentes complementarias.

En primer lugar, se dispone de información proporcionada por Puertos del Estado, que recopila información de las diferentes Autoridades Portuarias. En muchas ocasiones, esta información se complementa con datos recogidos en las memorias anuales de las diferentes AAPP.

Por otro lado, la Agencia Tributaria ofrece información aduanera de gran interés para la especificación de los tráficos import – export desde / hacia los puertos españoles.

Complementariamente, se hace necesario estudiar puertos gestionados por otras entidades como Puertos de Andalucía o *Ports de la Generalitat*, ya que en algunos casos presentan flujos de importancia significativa. Un ejemplo claro de esta casuística es el puerto de Garrucha, con un importante tráfico de yesos.

3.3.3.2 Metodología para la determinación de los flujos internacionales

El proceso metodológico para la determinación de los flujos marítimos internacionales se centra en la revisión de la base de datos de comercio exterior (DUAs) con el objetivo de que consigan reflejar adecuadamente el punto de entrada o salida de las mercancías del territorio español.

Este complicado proceso permitirá emplear esta base de datos para la construcción de la matriz de flujos marítimos y aprovechar sus enormes ventajas:

- Dado que las mercancías vienen catalogadas de acuerdo al Sistema Armonizado de Designación y Codificación de Mercancías¹⁷ de la Organización Mundial de Aduanas, la equivalencia con el sistema definido para el Modelo Nacional de Mercancías es trivial.
- Ofrece importante información sobre los tráficos de acceso y dispersión a los puertos, permitiendo determinar el hinterland de las diferentes Autoridades Portuarias.
- Ofrece gran precisión en el origen y destino de las mercancías.

Los pasos seguidos han sido:

- Adecuación de las bases de datos a la zonificación del Modelo Nacional de Transporte
- Adecuación de las categorías de mercancías del Sistema Armonizado a la clasificación del MNT
- Proceso de convergencia entre las bases de datos de Puertos del Estado y Agencia Tributaria. El objetivo es lograr que la base de datos de la Agencia Tributaria refleje adecuadamente los puntos de salida y entrada de las mercancías a territorio español.

3.3.3.3 Metodología para la determinación de los flujos de cabotaje

Para la determinación de los flujos de cabotaje la fuente de datos más relevante en la información facilitada por Puertos del Estado.

Mientras con esta base de datos es posible determinar los orígenes y destinos de las mercancías de tráficos de cabotaje, existe una falta de información en lo relativo a la clasificación de las mercancías.

En este sentido, la no existencia de información detallada impide una equivalencia entre la fuente de datos original y la clasificación definida para el Modelo Nacional de Transporte. Por ello, se recurre a diferentes fuentes complementarias:

- Memorias anuales de las diferentes Autoridades Portuarias: de donde obtenemos información de las diferentes tipologías de mercancías en tráficos de cabotaje.
- Encuesta permanente de Transporte de Mercancías por Carretera: de donde obtenemos una distribución global por tipo de mercancías de acuerdo a la clasificación del MNT.

Empleando estas fuentes complementarias, se estima una distribución por tipo de mercancías para el tráfico de cabotaje.

3.3.4 MATRIZ DE ETAPAS MODO AÉREO

3.3.4.1 Fuentes

Para la determinación de las matrices de mercancías por modo aéreo se parte de las siguientes fuentes de información que permiten caracterizar los flujos origen-destino en modo aéreo en la zonificación establecida para el modelo, para cada una de las 15 tipologías de mercancías:

- **Estadísticas de AENA:** Aena publica información sobre los movimientos de mercancías en los aeropuertos españoles de su gestión. Así pues, se ha analizado información completa para el año 2017 de todos los movimientos de mercancías de los aeropuertos españoles.

¹⁷ <http://www.wcoomd.org>

- Documento único administrativo (DUA):** La estadística de Comercio Extracomunitario¹⁸ recoge información sobre las exportaciones e importaciones de mercancías hacia / desde un país tercero. Estas estadísticas muestran información aduanera de las mercancías exportadas e importadas en todo el territorio nacional, e incluyen -entre otras- la siguiente información útil para el tratamiento de las matrices de mercancías: tipo de operación aduana, modo de transporte, tipo de mercancía, país de origen, provincia de procedencia o destino y masa neta.
- Encuesta Permanente del Transporte por Carretera (EPTMC):** se ha utilizado como fuente auxiliar para completar huecos en la información sobre la relación porcentual entre diversos grupos de tipología de mercancía transportada a nivel nacional.

3.3.4.2 Metodología

Para la obtención de las matrices de mercancías se considera que la base de datos de Aena representa de manera consistente y fiable los movimientos entre aeropuertos españoles e internacionales y el cómputo total de mercancía transportada en el año 2017. Por lo tanto, se ha tomado esta información como base del análisis realizado para caracterizar el origen y destino de los flujos, así como la magnitud de carga transportada.

Sin embargo, la información de Aena no aporta información sobre la tipología de mercancía movida. Para establecer esta desagregación, se ha utilizado la proporción entre categorías de otras fuentes de datos.

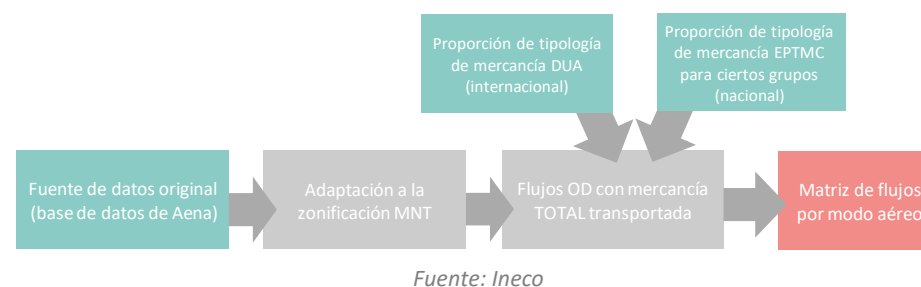
El **proceso** seguido ha sido el siguiente:

- Adaptación de la base de datos de Aena (con orígenes y destino en aeropuertos) a la zonificación definida para el Modelo Nacional de

Transporte en zonas de transporte: operaciones de traslación de todos los aeropuertos nacionales e internacionales a su zona correspondiente del modelo, y operaciones de agregación de la fuente original.

- Establecimiento de la tipología de mercancía: aplicación, sobre el total de mercancía transportada para cada par origen-destino, de la desagregación en las 15 tipologías de mercancías a partir de las DUAs en tráficos internacionales y la EPTMC en tráficos nacionales.

Figura 40. Proceso metodológico para la obtención de la matriz de flujos por modo aéreo



¹⁸ <https://www.agenciatributaria.es>

3.3.5 MATRIZ DE VIAJES

Una vez obtenidas las matrices de etapas por modo se ha construido la matriz de demanda origen-destino que representa cadenas de viaje, bien sean de una etapa (un solo modo) o bien compuestas por dos etapas (con intermodalidad entre los modos terrestres y marítimo).

Para el caso de los viajes compuestos por dos etapas se ha realizado un trabajo de conexión entre la matriz de etapas del modo marítimo y las matrices etapas de carretera y de ferrocarril. Esta tarea se ha abordado, por tanto, desde el análisis del modo marítimo en sus dos vertientes: nacional e internacional.

Una vez identificados los viajes multi-etapa desde la perspectiva del modo marítimo, se han comparado con las matrices de etapas de carretera y de ferrocarril previamente construidas para deducir los viajes unimodales terrestres. Adicionalmente, se incluyen los viajes unimodales aéreos y marítimos que no forman parte de cadenas y que se obtienen directamente de las respectivas matrices de etapas.

A continuación, se exponen los criterios considerados en este proceso.

- **Marítimo internacional (tráficos import-export)**

Los datos de comercio exterior de la Agencia Tributaria (DUAs) que se utilizaron en la construcción de la matriz de etapas del modo marítimo internacional contienen información acerca de la provincia de procedencia/destino. Esto permite vincular la relación OD que constituye la etapa del “lado mar” con la relación OD en el “lado tierra” asociada en ambos sentidos (import-export), definiendo así el origen y el destino del viaje completo.

Se dispone además de una estimación de los viajes Ro-Ro internacionales que se realizó inicialmente a partir de los datos del Observatorio del Transporte Marítimo de Corta Distancia y cuyo lado tierra fue incorporado a la matriz de carretera. En el “lado mar”, se efectúa la comparación de estas etapas con la

matriz marítima previamente obtenida a partir de las DUAs con el fin de filtrar solapes.

Por otra parte, de la comparación de las etapas “lado tierra” de los viajes completos con las matrices terrestres y atendiendo a las estadísticas portuarias generales, se deduce que hay una parte importante de flujos marítimos que no acceden a los puertos por carretera o ferrocarril (lo hacen por otros medios no presentes en el MNT, como la tubería), por lo que en la matriz de viajes son considerados como viajes de una sola etapa marítima.

- **Marítimo nacional (tráficos de cabotaje)**

Las estadísticas de tráfico portuario por puerto origen y puerto destino facilitadas por Puertos del Estado carecen de información relativa a la provincia de procedencia o destino de las mercancías en el hinterland portuario y su modo de acceso, por lo que la vinculación de las etapas “lado tierra” y “lado mar” no es directa. La construcción de los viajes multi-etapa en este caso se ha realizado de forma sintética considerando que el lado terrestre se produce por carretera y que:

- Los tráfico de cabotaje entre puertos peninsulares tienen su origen o destino en la propia provincia donde se encuentran los puertos, dado que en su mayoría serán mercancías producidas en un ámbito próximo (de no ser así, muy probablemente serían transportadas por el interior de la península en carretera o ferrocarril).
- Los tráfico de cabotaje entre puertos peninsulares y las islas/Ceuta/Melilla:
 - Una parte está identificada en la base de datos de la EPTMC, se asume que se trata de tráfico Ro-Ro a nivel nacional y se le asigna en cada caso una zona portuaria para la entrada/salida en la península.

- El resto, se distribuye por la península (provincias) de manera proporcional a la EPTMC.

En la matriz de ferrocarril (etapas) existen algunos tráficos que tienen origen y/destino en zonas portuarias. De ellos:

1. Una parte han sido identificados como etapas “lado tierra” de viajes marítimos import-export,
2. Otra parte es el “lado tierra” de viajes marítimos de cabotaje y,
3. Finalmente, la última parte son viajes unimodales correspondientes a tráficos ferroviarios vinculados a terminales ubicadas en ámbitos portuarios

Debido a la falta de detalle en las bases de datos disponibles que permita distinguir entre las dos últimas partes, se han considerado ambas como viajes unimodales de ferrocarril ligados a zonas portuarias.

Como resultado de este proceso de ensamblado de etapas por modo que pertenecen al mismo trayecto completo origen-destino, se obtiene la **matriz total de viajes**, la cual se compone de seis tipos de viajes:

- **Viajes de carretera.** Son aquellos viajes que se realizan de origen a destino de forma íntegra por carretera.
- **Viajes de carretera con etapa marítima.** Se corresponde con aquellos viajes cuya cadena multimodal se realiza en dos etapas, una etapa terrestre por carretera y otra marítima.
- **Viajes de ferrocarril.** Son aquellos viajes que se realizan de origen a destino de forma íntegra por ferrocarril.
- **Viajes de ferrocarril con etapa marítima.** Se corresponde con aquellos viajes cuya cadena multimodal se realiza en dos etapas, una etapa terrestre por ferrocarril y otra marítima.
- **Viajes marítimos.** Son aquellos viajes que se realizan de origen a destino de forma íntegra por mar.
- **Viajes de aéreo.** Se corresponde con aquellos viajes que se realizan de origen a destino de forma íntegra en modo aéreo.

3.3.6 RESUMEN DE LA DEMANDA EN EL AÑO BASE 2017

Tanto las matrices de etapas por modo como la de viajes (en ambos casos, para cada una de las 15 categorías de mercancías establecidas) se han estructurado internamente en **diez bloques** o *submatrices* atendiendo a las diferentes combinaciones posibles entre los tres grupos de zonas origen-destino como muestra la Figura 41:

1. Flujos con origen y destino en las zonas internas, que se producen íntegramente en territorio nacional.
2. Flujos con origen en las zonas internas y destino en zonas externas (exportación), por lo que tienen una parte nacional y otra internacional.
3. Flujos con origen en las zonas externas y destino en zonas internas, por lo que tienen una parte nacional y otra internacional (importación).
4. Flujos con origen y destino en las zonas externas (internacionales en tránsito). Se incluyen solamente aquellos que transcurren parcialmente por territorio español, esto es, los que tienen alguna de las cinco zonas de Portugal como destino.
5. Flujos con origen y destino en las zonas externas (internacionales en tránsito). Se incluyen solamente aquellos que transcurren parcialmente por territorio español, esto es, los que tienen alguna de las cinco zonas de Portugal como origen.
6. Flujos con origen en las zonas internas y destino en zonas portuarias. A nivel de etapas representan la etapa inicial terrestre de recorridos multimodales con etapa marítima, tanto de cabotaje (bloque 10) como internacionales (bloque 9). A nivel de viajes, se trata de flujos unimodales de ferrocarril ligados a zonas portuarias.
7. Flujos con origen en las zonas portuarias y destino en zonas internas. A nivel de etapas representan la última etapa terrestre de recorridos multimodales con etapa marítima, tanto de cabotaje (bloque 10) como internacionales (bloque 8). A nivel de viajes, se trata de flujos unimodales de ferrocarril ligados a zonas portuarias.
8. Flujos con origen en las zonas externas y destino en zonas portuarias. A nivel de etapas representan, en su mayor parte, la etapa inicial marítima de recorridos multimodales de carácter internacional (importación).
9. Flujos con origen en las zonas portuarias y destino en zonas externas. A nivel de etapas representan, en su mayor parte, la etapa final marítima de recorridos multimodales de carácter internacional (exportación).
10. Flujos con origen y destino en zonas portuarias. A nivel de etapas representan, en su mayor parte, tráficos marítimos de cabotaje. A nivel de viajes, se trata de flujos unimodales de ferrocarril ligados a zonas portuarias.

Esta estructuración de la demanda por bloques o *submatrices* permite realizar un tratamiento diferenciado de la metodología de aplicación en el desarrollo de los modelos de generación y distribución, como se expone más adelante.

Los siguientes esquemas muestran a modo de resumen los volúmenes en toneladas que representan cada bloque, así como su distribución por modos, tanto para la matriz de viajes (Figura 42) como para la matriz suma de las matrices de etapas (Figura 43) “observadas” en el año base (2017).

En el caso del esquema resumen de la matriz de viajes, en el modo marítimo se hace referencia a la suma de todos aquellos flujos que tienen alguna etapa marítima: viajes de carretera con etapa marítima, viajes de ferrocarril con etapa marítima y viajes marítimos.

Figura 41. Estructura por bloques de las matrices de mercancías en el año base (2017)

	ZONAS INTERNAS (ES01-ES59)	PORTUGAL	ZONAS EXTERNAS SIN PORTUGAL (EXT01-EXT16, FR01-FR05, MA01)	ZONAS PORTUARIAS (PU01-PU23)
ZONAS INTERNAS (ES01-ES59)	1 Nacional	2	Internacional <i>export</i>	6 Nacional
PORTUGAL	3		<i>tránsito</i> 5	8
ZONAS EXTERNAS SIN PORTUGAL (EXT01-EXT16, FR01-FR05, MA01)	Internacional <i>import</i>	4 <i>tránsito</i>	Internacional	Internacional <i>import</i>
ZONAS PORTUARIAS (PU01-PU23)	7 Nacional	9	Internacional <i>export</i>	10 Nacional

Fuente: Ineco

Figura 42. Resumen de la matriz total de viajes de mercancías “observada” en el año base (2017) por bloques. Unidad: toneladas/año

VIAJES (toneladas/año)	ZONAS INTERNAS (ES01-ES59)	PORTUGAL	ZONAS EXTERNAS SIN PORTUGAL (FR01-FR05, MA01, EXT01- EXT16)	ZONAS PORTUARIAS (PU01-PU23)		
ZONAS INTERNAS (ES01-ES59)	1 Nacional 1.165.241.170 Carretera: 95,50% Ferrocarril: 0,63% Marítimo: 3,87% Aéreo: 0,01%	2 Internacional Export 158.021.287 Carretera: 40,66% Ferrocarril: 1,37% Marítimo: 57,71% Aéreo: 0,25%		6 Nacional 5.043.734 Carretera: 0,00% Ferrocarril: 100,00% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,00%	1.328.306.192	
PORTUGAL	3 Internacional Import 179.045.230 Carretera: 27,34% Ferrocarril: 0,98% Marítimo: 71,46% Aéreo: 0,22%		5 Internacional Export 8.683.645 Carretera: 100% Ferrocarril: 0% Marítimo: 0% Aéreo: 0%	8 Internacional Import 71.777.430 Carretera: 0,00% Ferrocarril: 0,63% Marítimo: 99,37% Aéreo: 0,00%	268.327.943	1.627.799.466
ZONAS EXTERNAS SIN PORTUGAL (FR01-FR05, MA01, EXT01-EXT16)		4 Internacional Import 8.821.637 Carretera: 100% Ferrocarril: 0% Marítimo: 0% Aéreo: 0%				
ZONAS PORTUARIAS (PU01-PU23)	7 Nacional 8.901.845 Carretera: 0,00% Ferrocarril: 100,00% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,00%	9 Internacional Export 21.440.870 Carretera: 0,000% Ferrocarril: 2,339% Marítimo: 97,661% Aéreo: 0,000%		10 Nacional 822.616 Carretera: 0,00% Ferrocarril: 100,00% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,00%	31.165.331	
	1.353.188.245		196.967.440	77.643.781		
	1.627.799.466					

Fuente: Ineco

Figura 43. Resumen de la matriz total de etapas de mercancías “observada” en el año base (2017) por bloques. Unidad: toneladas/año

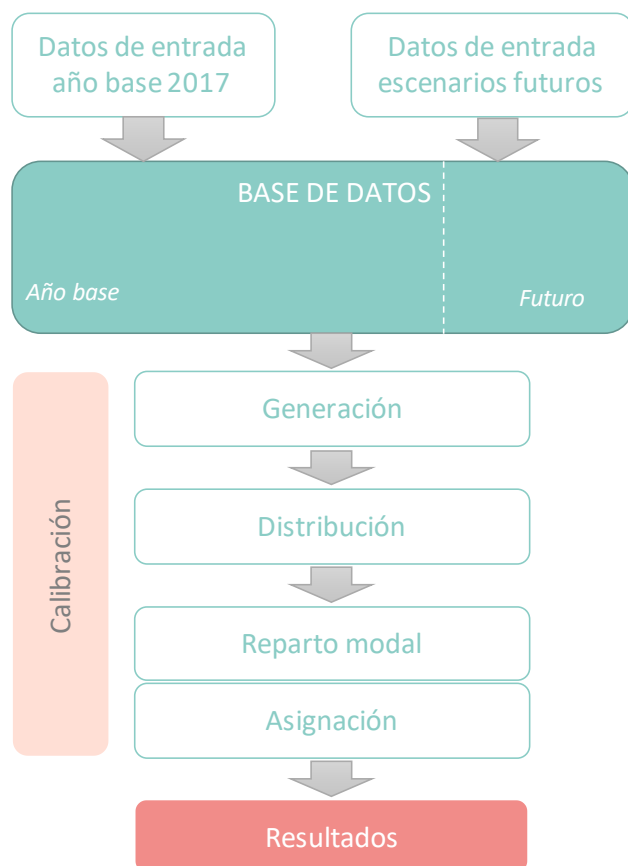
ETAPAS (toneladas/año)	ZONAS INTERNAS (ES01-ES59)	PORTUGAL	ZONAS EXTERNAS SIN PORTUGAL (FR01-FR05, MA01, EXT01-EXT16)	ZONAS PORTUARIAS (PU01-PU23)
ZONAS INTERNAS (ES01-ES59)	<p>1</p> <p>Nacional 1.120.132.022 Carretera: 99,34% Ferrocarril: 0,65% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,01%</p>	<p>2</p> <p>Internacional Export 66.823.187 Carretera: 96,16% Ferrocarril: 3,25% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,59%</p>		<p>6</p> <p>Nacional 139.531.539 Carretera: 96,25% Ferrocarril: 3,75% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,00%</p>
PORTUGAL	<p>3</p> <p>Internacional Import 51.098.828 Carretera: 95,81% Ferrocarril: 3,42% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,77%</p>		<p>Internacional Export 5 8.683.645 Carretera: 100% Ferrocarril: 0% Marítimo: 0% Aéreo: 0%</p>	<p>8</p> <p>Internacional Import 199.723.833 Carretera: 0,03% Ferrocarril: 0,23% Marítimo: 99,75% Aéreo: 0,00%</p>
ZONAS EXTERNAS SIN PORTUGAL (FR01-FR05, MA01, EXT01-EXT16)		<p>Internacional Import 8.821.637 Carretera: 100% Ferrocarril: 0% Marítimo: 0% Aéreo: 0%</p>		
ZONAS PORTUARIAS (PU01-PU23)	<p>7</p> <p>Nacional 138.607.562 Carretera: 93,58% Ferrocarril: 6,42% Marítimo: 0,00% Aéreo: 0,00%</p>	<p>9</p> <p>Internacional Export 112.638.971 Carretera: 0,004% Ferrocarril: 0,445% Marítimo: 99,551% Aéreo: 0,000%</p>		<p>10</p> <p>Nacional 45.991.893 Carretera: 0,00% Ferrocarril: 1,79% Marítimo: 98,21% Aéreo: 0,00%</p>

Fuente: Ineco

3.4 ESTRUCTURA DEL MODELO DE MERCANCÍAS

El modelo de mercancías, análogamente al de viajeros, se basa en el esquema clásico de “cuatro etapas” con las debidas adaptaciones al caso de uso de las mercancías de largo recorrido:

Figura 44. Esquema del modelo de “cuatro etapas” (mercancías)



Fuente: Ineco

- **Generación:** submodelo que determina la cantidad total de mercancía de cada una de las categorías que son producidas o atraídas por cada zona de transporte.
- **Distribución:** submodelo que determina los flujos de cada tipo de mercancía por origen y destino.
- **Reparto Modal:** submodelo que divide los diferentes flujos de cada tipo de mercancía entre los modos de transporte disponibles para cada relación origen-destino.
- **Asignación:** submodelo que determina la ruta que sigue cada vehículo encargado del transporte de mercancías a través de la red existente entre cada par origen-destino.

Las etapas de reparto modal y asignación se desarrollan de forma conjunta con el fin de poder representar las cadenas multimodales, así como las transferencias de mercancías en los principales nodos (puertos, aeropuertos y terminales intermodales terrestres).

En los siguientes epígrafes se resumen los principales ejes de la metodología que se sigue en cada una de las etapas de la modelización de mercancías.

3.5 MODELOS DE GENERACIÓN DE MERCANCÍAS

El objetivo fundamental de esta primera etapa del modelo es el desarrollo de una herramienta de estimación a futuro de **viajes totales generados** (producción y atracción) de mercancías por categorías, basado en variables explicativas de la movilidad (indicadores socioeconómicos) propias de cada zona de transporte.

Los modelos de generación determinan las toneladas generadas por cada zona, es decir, se calculan dos vectores diferentes (producciones en origen y atracciones en destino) para cada categoría de mercancía. El objetivo de la modelización es el de calibrar las formulaciones matemáticas que permiten

estimar estos vectores de generación, tomando como referencia las **matrices origen destino de viajes** por tipo de mercancía para el año base (2017).

En el caso concreto del transporte de mercancías, se tiende a emplear ecuaciones sencillas dependientes únicamente de una o dos variables descriptivas altamente relacionadas con el tipo de mercancía en consideración.

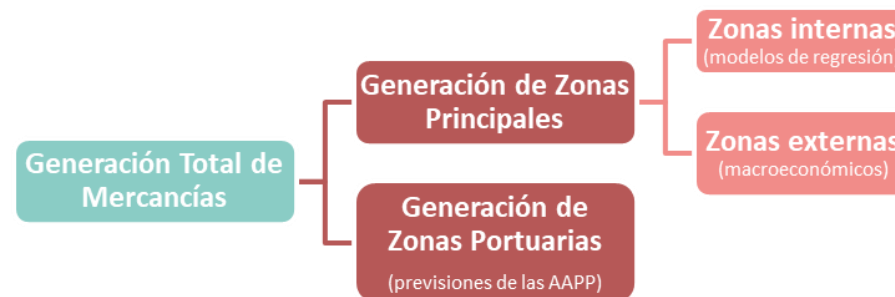
La metodología seguida es diferente en función del ámbito al que corresponde cada zona del MNT, según la disponibilidad de datos socioeconómicos para los niveles de desagregación geográfica planteados en cada caso.

Para las **zonas internas** del MNT (ámbito nacional), se han desarrollado un total de 30 *modelos de regresión*, realizando el ajuste de los parámetros de generación de flujos de mercancías en base a variables socioeconómicas diferentes según el tipo de mercancía y de su información para el año base (2017).

Así, la prognosis de las producciones y atracciones se realiza proyectando previamente las variables socioeconómicas seleccionadas a los años futuros y aplicando los correspondientes modelos de generación según el tipo de mercancía.

Finalmente se corrige el resultado trasladando la desviación existente en la calibración del modelo en año base a nivel de zona a los vectores de generación obtenidos (procedimiento conocido como “pivote”).

Figura 45. Submodelo de generación de mercancías



Fuente: Ineco

En las **zonas externas** del MNT (ámbito internacional), la generación de flujos de mercancías a futuro se realiza aplicando un modelo de crecimiento basado en las previsiones macroeconómicas disponibles en fuentes oficiales tales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE).

Para la generación futura en las **zonas portuarias** se aplica un modelo de crecimiento basado en las previsiones de tráfico marítimo realizadas por las autoridades portuarias a partir de los planes de empresa y que centraliza el ente público Puertos del Estado.

Según se expone en el siguiente capítulo, la metodología aplicada para los modelos de distribución difiere en cada uno de los diez bloques de la matriz de viajes (Figura 41). Esto es, según el bloque del que se trate se utiliza la proyección a futuro de la producción, de la atracción o de ambas.

3.5.1 ZONAS INTERNAS

Para la definición de los modelos de generación de las zonas internas se han utilizado modelos de regresión lineal, de forma particularizada para cada una de las 15 categorías de mercancía y diferenciando producciones de atracciones.

Un modelo de regresión lineal es una herramienta matemática que sirve para explicar la relación entre una variable dependiente “Y” (en este caso, las toneladas de la producción o atracción de mercancías para cada zona), las variables independientes “X_i” (en este caso, las variables socioeconómicas definidas anteriormente) y un término aleatorio ε. Este modelo puede ser expresado mediante la ecuación siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \dots + \beta_p * X_p + \varepsilon$$

donde β₀ es la intersección de la recta con el eje de ordenadas o término "constante", las β_i son los parámetros correspondientes a cada variable independiente, y “p” es el número de variables independientes que explican la variable dependiente “Y”.

El ajuste de modelos de regresión lineal se ha llevado a cabo con procesos iterativos comprobando la bondad de las ecuaciones resultantes y la fiabilidad real de las mismas. La fiabilidad de las ecuaciones obtenidas y la bondad del ajuste obtenido en cada caso se ha analizado con base en indicadores estadísticos como:

- Valor del coeficiente de correlación múltiple R² corregido.
- Contraste ANOVA. Estadísticos de correlación entre variables.
- Pruebas de significación individual de variables.
- Gráficos de dispersión

La determinación de las variables es la clave de los modelos de generación, por ello se ha realizado una búsqueda de las posibles variables más representativas teniendo en cuenta las categorías de mercancías en el año base (2017). Se ha valorado la existencia de datos históricos y previsiones a futuro para el nivel de desagregación correspondiente. A continuación, se definen las variables analizadas:

Población. Número de habitantes por provincia. Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE).

P.I.B. Producto Interior Bruto, valor monetario de todo los bienes y servicios producidos por una zona durante un año. Fuente: INE (Contabilidad Regional de España - Base 2010).

P.I.B. por ramas de actividad. Producto Interior Bruto clasificado ramas de actividad. Fuente: INE. Además del PIB total por provincia, se han considerado las siguientes categorías de PIB por sectores:

- Agricultura: Agricultura, ganadería, silvicultura y pesca.
- Industria: Industrias extractivas, suministro de energía eléctrica, gas, vapor y aire acondicionado, suministro de agua, actividades de saneamiento, gestión de residuos y descontaminación (excepto industria manufacturera).
- Industria manufacturera.

Empleo. Número de personas ocupadas en una actividad, trabajo, negocio, etc. Además del empleo total por provincia, se han considerado las siguientes categorías de empleo por sectores:

- Agricultura,
- Industria,
- Construcción,
- Servicios,
- Minería.

Fuentes: INE y Anuario de Estadística Minera de España (Ministerio de Industria Energía y Turismo).

Locales. Número de unidades locales activas clasificadas por actividad principal según la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE2009). Los usos principales considerados para las mercancías han sido:

- Industria general,
- Industria maderera,
- Industria del papel,
- Industria de la alimentación,
- Industria metalúrgica,

- Sector de la construcción,
- Extracción de metales,
- Químicos,
- Manufacturas,
- Coquerías y refino de petróleo,
- Fabricación de muebles,
- Fabricación de vehículos ¹⁹
- Fabricación de productos metálicos,
- Edición.

Fuente: INE (Directorio Central de Empresas).

Consumo de combustibles. Resultante de la suma de toneladas consumidas de gasolina 97, gasolina 95, gasolina 98, gasóleo A, gasóleo B, gasóleo C y fuelóleo BIA. Fuente: Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos (CORES).

Explotaciones mineras. número de actividades socioeconómicas que se llevan a cabo para obtener recursos de una mina. Fuente: Anuario de Estadística Minera de España.

Corta de coníferas y frondosas. Volumen de tala correspondiente a mezcla de coníferas y frondosas, sin que ninguna de ellas tenga presencia suficiente como para constituir una formación dominante. Los datos disponibles a nivel de provincia corresponden al año 2016, para la estimación de los datos en 2017 se ha aplicado el crecimiento por comunidad autónoma publicado en el Avance de Estadística Forestal 2017. Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Se han analizado las variables en tres etapas con el objetivo de seleccionar las que aportan mejores resultados. Además de los resultados analíticos, se han tenido en cuenta la naturaleza de cada tipología y la relación calidad/complejidad del modelo.

En las tablas siguientes (Tabla 32 y Tabla 33) se indican de forma cualitativa las variables socioeconómicas que finalmente han resultado empleadas en cada uno de los modelos seleccionados de producción o de atracción de zonas internas, por categoría de mercancía.

En tablas posteriores (Tabla 34 y Tabla 35) se recogen los coeficientes obtenidos para cada variable de todos los modelos de generación estimados, tanto para las producciones como para las atracciones.

¹⁹ Incluye: Fabricación de vehículos de motor, Fabricación de carrocerías para vehículos de motor; Fabricación de remolques semirremolques. Fabricación de componentes, piezas y accesorios para vehículos de motor.

Tabla 32. Variables seleccionadas en los modelos de producción de zonas internas

Categoría	Población	PIB		Empleo				Locales					Consumo Combustibles	Corta Coníferas y Frondosas				
		Total	Agricultura	Total	Industria	Construcción	Minería	Agricultura	Fab. vehículos	Fab. Product. Metal	Coquería y refinio	Indust. Química			Indust. Alimentación	Fabricación de muebles	Metalurgia	
M1																		
M2																		
M3																		
M4					X													
M5																		
M6						X												
M7							X											
M8																		X
M9					X													
M10																		
M11																		
M12					X													
M13					X													
M14																		
M15				X														

Fuente: Ineco

Tabla 33. Variables seleccionadas en los modelos de atracción de zonas internas

Categoría	Población	PIB			Empleo				Locales					Consumo Combustibles	Corta Coníferas y Frondosas			
		Total	Agricultura	Industria Manufacturera	Total	Industria	Construcción	Minería	Agricultura	Fab. vehículos	Fab. Product. Metal	Coquería y refinio	Indust. Química			Indust. Alimentación	Fabricación de muebles	Metalurgia
M1		X																
M2																		
M3																		
M4																		
M5																		
M6	X																	
M7																		
M8																		
M9																		
M10	X	X																
M11		X																
M12	X																	
M13	X																	
M14		X																
M15	X																	

Fuente: Ineco

Adicionalmente, en algunos modelos, se han añadido variables del tipo *Dummy* a las formulaciones para poder dar respuesta a las excepciones que determinadas zonas de transporte presentan en cuanto al patrón de generación encontrado en el conjunto de las zonas internas explicado por variables socioeconómicas. Estas variables “mudas” son esencialmente cualitativas, y tienen carácter binario, es decir, pueden tomar el valor 1 o 0.

Tabla 34. Modelos de producción. Zonas Internas

Modelo	Coficiente 1	Variable 1	Coficiente 2	Variable 2	Coficiente 3	Variable 3
M1	4,1760	Locales Fab. Veh.				
M2	15,9200	Locales Fab. Veh.				
M3	39,1577	Locales Metalurgia				
M4	7,5848	Empleo Industria	5105,6883	Dummy_Zonas Específicas		
M5	7,4919	Locales Indust. Química	7.110,3973	Dummy_Zonas Específicas		
M6	296,6455	Empleo Construcción	39.416,5914	Dummy_Zonas Específicas		
M7	1,0832	Empleo Minería				
M8	2,0121	Coníferas_fronosas (miles)	-4.846,8357	Dummy_Zonas Específicas		
M9	5,6860	Empleo Industria				
M10	8,4691	Empleo Agricultura	1,5734	Locales Ind. alimentación		
M11	0,4434	Locales Indust. Alimentación	362,9550	Dummy_Zonas Específicas		
M12	53,7609	Empleo Agricultura	7,9350	Empleo Industria	5.312,2663	Dummy_Zonas Específicas
M13	76,6812	Empleo Industria				
M14	4,9413	Locales Fab. Veh.				
M15	7,4689	Empleo Total				

Fuente: Ineco

Tabla 35. Modelos de atracción. Zonas Internas

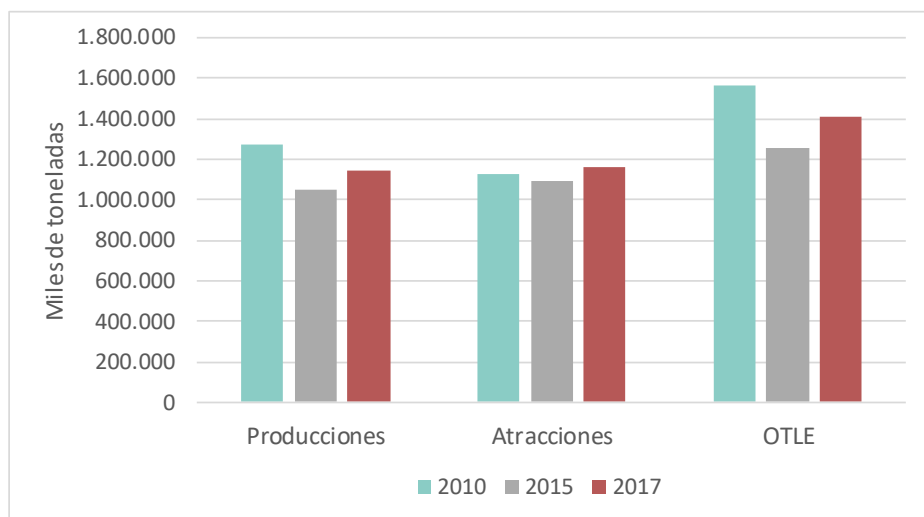
Modelo	Coficiente 1	Variable 1	Coficiente 2	Variable 2	Coficiente 3	Variable 3
M1	5,8052	PIB				
M2	15,5754	Locales Fab. Veh.				
M3	1,7330	Locales de fabricación de productos metálicos				
M4	1,7703	Consumo Combustible	12.583,4982	Dummy_Zonas Específicas		
M5	8,5662	Locales Indust. Química				
M6	7,3797	Población	38.645,6471	Dummy_Zonas Específicas		
M7	1,4447	Empleo Minería				
M8	1,7501	Coníferas_fronosas (miles)	0,5167	Locales Fab. Muebles	-5.571,4153	Dummy_Zonas Específicas
M9	91,2602	PIB Industria Manufacturera	1.766,3295	Dummy_Zonas Específicas		
M10	0,4961	Población	1.311,7808	PIB Agrícola		
M11	452,1558	PIB Agricultura				
M12	0,8113	Población	5.356,1415	Dummy_Zonas Específicas		
M13	4,4129	Población				
M14	6,9549	PIB				
M15	2,9063	Población				

Fuente: Ineco

A fin de poder comprobar la **validez** de los modelos de producción y atracción calibrados a 2017 (año base del modelo) se comparan las producciones y atracciones totales para los años 2010, 2015 y el propio 2017 calculadas mediante aplicación de las formulaciones obtenidas, con los datos aportados por el Observatorio del Transporte y la Logística en España (OTLE)²⁰.

El gráfico siguiente permite comparar las tres series históricas presentadas: la producción y la atracción estimadas por los modelos, y la información acerca del transporte total interior recogida en el OTLE. Se observan tendencias muy similares entre ellas.

Figura 46. Comparación entre la generación estimada por los modelos y la evolución del transporte (zonas internas)



Fuente: Ineco

Tras esta etapa de generación de viajes, los vectores de producción y de atracción estimados para zonas internas son *balanceados* para que el total de los viajes en atracciones sea igual al de las producciones. Esto se realiza asumiendo que el volumen de producciones tiene mayor confiabilidad en su estimación (etapa de generación) que el de atracciones. Por otra parte, los datos de la EPTMC que recoge el OTLE en sus estadísticas de transporte por carretera (modo mayoritario) se obtienen de encuestas a empresas en base a su flota y sus servicios (producción). Por todo ello se considera que tiene más sentido la comparación de estos datos frente a los vectores de producción solamente.

La tabla siguiente establece una comparativa en las tendencias por periodo entre la serie de producción estimada y la evolución del transporte según el OTLE. Se observa cómo los crecimientos en ambos casos para los tres periodos analizados son muy similares.

Tabla 36. Comparativa de tendencias entre producción de viajes estimada y evolución observada del transporte interior

Crecimiento anual acumulado	2010-2015	2015-2017	2010-2017
Producción estimada	-3,90%	5,56%	-1,29%
Transporte interior total (OTLE)	-4,25%	5,78%	-1,49%

Fuente: Ineco

A la vista de estos resultados, se concluye que los modelos seleccionados representan una estimación fiable de las mercancías generadas en las zonas internas.

²⁰ <https://observatoriodeltransporte.mitma.es/>

3.5.2 ZONAS EXTERNAS

Se ha llevado a cabo un análisis independiente para las zonas externas debido, en primer lugar, a la propia naturaleza del modelo. Se trata de un modelo nacional por lo que el análisis de zonas externas se realiza de forma más agregada y con menor detalle. Y en segundo lugar, a la dificultad de encontrar variables explicativas de la misma naturaleza que las seleccionadas para las zonas internas con la agregación de las zonas externas.

El PIB es una variable macroeconómica relacionada con la producción de bienes y servicios de un país, y en base a las previsiones a largo plazo del PIB en los países de la OECD se ha comprobado la relación entre esta variable y las mercancías, tanto producidas como atraídas por España con las zonas externas.

Si se analiza por separado, desde el punto de vista de las producciones se encuentra una relación dependiente en algunas zonas entre las fluctuaciones de las exportaciones y los crecimientos del PIB de los países que representan. En cambio, para atracciones esta variación de mercancías importadas se encuentra ligada al PIB español.

No obstante, y según se expone en el siguiente epígrafe (3.6 Modelos de distribución de mercancías), para la aplicación de los modelos de distribución sobre aquellos flujos de la matriz de demanda que tienen componente internacional, se prioriza la utilización de factores de crecimiento únicamente acotados por la evolución de las zonas internas o de las zonas portuarias donde se encuentra la componente nacional del par origen-destino.

De esta manera, únicamente en el caso de los flujos de mercancías en tránsito por el territorio español que tienen Portugal como país origen/destino en un extremo y otro país diferente de España en el otro extremo, se emplea como

variable explicativa el crecimiento del PIB correspondiente al país importador en cada caso.

3.5.3 ZONAS PORTUARIAS

Los modelos de generación para las zonas portuarias se basan en la información que facilita el ente público Puertos del Estado (PdE). Puertos del Estado elabora previsiones de los crecimientos del tráfico marítimo para cada una de las autoridades portuarias a partir de los planes de empresa, a tres años vista. El resto de los años se completa según la previsión del PIB de España, asumiendo que:

- La parte más importante de tráfico portuario es la que se dedica a la importación/exportación, además del tráfico de cabotaje y en régimen de tránsito internacional²¹. Del total de las mercancías que se importan o exportan en España, aproximadamente el 75% y el 61% respectivamente, lo hacen por vía marítima.
- Al tráfico import/export le afecta en mayor medida la coyuntura económica nacional, representando un indicador de salud económica del país, mientras que el tráfico en tránsito está condicionado por la economía mundial y la posición de los puertos en las rutas internacionales.

Para cada zona portuaria del Modelo se toman los crecimientos esperados en el volumen de toneladas transportadas totales (embarcadas y desembarcadas), correspondientes a la/s autoridad/es portuaria/s que lo componen.

²¹ La demanda del Modelo Nacional de Transportes no incluye los tráficos portuarios en tránsito.

3.6 MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍAS

Una vez se tienen los volúmenes de mercancías producidos/atraídos por cada zona de transporte y categoría (submodelo de generación), la etapa de distribución de mercancías es el proceso mediante el cual se determinan las zonas de origen de los flujos relacionados con un destino, y los destinos de los flujos generados en un origen.

El resultado de esta etapa de la modelización es el cálculo de las **matrices origen-destino de viajes totales** (sin distinción de modo) para cada tipo de mercancía, tomando como referencia las matrices del año base (2017). La metodología seguida se ha definido de forma particularizada para cada uno de los bloques de la matriz que se describen en el epígrafe 3.3.6 *Resumen de la demanda en el año base 2017*.

En todos los casos se aplican métodos de Factor de Crecimiento en alguna de sus tres variantes, según el flujo representado en cada bloque o submatriz, así como la información procedente de los modelos de generación que se seleccione como más representativa y fiable:

- Simplemente acotado a origen
- Simplemente acotado a destino
- Doblemente acotado

En el cuadro de la Figura 47 se presenta un resumen de los métodos que se aplican a cada uno de los diez bloques de la matriz, exponiéndose seguidamente cada uno de los tres métodos.

Esta metodología trata de mantener lo más inalteradas posible las relaciones de la matriz de viajes “observada” del año base (2017) de forma consistente con las informaciones disponibles sobre las tasas de crecimiento, obtenidas en la etapa de generación.

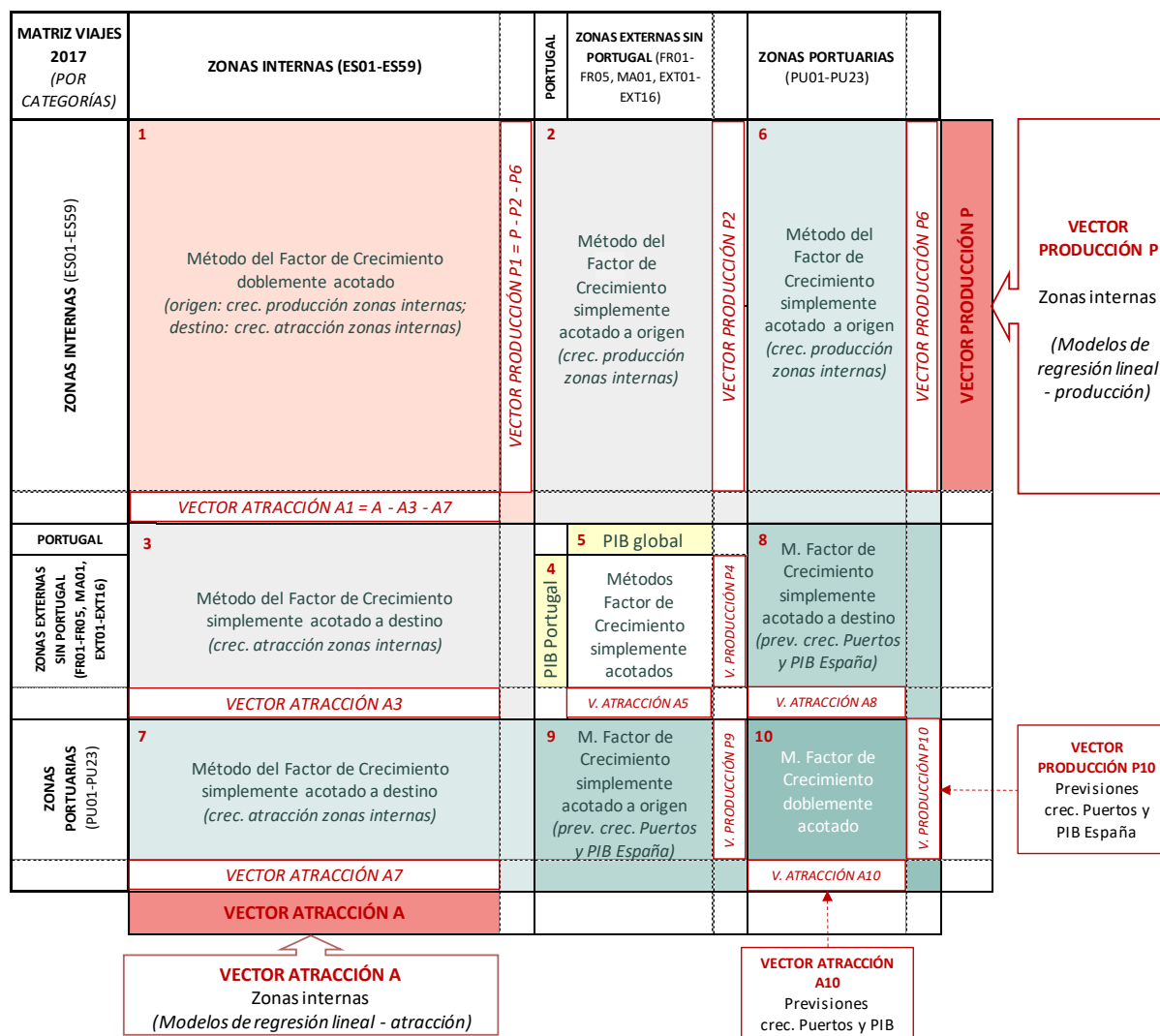
Esto supone adoptar como hipótesis que los factores de localización que influyen en el transporte de mercancías de larga distancia a escala nacional

son relativamente estables en el tiempo, por lo que el esquema de orígenes y destinos en el futuro se podrá considerar similar al actual.

Adicionalmente, y en todos los casos, se podrán establecer ajustes puntuales en caso de aparecer o desaparecer determinados polos generadores o atractores de mercancías en los escenarios futuros, o tratar casos especiales de forma particularizada al margen de la formulación general.

Para ello, se han agregado submatrices *máscara*, que permitirán anular flujos de mercancías existentes en las matrices *observadas* de partida, de manera que el cálculo tenga en cuenta a futuro estos cambios respecto de la situación de referencia (2017), o bien introducir valores de demanda a futuro conocidos que modifiquen lo estimado por el modelo.

Figura 47. Resumen metodológico de los modelos de distribución de mercancías por bloques de la matriz de viajes



Fuente: Ineco

3.6.1 FACTOR DE CRECIMIENTO SIMPLEMENTE ACOTADO A ORIGEN

Este método se emplea cuando la información disponible más relevante hace referencia a la **producción** esperada a futuro de las zonas en origen. Las toneladas a futuro del vector de producción en el bloque correspondiente son estimadas mediante un factor de crecimiento específico que se aplica sobre las correspondientes filas de cada *submatriz*:

$$T_{ij} = \rho_i t_{ij}$$

Donde,

- T_{ij} son las toneladas estimadas desde la zona i hasta la zona j
- ρ_i es el factor de crecimiento asociado a la zona i
- t_{ij} son las toneladas observadas desde la zona i hasta la zona j

Es el método propuesto para la formulación del submodelo de distribución de los bloques siguientes:

- **Bloque 2:** se aplican los crecimientos resultantes de los modelos de producción para cada una de las zonas internas en origen, estimados mediante ecuaciones de regresión lineal a partir de variables socioeconómicas simples.
- **Bloque 4:** se aplica el modelo de producción de zonas externas (importaciones desde Portugal), considerando la previsión de crecimiento del PIB de Portugal para todas las zonas en origen.
- **Bloque 6:** se aplican los crecimientos resultantes de los modelos de producción para cada una de las zonas internas en origen, estimados mediante ecuaciones de regresión lineal a partir de variables socioeconómicas simples.
- **Bloque 9:** se aplican los modelos de crecimiento resultantes de las previsiones de tráfico marítimo realizadas por las autoridades

portuarias (a tres años) y la previsión de crecimiento del PIB español para los restantes años.

3.6.2 FACTOR DE CRECIMIENTO SIMPLEMENTE ACOTADO A DESTINO

De forma contraria al anterior, este método se emplea cuando la información disponible más relevante hace referencia a la **atracción** esperada a futuro de las zonas en destino. Las toneladas a futuro del vector de atracción en el bloque correspondiente son estimadas mediante un factor de crecimiento específico que se aplica sobre las correspondientes columnas de cada *submatriz*:

$$T_{ij} = \rho_j t_{ij}$$

Donde,

- T_{ij} son las toneladas estimadas desde la zona i hasta la zona j
- ρ_j es el factor de crecimiento asociado a la zona j
- t_{ij} son las toneladas observadas desde la zona i hasta la zona j

Es el método propuesto para la formulación del submodelo de distribución de los bloques siguientes:

- **Bloque 3:** se aplican los crecimientos resultantes de los modelos de atracción para cada una de las zonas internas en destino, estimados mediante ecuaciones de regresión lineal a partir de variables socioeconómicas simples.
- **Bloque 5:** se aplica el modelo de atracción de zonas externas (exportaciones de Portugal), que considera la previsión de crecimiento global del PIB (obtenido por agregación de todas las demás zonas externas).
- **Bloque 7:** se aplican los crecimientos resultantes de los modelos de atracción para cada una de las zonas internas en destino, estimados

mediante ecuaciones de regresión lineal a partir de variables socioeconómicas simples.

- **Bloque 8:** se aplican los modelos de crecimiento resultantes de las previsiones de tráfico marítimo realizadas por las autoridades portuarias (a tres años) y la previsión de crecimiento del PIB español para los restantes años.

3.6.3 FACTOR DE CRECIMIENTO DOBLEMENTE ACOTADO

Este método se emplea cuando la información disponible hace referencia tanto a la **producción** esperada a futuro de las zonas en origen como a la **atracción** esperada de las zonas en destino. Las toneladas a futuro en los bloques correspondientes son estimadas mediante un factor de crecimiento específico que se aplica a cada celda de la *submatriz*:

$$T_{ij} = a_i b_j t_{ij}$$

Donde,

T_{ij} son las toneladas estimadas desde la zona i hasta la zona j

a_i es el factor de crecimiento asociado a la zona i (origen)

b_j es el factor de crecimiento asociado a la zona j (destino)

t_{ij} son las toneladas observadas desde la zona i hasta la zona j

El problema principal radica en estimar los factores de crecimiento a_i y b_j tomando como referencia la *submatriz* del año base (t_{ij}), el vector parcial PX_i (toneladas producidas en la zona i del bloque X) y el vector parcial AX_j (toneladas atraídas por la zona j del bloque X), de tal manera que se cumpla a la vez:

$$PX_i = \sum_{j=1}^n T_{i,j}$$

$$AX_j = \sum_{i=1}^n T_{i,j}$$

El cálculo se realiza mediante un proceso iterativo conocido como *Furness*, que consiste en ajustar secuencialmente las columnas y las filas de la *submatriz* hasta alcanzar el equilibrio.

Es necesario que estos vectores de toneladas generadas sean previamente *balanceados*, esto es, que el volumen total de mercancías atraídas sea igual al total de mercancías producidas. Se considera que el volumen de producciones tiene mayor confiabilidad en su estimación (etapa de generación) que el de atracciones.

Este es el método propuesto para la formulación del submodelo de distribución de los bloques siguientes:

- **Bloque 1:** los flujos que contiene este bloque son aquellos que tienen lugar entre las zonas internas. Los vectores parciales de producción y atracción se obtienen a partir de los vectores totales de producción (P_i) y atracción (A_j) calculados anteriormente en la etapa de generación mediante aplicación de los modelos para zonas internas (regresión lineal a partir de variables socioeconómicas simples) respectivamente, a los que se les sustrae los vectores parciales de los bloques que incluyen (véase Figura 47), previamente obtenidos. Así:

$$\text{Vector parcial de producción } P1_i = P_i - P2_i - P6_i$$

$$\text{Vector parcial de atracción } A1_j = A_j - A3_j - A7_j$$

- **Bloque 10:** los flujos contenidos en este bloque son los que tienen lugar entre zonas portuarias. Los vectores parciales de producción y atracción se calculan aplicando los modelos de crecimiento resultantes de las previsiones de tráfico marítimo realizadas por las autoridades portuarias.

- Para calcular el vector de producción $P10_i$ se toman los crecimientos resultantes de las previsiones de tráfico marítimo realizadas por las autoridades portuarias (a tres años) y la previsión de crecimiento del PIB español para los restantes años. para cada una de las zonas portuarias en origen.
- Para calcular el vector de atracción $A10_j$ se toman los crecimientos resultantes de las previsiones de tráfico marítimo realizadas por las autoridades portuarias (a tres años) y la previsión de crecimiento del PIB español para los restantes años. para cada una de las zonas portuarias en destino.

3.7 MODELOS DE REPARTO MODAL Y ASIGNACIÓN DE MERCANCÍAS

Los modelos de reparto modal y asignación de mercancías se desarrollan de forma conjunta. El objetivo de calibrar conjuntamente ambas etapas es la correcta representación de las cadenas multimodales y de las transferencias de mercancías en los principales nodos (puertos, aeropuertos y terminales intermodales terrestres). La asignación tiene en cuenta los factores que determinen la **elección y configuración de la cadena multimodal**: costes de transporte, tiempo, distancia, costes de transferencia, factores modales particulares, etc.

Los resultados de esta fase son, para cada categoría de mercancía, los siguientes:

- Matrices origen-destino de viajes por cadena multimodal de transporte (demanda en toneladas).

- Matrices origen destino de etapas por sistema de transporte (demanda en toneladas, tiempos y costes),
- Flujos resultantes de la asignación a cada arco de la red (toneladas),
- Tráficos resultantes de la asignación en cada arco de la red de carreteras (intensidad de vehículos) y ferrocarril (número de circulaciones).

3.7.1 PERIODO DE SIMULACIÓN

Con el fin de analizar la **estacionalidad** de los tráfico de mercancías en España, se toma como referencia la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (EPTMC). Las siguientes gráficas muestran:

- Las toneladas operadas medias por día de la semana.
- Las toneladas operadas media por día (laborable y no laborable) y por trimestre.

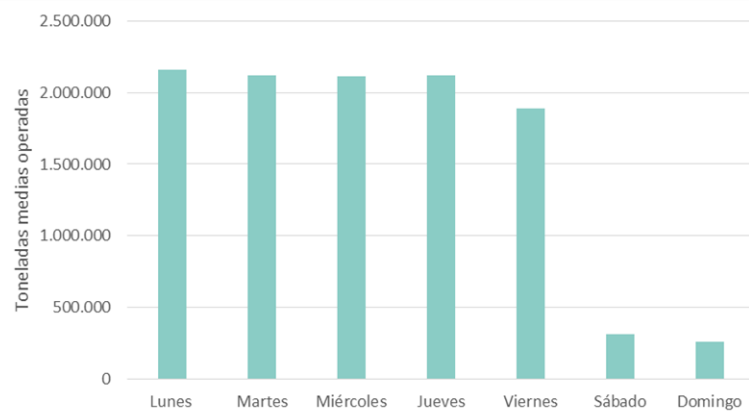
Se puede apreciar como el tráfico de mercancías se mantiene en unos valores similares entre lunes y viernes, disminuyendo notablemente el fin de semana.

Por otra parte, se tiene que los planes de transporte de los operadores ferroviarios tienen información con periodicidad semanal, dado que no todos los días ofrecen los mismos servicios a lo largo de la semana.

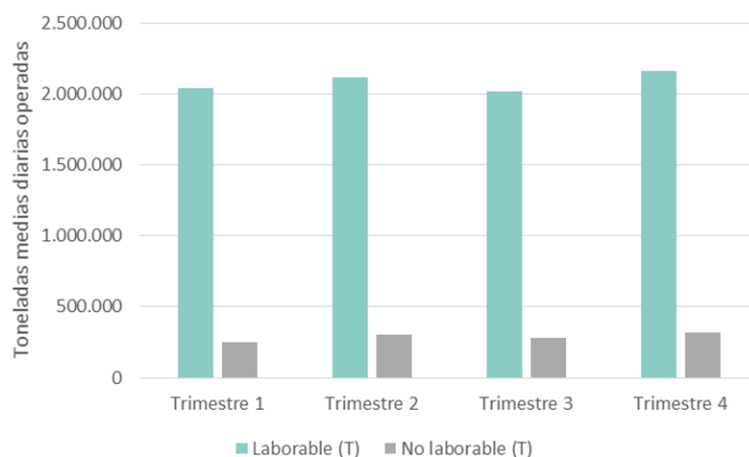
Si observamos la gráfica por trimestre (Figura 49), vemos que no aparecen diferencias significativas de tráfico a lo largo del año, ni para los días laborable ni para los no laborables.

Se puede afirmar por tanto que la estacionalidad anual del transporte de mercancías en España es muy baja, pudiendo considerar cualquier semana del año como representativa de los movimientos anuales.

Con todo ello, se establece que el periodo temporal para la modelización de las etapas de reparto modal y asignación es la **semana media** del año.

Figura 48. Toneladas medias operadas por día de la semana

Fuente: Ineco a partir de EPTMC

Figura 49. Toneladas medias operadas por día y por trimestre

Fuente: Ineco a partir de EPTMC

3.7.2 DEFINICIÓN DE LAS FUNCIONES DE UTILIDAD Y COSTE GENERALIZADO

Uno de los factores fundamentales en el ámbito de la modelización de transportes –y en especial, en la modelización de flujos de mercancías – es la adecuada representación de los costes de transporte, que determinará en gran medida la elección modal de los cargadores.

Según las conclusiones que se derivan del proceso de entrevistas con 22 de las principales empresas generadoras de flujos de mercancías en el corredor Mediterráneo (realizado en el contexto de un trabajo realizado por Ineco para Adif en 2019), se tiene que:

- El **precio** es la principal variable de elección modal, exigiéndose en ocasiones unas condiciones mínimas del resto de factores y contratando a menor precio.
- La **fiabilidad**, entendida como la probabilidad de que un servicio no sufra incidencias, es el siguiente elemento en importancia. Con ello se consigue que los centros productivos puedan funcionar a pleno rendimiento sin necesidad de disponer de grandes espacios para el almacenamiento de las materias primas y, además, planificar adecuadamente los envíos a cliente.
- La **seguridad** es el tercer factor en importancia, especialmente dentro del sector químico, que transporta gran cantidad de mercancías peligrosas.
- El **tiempo** de transporte es uno de los aspectos que menos se tiene en consideración a la hora de contratar los servicios, sólo por delante de la sostenibilidad. En casos concretos, como el transporte de productos perecederos, este factor puede cobrar especial relevancia.

Con el fin de garantizar el calibrado del modelo en esta fase conjunta, se presenta a continuación la relación entre las formulaciones matemáticas de utilidad, usada tradicionalmente en la etapa de reparto modal, y de coste

generalizado, usada tradicionalmente en la etapa de asignación, y la integración de las mismas.

La elección modal se suele asociar con el objetivo de maximizar la utilidad del transporte. La **utilidad** de un modo (m) entre un origen (i) y un destino (j) de una mercancía de la categoría (c) se calcula como:

$$U_{ij(c,m)} = \beta_{c(c)} * C_{ij(c,m)} + \beta_{t(c)} * t_{ij(c,m)} + \Delta_{(m)}$$

Donde:

$U_{ij(c,m)}$ representa la utilidad del transporte de la mercancía (c) en el modo (m) entre el origen (i) y el destino (j), y es una magnitud adimensional

$\beta_{c(c)}$ es el coeficiente de coste de la categoría (c) y se mide en [€^{-1}]

$C_{ij(c,m)}$ representa el coste monetario de la mercancía (c) en el modo (m) entre el origen (i) y el destino (j), y se mide euros [€]

$\beta_{t(c)}$ es el coeficiente de tiempo de la categoría (c) y se mide en [h^{-1}]

$t_{ij(c,m)}$ representa el tiempo de recorrido por la mercancía (c) en el modo (m) entre el origen (i) y el destino (j), en horas [h]

Δ es la constante modal del modo (m), que incluye todos los factores que intervienen en la elección del modo diferentes al tiempo y al coste monetario (fiabilidad, seguridad, puntualidad, etc.), y es una magnitud adimensional.

Por otra parte, el **coste generalizado** o *impedancia* es una extensión del concepto tradicional de coste mediante el cual convertimos a unidades monetarias otros factores que pueden intervenir en la utilidad de la elección de un determinado servicio de transporte. Un ejemplo claro es la conversión del tiempo de viaje en unidades de coste a través del parámetro conocido

como valor del tiempo. En el caso de las mercancías, este parámetro se conoce como *valor del tiempo de las mercancías* (con las siglas FVOT en inglés) y suele representar la pérdida de valor de una tonelada mercancía en una unidad de tiempo.

$$CG_{ij(c,m)} = C_{ij(c,m)} + VOT_{(c)} * t_{ij(c,m)}$$

Donde:

$CG_{ij(c,m)}$ es el coste generalizado (impedancia) del transporte de la mercancía (c) en el modo (m) entre el origen (i) y el destino (j)

$VOT_{(c)}$ es el valor del tiempo de una mercancía de categoría (c), medido en [$\text{€}/\text{h}$]

$C_{ij(c,m)}$ representa el coste monetario de la mercancía (c) en el modo (m) entre el origen (i) y el destino (j), en euros [€]

$t_{ij(c,m)}$ representa el tiempo de recorrido por la mercancía (c) en el modo (m) entre el origen (i) y el destino (j), en horas

Si relacionamos ambos conceptos a través del Valor del tiempo, definido como:

$$VOT_{(c)} = \frac{\beta_{t(c)}}{\beta_{c(c)}} \quad [\text{€}/\text{h}]$$

Se obtiene que:

$$U'_{ij(c,m)} = C_{ij(c,m)} + VOT_{(c)} * t_{ij(c,m)} + \Delta'_{(m)}$$

$$U'_{ij(c,m)} = CG_{ij(cm)} + \Delta'_{(m)}$$

Se concluye que, al asignar mediante la formulación de **utilidad** definida, se generan caminos en los que simultáneamente se realiza una elección de **modo** y **ruta**.

El **coste generalizado** (impedancia) del transporte entre un origen (i) y un destino (j) de una tonelada de la categoría (c) en un modo determinado (m) se calcula como:

$$CG_{ij(c,m)} = \sum_n C_{n(c,m)} + \sum_p C_{p(c,m)} * d_p$$

$$D_{ij} = \sum_p d_p$$

Donde:

$C_{n(c,m)}$: Costes monetarios no dependientes de la distancia de recorrido, asociados a un nodo (n) de la red. Son dependientes del modo (m) y del tipo de mercancía (c).

$C_{p(c,m)}$: Costes monetarios dependientes de la distancia asociados a la etapa (p) del viaje. También dependientes del modo (m) y del tipo de mercancía (c).

d_p : Distancia recorrida en la etapa p del viaje.

D_{ij} : Distancia entre i y j

Vemos que se hace una diferenciación clara entre los costes dependientes del desplazamiento (asociados a arcos de la red) de los costes independientes del desplazamiento (asociados a nodos de la red).

COSTE GENERALIZADO

Costes asociados a un nodo
no dependientes de la distancia

Costes asociados a una etapa
dependientes de la distancia

Costes
deterministas

Costes
dependientes
del tiempo

Costes
deterministas

Costes
dependientes
del tiempo

A continuación, se analiza cada componente por separado, especificando los conceptos incluidos en cada uno.

3.7.2.1 Costes no dependientes de la distancia C_n

Los costes que no dependen del desplazamiento están asociados a **nodos de la red**, como puntos de carga o descarga, puertos, aeropuertos o terminales intermodales. A su vez, pueden descomponerse en dos componentes: costes deterministas y costes dependientes del tiempo. La siguiente expresión representa los costes no dependientes de la distancia asociados a un nodo n de la red. Como vemos, muchos de los factores dependen de los modos de transporte utilizados (m) y del tipo de mercancía (c).

$$C_{n(c,m)} = \theta_{n(c,m)} + \tau_{n(c,m)}$$

$$\text{Siendo } \tau_{n(c,m)} = VOT_{(c)} \cdot t_{n(c,m)}$$

Donde:

$\theta_{n(c,m)}$: Costes deterministas asociados a actividades de carga, descarga y manipulación. Dependen del tipo de mercancía, de la actividad a desarrollar y a los medios disponibles para realizar la operación.

$\tau_{n(c,m)}$: Costes dependientes del tiempo, asociados al tiempo que la mercancía para en terminales intermodales.

$VOT_{(c)}$: Valor del tiempo de la mercancía, que se entiende como la pérdida de valor de una tonelada mercancía en una unidad de tiempo.

$t_{n(c,m)}$: Tiempo que la mercancía permanece detenida.

Los **costes deterministas** se refieren a costes monetarios relacionados con las actividades de carga, descarga o manipulación en terminales.

Dentro de las cadenas de transporte de mercancías, los costes asociados a las operaciones de carga en origen y descarga en destino, no representan un factor diferenciador entre cadenas modales para el transportista, al estar presentes en todas las alternativas. Además, no son susceptibles de ser objeto de políticas de planificación de transporte. Por otra parte, en ocasiones los cargadores tienen estos costes internalizados y no son cuantificables de forma independiente.

Sin embargo, en los casos en los que se produce un transbordo de la mercancía entre diferentes modos de transporte (por ejemplo, entre los modos marítimo y terrestre o entre los modos carretera y ferrocarril) siempre se incurre en unos costes adicionales que sí es necesario tener en cuenta a la hora de comparar los costes de diferentes alternativas de transporte.

En el modelo de costes construido para el MNT se han tenido en cuenta los costes de maniobras y operaciones en todas las terminales, así como los costes de trasbordo (operaciones sobre la carga) en los nodos de intercambio modal.

Estos costes son dependientes del tipo de mercancías a transportar (por ejemplo, si requieren cadena de frío) y del tipo o tipos de vehículos en los que se realice el transporte. Asimismo, los costes dependerán de la tecnología existente en la terminal intermodal en cuestión. Un ejemplo de estos costes podría ser: coste de transferir una tonelada de productos perecederos en contenedor desde un camión a un tren.

Es importante señalar que los costes deben presentarse por unidad de peso y diferenciando por tipo de vehículo y tipo de mercancías. En muchos casos podrán realizarse simplificaciones asignando los mismos costes a diferentes categorías. Se requiere una extensa recopilación de datos para caracterizar adecuadamente estos costes.

Por otro lado, se encuentran los **costes asociados al tiempo transcurrido** mientras la mercancía se encuentra en los nodos de la red. Estos costes van relacionados con la depreciación de ciertos productos en los cuales el tiempo de viaje supone un factor importante. Este término se calcula multiplicando el tiempo en terminales ($t_{n(c,m)}$) por un factor de valor del tiempo asociado únicamente con la mercancía ($VOT_{(c)}$).

3.7.2.2 Costes dependientes de la distancia C_p

El segundo grupo de costes son los asociados con la distancia de viaje. Estos costes se relacionan con los **arcos de la red** o infraestructura viaria. Del mismo modo, pueden descomponerse en dos términos independientes: **costes no dependientes del tiempo** y **costes dependientes del tiempo**. En el primer grupo se encuentran tanto los costes asociados a la operación del vehículo como los costes por uso de la infraestructura (peajes o cánones) y, por tanto, dependen directamente del tipo de vehículo empleado en la operación de transporte. En el segundo, consideramos la pérdida de valor de las mercancías durante la duración del trayecto y serán función tanto del tipo de mercancía como del modo empleado (velocidad).

De esta forma, el coste asociado a la distancia de viaje correspondiente a transportar una tonelada de mercancía un kilómetro sería, para la etapa (p) del viaje:

$$C_{p(c,m)} = \theta_{p(c,m)} + \tau_{p(c,m)}$$

$$\text{Siendo } \tau_{p(c,m)} = \frac{VOT_{(c)}}{v_{p(m)}}$$

$$C_{p(c,m)} = \theta_{p(c,m)} + \frac{VOT_{(c)}}{v_p(m)}$$

Donde:

$\theta_{p(c,m)}$: Costes asociados a la operación del vehículo y al uso de la infraestructura en la etapa (p) del viaje, para la categoría (c) y en el modo (m)

$\tau_{p(c,m)}$: Costes asociados al tiempo de viaje en recorrido de la etapa (p) del viaje, para la categoría (c) y en el modo (m)

$VOT_{(c)}$: Valor del tiempo de la mercancía, que se entiende como la pérdida de valor de una tonelada mercancía en una unidad de tiempo.

v_p : Velocidad del vehículo en la etapa (p) del viaje del modo (m)

Estos factores de **costes asociados a la operación** del vehículo ($\theta_{p(c,m)}$) toman en consideración los costes unitarios (€/T.km) derivados de la propia operación del vehículo (incluidos amortización, financiación y mantenimiento), y del uso de la infraestructura por parte de los mismos. Se consideran conjuntamente debido a que para algunos modos (ferrocarril) resulta más sencillo determinar estos costes incluyendo el canon por uso de la infraestructura dentro de los costes de operación.

Los costes asociados a la operación del vehículo serán determinantes en los modelos de reparto modal y asignación por lo que es necesario poner especial cuidado en su determinación y para ello, diferenciaremos la metodología en función del modo.

En los siguientes epígrafes se expone la metodología seguida para la determinación de estos parámetros que consituyen el **modelo de costes** que alimenta el modelo de reparto modal y asignación, para cada uno de los modos carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo, respectivamente. Para ello, se

especifican tanto los costes y los tiempos asociados al recorrido (en tramos) como a las escalas o paso por nodos de cada uno de los modos.

3.7.2.3 Valor del tiempo de las mercancías

Como ya se ha comentado anteriormente, se entiende por **valor del tiempo** la pérdida de valor de una tonelada de mercancía por unidad de tiempo. Ante la ausencia de información procedente de encuestas de preferencias declaradas (EPDs) realizada para este fin, y con el fin de disponer de unos valores de partida para cada tipo de mercancía (15), se ha realizado una estimación sintética que se expone a continuación.

Existe una gran disparidad metodológica y escasa evidencia empírica debido a la dificultad para obtener datos desagregados. La literatura existente está enfocada a su uso en análisis coste-beneficio, incluyendo en el VOT además de los costes derivados de la pérdida de valor de la mercancía durante el transporte, otros elementos como: costes de transporte, gestión o los derivados del mantenimiento de niveles óptimos de inventario. Presentan, además, gran variabilidad de resultados y, en muchas ocasiones, los autores no brindan información detallada sobre las características promedio de sus muestras.

Bajo estas premisas se ha definido una metodología propia que se ha estructurado en los siguientes pasos:

1. Obtención de un **valor medio (€/t) de la mercancía** para cada categoría, a partir de los datos de exportaciones de los DUA y considerando conjuntamente la mercancía que utiliza los modos carretera y ferrocarril. Se asume que el valor declarado de la mercancía es una cualidad intrínseca de cada tipo de mercancía y que no depende, por tanto, del modo de transporte terrestre utilizado.

2. Estimación de una **vida útil** de la mercancía y de un **valor residual**: se considera que la mercancía se deprecia a lo largo de toda su vida útil, quedando al final de la misma un valor remanente.
3. Obtención de un **valor medio (€/t) de la mercancía susceptible de ser depreciada** durante su vida útil: como diferencia del valor inicial de la mercancía y su valor residual.
4. Estimación de un **periodo óptimo**: a modo orientativo, para la puesta de cada mercancía a disposición del siguiente eslabón de la cadena logística, al objeto de tener un orden de magnitud del porcentaje máximo del valor de la mercancía susceptible de ser degradado durante las actividades de tránsito.

El criterio seguido para su establecimiento ha sido el siguiente: materias primas (12 meses), productos intermedios (6 meses), productos terminados (3 meses), productos agroalimentarios no perecederos (reducen a la mitad los valores anteriores), productos perecederos (5 días).

5. Cálculo del **porcentaje de depreciación** del valor de la mercancía dentro del periodo óptimo: en función de la proporción que representa dicho periodo óptimo respecto de la vida útil de la mercancía, mayorado por un coeficiente para tener en consideración el efecto de una depreciación más rápida al comienzo del ciclo (método de los números dígitos).
6. Cálculo del **valor del tiempo teórico** para cada grupo de mercancía (€/t*h): como cociente entre el valor de la mercancía (€/t) depreciable dentro del periodo óptimo y las horas contenidas en dicho periodo óptimo.
7. **Ajuste** del valor del tiempo: una vez calculado el valor del tiempo teórico para cada grupo de mercancías, se procede a ajustar dichos

valores sobre la base de otros estudios de mercancías a nivel europeo que contienen información basada en EPDs.

Para ello, se pondera cada grupo de mercancía por el cociente del promedio del valor del tiempo obtenido del análisis de estudios europeos y el promedio del valor del tiempo determinado de forma teórica. En este sentido, se ha tomado como referencia el estudio de De Jong, 2014, que establece que:

- El VOT para transporte por carretera se encuentra en torno a 38 €/vehículo*h y para transporte por ferrocarril en 1.100 €/vehículo*h.
- El VOT es la suma de la componente de coste de transporte (80% de media) y la componente de mercancía (20%).

Estos valores han sido actualizados al año base del presente estudio (2017) utilizando el IPC medio anual de Países Bajos y se han convertido a €/t*h considerando la carga media de transporte por ferrocarril y carretera en España: 6,16 t/camión (EPTMC) y 578 t/tren (BB.DD. Adif y Renfe Mercancías). Los resultados obtenidos para la componente de la mercancía han sido:

$$\text{VOT}_{\text{carretera}}: 1,37 \text{ €/t*h}$$

$$\text{VOT}_{\text{ferrocarril}}: 0,42 \text{ €/t*h}$$

Finalmente, se han ponderado dichos valores por los respectivos volúmenes de transporte por carretera y ferrocarril en España (2017) para obtener un valor promedio de 1,35 €/t*h, sobre el cual se realiza el ajuste del valor del tiempo inicialmente obtenido, multiplicando cada categoría de mercancía por el cociente de sus valores promedio: $1,35/0,57 = 2,36$.

El valor del tiempo de cada grupo de mercancía, sustentado por la metodología así propuesta, se incluirá en el modelo como valor de referencia

inicial, si bien es susceptible de ser revisado y ajustado en etapas posteriores de calibración. La siguiente tabla recoge los valores del tiempo estimados.

Tabla 37. Valor del tiempo de las mercancías estimado

Categoría de mercancía		Valor del tiempo (€/t.h)
M1	Automóviles	0,314
M2	Piezas de automóviles	0,435
M3	Productos de la industria siderúrgica: bobinas y perfiles de acero, chatarra, carriles, etc.	0,024
M4	Combustibles líquidos y gaseosos	0,052
M5	Productos de la industria química	0,396
M6	Materiales de construcción: cemento, calizas, cenizas, etc	0,127
M7	Minerales: carbón, sal, mineral de hierro, etc.	0,003
M8	Madera	0,041
M9	Pasta de papel, bobinas de papel, etc.	0,357
M10	Graneles sólidos agroalimentarios (cereales, abonos, etc)	0,112
M11	Graneles líquidos agroalimentarios (leche, aceites, etc)	1,100
M12	Productos alimentarios perecederos	16,748
M13	Otros productos manufacturados para gran consumo	0,432
M14	Máquinas, otros vehículos de transporte y vehículos industriales	0,288
M15	Resto	0,560
Promedio ponderado		1,354

Fuente: Ineco

3.7.3 MODO CARRETERA

La demanda de transporte de mercancías por carretera que recogen las matrices origen-destino del Modelo Nacional 3.3.5 representa en 2017 alrededor del 80% del total de los flujos considerados (etapas). Este porcentaje se eleva al 95% si solamente se consideran los flujos a nivel nacional (bloques 1, 6, 7 y 10). Se trata, por tanto, del modo mayoritario con amplia diferencia.

Además, la carretera constituye el modo auxiliar al transporte de las mercancías mediante el resto de los modos a través del acarreo. El acarreo se define como el servicio de transporte por carretera vinculado a la etapa inicial o final del viaje, conectando una terminal ferroviaria, marítima o aérea con el origen/destino final de la mercancía.

3.7.3.1 Tipos de vehículos y categorías de mercancías

Se establecen un total de 10 categorías de vehículos tipo para el transporte de mercancías por carretera, agrupadas en dos grandes bloques:

- **Vehículos de alta carga**, aquellos vehículos pesados con mayor capacidad de transporte (masa máxima autorizada), generalmente vinculados a flujos de transporte de mayor volumen y distancia, por lo que son los que podrían competir con el ferrocarril.
- **Vehículos de baja carga**, el resto de los vehículos para el transporte de mercancías por carretera a nivel interprovincial.

Dentro de cada uno de estos dos grupos se establecen 5 tipos de vehículo homólogos:

- **A: Camión portavehículos**
- **B: Vehículo pesado general**, que representa 6 tipos de vehículos pesados diferentes: vehículo articulado de carga general, cisterna de mercancías peligrosas (petroquímicos y gases), cisterna de productos de alimentación, cisterna de productos pulverulentos y volquete articulado de graneles.

- **C: Contenedores y cajas móviles**, subdivididos en 3 tipologías:
 - C1: Transporte de piezas de automóviles (vehículo articulado de carga general con piezas de automóviles).
 - C2: Transporte de contenedores (camión portacontenedores).
 - C3: Transporte de productos perecederos (vehículo frigorífico articulado).

Estos diez tipos de vehículo se agrupan en Visum mediante tres sistemas de transporte del modo carretera (C_01, C_02, C_03). En la siguiente tabla se recogen los diez tipos de vehículo definidos, su agrupación en sistemas de transporte y su participación porcentual en la demanda observada por

carretera para tráficos con origen y destino España (sin intraprovinciales), obtenido a partir del análisis de la Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera (2017). De las cifras se deduce que el conjunto de los vehículos de baja carga representa menos del 10% de forma general, siendo la tipología B (vehículo pesado general) la mayoritaria.

La información numérica recogida en la tabla es utilizada en el modelo de costes de carretera únicamente a la hora de aplicar una media ponderada por categoría de mercancías para el sistema de transporte C_03, al contener diferentes tipos de vehículos con diferente coste para una misma categoría de mercancía.

Tabla 38. Correspondencia entre categorías de mercancía y tipos de vehículo por carretera

Sistema de transporte VISUM	Tipo de vehículo / Categoría de mercancía		M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15
			Automóviles	Piezas de automóviles	Industria siderúrgica	Combustibles líquidos y gaseoso	Industria química	Construcción	Minerales	Madera	Papel	Graneles sólidos agroalimentarios	Graneles líquidos agroalimentarios	Productos alimentarios perecederos	Otros Productos manufacturados	Maquinaria	Resto
C_01	C_A00AC	Camión portavehículos (alta carga)	92,2%														
	C_B00AC	Vehículo pesado general (alta carga)		67,3%	87,7%	89,1%	88,7%	84,4%	95,7%	91,8%	91,2%	93,5%	89,9%		86,1%	79,5%	79,7%
C_02	C_C01AC	Camión portacontenedor de piezas de automóviles (alta carga)		27,6%													
	C_C02AC	Camión portacontenedor (alta carga)			3,5%	1,2%	5,8%	5,0%	0,9%	3,1%	3,8%	2,5%	6,3%		3,7%	10,7%	11,5%
	C_C03AC	Vehículo frigorífico articulado (alta carga)												91,5%			
C_03	C_A00BC	Camión portavehículos (baja carga)	7,8%														
	C_B00BC	Vehículo pesado general (baja carga)		2,8%	8,3%	9,6%	5,3%	10,4%	3,4%	4,8%	3,3%	4,0%	3,5%		10,0%	9,6%	7,9%
	C_C01BC	Camión portacontenedor de piezas de automóviles (baja carga)		2,2%													
	C_C02BC	Camión portacontenedor (baja carga)			0,4%	0,1%	0,2%	0,2%	0,0%	0,4%	1,7%	0,0%	0,3%		0,2%	0,2%	0,9%
	C_C03BC	Vehículo frigorífico articulado (baja carga)												8,5%			
Total			100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fuente: Ineco a partir de la EPTMC

3.7.3.2 Componentes de costes

En relación con los costes, se contemplan los siguientes conceptos:

- **Costes dependientes de la distancia:**
 - operación de transporte en carretera o costes asociados al recorrido: costes temporales, kilométricos y de peaje, que se introducen en el modelo a través de los arcos de la red.
 - acarreo: servicio de transporte por carretera auxiliar vinculado a la etapa inicial o final del viaje en modo ferroviario, marítimo o aéreo. Este coste está contabilizado en Visum a través de los conectores de zona a las respectivas redes y nodos.
- **Costes no dependientes de la distancia, asociados al paso por nodos:**
 - costes de transbordo o intercambio modal, que se introducen en el modelo a través de los conectores, y que se exponen en los capítulos correspondientes de cada modo.

3.7.3.2.1 Costes asociados al recorrido

Para determinar los **costes asociados al recorrido del transporte** de mercancías por carretera se ha partido del manual publicado por el “Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera” y de la aplicación informática de simulación de costes ACOTRAM, desarrollada por la Dirección General de Transporte Terrestre del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

ACOTRAM permite consultar los costes directos de los diferentes tipos de vehículos estudiados en el Observatorio, integrado por el Comité Nacional del Transporte por Carretera, las principales asociaciones representativas de empresas cargadoras (AECOC, AEUTRANSMER y TRANSPRIME) y la Dirección General de Transporte Terrestre.

Cabe mencionar que el Observatorio no ofrece la determinación directa del precio de un determinado transporte, puesto que dicha determinación sería el objetivo propio de una tarifa. Su finalidad es proporcionar elementos de juicio fiables a partir de los cuales las partes contratantes puedan acordar el precio que estimen más conveniente con la certeza de hacerlo sobre bases razonablemente contrastadas. Por ello, el Observatorio sirve como referencia para el análisis de costes presente.

En enero de 2018 se revisó profundamente el Observatorio actualizando las características técnicas y de explotación, así como las hipótesis de partida. Aunque los costes de los otros modos están referidos a 2017 y debido a la correspondiente actualización, los valores presentados en este documento para los costes de transporte de mercancías de carretera vienen referidos a enero 2018, considerando que los valores se acercarán más a la realidad y no incluirán una desviación significativa referida a la variación de fecha.

La metodología de cálculo utilizada viene detalladamente indicada en el Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera. Los costes anuales se calculan con los costes unitarios sin IVA, ya que se considera que el IVA resulta neutro. Los costes incluidos en el cálculo de costes directos de las mercancías transportadas por carretera se dividen en:

- **Costes temporales:** amortización, financiación, personal de conducción, seguros del vehículo, costes fiscales.
- **Costes kilométricos:** combustible, disolución de urea, neumáticos, mantenimiento, reparaciones, dietas del conductor.
- **Peajes:** son introducidos en el modelo como una característica de la red en el modelo de transporte, incorporando este coste cuando el vehículo transcurre por una carretera de peaje.

Por tanto, en territorio nacional, se excluyen los peajes de los costes directos incluidos en ACOTRAM, con el objetivo de evitar duplicidades. Los costes indirectos vienen cuantificados como el 6,5% de los costes directos.

El Observatorio de costes considera un kilometraje medio total y en carga realizado anualmente por tipo de vehículo. Los porcentajes de los recorridos en carga varían entre el 66% y el 85%.

Durante los trayectos en carga, los vehículos no siempre van cargados al máximo. Con el objeto de determinar de manera precisa las toneladas medias por tipo de vehículo en los trayectos en carga, se ha realizado un análisis a partir de la base de datos de la *“Encuesta Permanente de Transporte de Mercancías por Carretera 2017 (EPTMC)”*, calculando la carga media real por tipo de vehículo para las categorías A y B en cada caso.

En el resto de los casos (categorías vinculadas al transporte intermodal), para ser coherentes con las hipótesis y datos asumidos en el caso del transporte ferroviario, se ha considerado lo siguiente:

- **Camión para transporte de piezas de automóviles (C1):** carga neta media por camión/caja móvil de 17,5 toneladas (alta carga) o de 7,8 toneladas (baja carga).
- **Camión portacontenedores (C2):** carga neta media por camión de 17,8 toneladas, correspondientes a la carga neta media de 2 contenedores de 20 pies o 1 contenedor de 40 pies (según estadísticas publicadas por el INE para 2017) en el caso de vehículos de alta carga. En vehículos de baja carga, la carga neta media por camión es de 8,9 toneladas, correspondientes a 1 contenedor de 20 pies.
- **Camión articulado refrigerado para el transporte de productos perecederos (C3):** carga neta media por camión de 17 toneladas (alta carga) o de 7,6 toneladas (baja carga).

Los costes totales anuales se dividen por el kilometraje anual en carga y por la carga neta media transportada, todo ello dependiendo del tipo de vehículo, dando lugar a los costes kilométricos medios por tonelada.

Para la introducción de los **peajes** en el modelo, se han empleado las tarifas medias en euros por kilómetro al 31 de diciembre de 2017, publicados en el

“Informe 2017 sobre el sector de autopistas de peaje en España” publicado por la Delegación del Gobierno en las Sociedades Concesionarias de Autopistas Nacionales de Peaje.

Para poder emplear estos costes kilométricos en el modelo, se ha tenido en cuenta la longitud de los arcos de la red que componen cada autopista de peaje en la red introducida. A partir de esta longitud y la distancia que se ha considerado para el cálculo de los precios medios por parte de la Delegación del Gobierno en las Sociedades Concesionarias de Autopistas Nacionales de Peaje, se han obtenido unos coeficientes correctores de dichos costes kilométricos.

Existen dos tipos de tarifas para vehículos pesados en función del número de ejes. Para su aplicación en función del tipo de vehículo considerado en el modelo, se ha realizado un análisis de la base de datos de la EPTMC con el fin de comprobar este aspecto. La conclusión es que, de forma mayoritaria, los vehículos definidos en el modelo como de “alta carga” se corresponden con vehículos de cuatro ejes o más (tarifa Pesados 2) mientras que los de “baja carga” tienen tres ejes o menos (tarifa Pesados 1).

Por otra parte, para poder efectuar la repercusión por tonelada transportada incluyendo la consideración de los viajes en vacío, se aplican los correspondientes factores de conversión a vehículos.

3.7.3.2.2 Costes de acarreo

Dentro del transporte terrestre, se define como acarreo al servicio de transporte por carretera vinculado a la etapa inicial o final del viaje, conectando una terminal ferroviaria o aeroportuaria con el origen/destino final de la mercancía. Se asume que a las terminales portuarias se accede desde las zonas portuarias, por lo que no habría acarreo.

El coste de los acarreos no coincide exactamente con los costes de transporte por carretera descritos anteriormente, debido a que suelen ser recorridos más cortos que se cotizan de manera diferente.

- **Terminales ferroviarias nacionales**

Por simplificación, teniendo en cuenta la casuística más habitual en la realidad, en el modelo se considera que los trenes de las categorías A (Automóviles) y B (Vagón convencional) tienen como origen/destino final instalaciones privadas, mientras que los trenes intermodales (categorías C1, C2 y C3) pasan por terminales intermodales de Adif. Es decir, que en este último caso (categorías C2 y C3) se considera además un coste de acarreo adicional entre la terminal intermodal y el origen/destino de la mercancía, que en el modelo se añade a los costes de paso por terminales terrestres. Para establecer los costes medios de acarreo que se aplican en el modelo, se ha partido de los siguientes datos:

- **Para distancias ≤ 30 km**, el precio del acarreo se sitúa en torno a los 150€/camión²².
- **Para distancias ≥ 200 km**, se aplican las tarifas habituales del transporte de mercancías por carretera²³.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se ha ajustado una función logarítmica para obtener los precios correspondientes a distancias intermedias.

Para repercutir estos costes por tonelada transportada, se considera la carga neta media real del tipo de vehículo correspondiente en cada caso (C2 y C3 de alta carga, respectivamente).

- **Aeropuertos nacionales**

En este caso, se asume que las tipologías de vehículos que realizan el acarreo son los de baja carga, en concreto el mayoritario por cada categoría de mercancía según se indica en la Tabla 38. Los costes unitarios se obtienen tras repercutir por tonelada aplicando las respectivas cargas netas medias de cada tipo de vehículo.

²² Coste medio obtenido de diversos operadores. $150/30 = 5,00$ €/km.

En el caso del **transporte internacional por carretera**, se ha partido de los costes recogidos en el Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera en transporte internacional, que en este caso proporciona los costes de transporte únicamente para dos tipos de vehículos del grupo de alta carga: el vehículo articulado general (el considerado en la categoría C1) y el vehículo articulado frigorífico (categoría C3).

Cabe destacar que en el ámbito internacional sí se repercute el coste medio de peajes, ya que fuera del ámbito nacional la red de carreteras cargada en el modelo no se vincula a tarifas específicas de peajes.

3.7.3.3 Componentes de tiempos

Se contemplan las siguientes componentes de tiempo para la caracterización del transporte por carretera:

- **Tiempos asociados al recorrido:** en el transporte de mercancías por carretera, el tiempo de recorrido depende de las limitaciones de velocidad máxima de la infraestructura viaria para este tipo de tráfico, el perfil de la vía y el grado de densidad de la circulación por la misma. En el modelo, los tiempos medios de circulación por la red se han definido a partir de diferentes velocidades medias en función de la jerarquía de cada tramo a partir de la velocidad máxima general (turismos).
- **Tiempos de descanso:** según la legislación vigente, el ciclo de conducción durante una jornada laboral debe contemplar, al menos, 45 minutos de descanso. Considerando una jornada de conducción media de 8 horas diarias, y un descanso diario adicional de 45 minutos, el porcentaje de tiempo de descanso sobre la jornada de conducción

²³ Para establecer un precio medio, se ha aplicado un margen del 15% sobre el coste total. Partiendo de la categoría C2, la tarifa sería de $1,15 * ((7,25 * 17,8) / 100) = 1,48$ €/km.

es equivalente a un 9,4%. Dicho incremento se ha aplicado el modelo de transporte mediante el correspondiente factor de descanso.

- Tiempos de acarreo: se introducen en el modelo asociados a los correspondientes conectores considerando una velocidad media de 50 km/h cuando la distancia sea inferior a 50 km y 70 km/h en los demás casos. De esta manera se tienen en cuenta las pérdidas de tiempo en los accesos de las ciudades, o de forma general, en los primeros y últimos kilómetros del recorrido.

3.7.4 MODO FERROCARRIL

La demanda de transporte de mercancías por ferrocarril que recogen las matrices origen-destino del Modelo Nacional representa en 2017 alrededor del 1,4% del total de los flujos considerados (etapas). Este porcentaje se eleva ligeramente por encima del 1,5% si solamente se consideran los flujos a nivel nacional (bloques 1, 6, 7 y 10).

Se trata, por tanto, de un modo minoritario en comparación con la carretera, ocupando el tercer lugar tras el modo marítimo.

3.7.4.1 Tipos de vehículos y tipo de mercancías

Atendiendo a las diferencias de costes observadas en cada caso, que dependen fundamentalmente de la naturaleza de la carga y de la tipología de vagón, se han establecido 5 categorías de trenes tipo:

- **A: Automóviles.**
- **B: Vagón convencional** (incluyendo tolvas, cisternas, portabobinas, vagones de paredes deslizantes, etc.).
- **C: Contenedores y cajas móviles**, subdivididos en 3 categorías:
 - C1: Piezas de automóviles.
 - C2: Contenedores (secos y cisternas).
 - C3: Contenedores refrigerados (reefer).

Los trenes tipo se establecen para:

- Cada **tipo de mercancía** (15).
- Cada **itinerario** (combinación de rampa máxima característica y longitud máxima de tren).
- Cada **escenario de infraestructura** (variaciones de rampa máxima característica o longitud máxima de tren).

Estos cinco tipos de vehículo se agrupan en Visum mediante dos sistemas de transporte del modo ferrocarril (F_01, F_02).

En la siguiente tabla se recogen los cinco tipos de vehículo definidos, su agrupación en sistemas de transporte y su participación porcentual en la demanda observada, obtenida a partir del análisis de la matriz construida de toneladas transportadas por ferrocarril en 2017 para el MNT.

Tabla 39. Correspondencia entre el tipo de mercancía y el tipo de tren (2017)

Sistema de transporte VISUM	Tipo de tren / Categoría de mercancía		M01	M02	M03	M04	M05	M06	M07	M08	M09	M10	M11	M12	M13	M14	M15
			Automóviles	Piezas de automóviles	Industria siderúrgica	Combustibles líquidos y gaseoso	Industria química	Construcción	Minerales	Madera	Papel	Graneles sólidos agroalimentarios	Graneles líquidos agroalimentarios	Productos alimentarios perecederos	Otros Productos manufacturados	Maquinaria	Resto
F_01	F_A0	Automóviles	100%														
	F_B0	Vagón convencional			96%	100%	34%	100%	100%	100%	27%	100%	100%			100%	1%
F_02	F_C1	Intermodal (piezas autos)		100%													
	F_C2	Intermodal (secos y cisternas)			4%		66%				73%				100%		99%
	F_C3	Intermodal (reefer)												100%			
Total			100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fuente: Ineco

3.7.4.2 Componentes de costes

En relación con los costes, se contemplan los siguientes conceptos:

- **Costes dependientes de la distancia:**
 - Costes asociados al transporte ferroviario, que incluyen costes asociados tanto al material rodante como a la operación, como al uso de la infraestructura, y que se introducen en el modelo a través de los arcos de la red.
 - Costes de acarreo, que permiten el acceso por carretera a las terminales ferroviarias, y están contabilizados en los conectores de zona a los nodos de la red de ferrocarril. Han sido expuestos anteriormente en el apartado 3.7.3.2.2.
- **Costes no dependientes de la distancia, asociados al paso por nodos:**

- Costes de paso por frontera, recogen los costes asociados al paso por las fronteras francesa y portuguesa.
- Costes de paso por las terminales ferroviarias, bien al inicio o fin del itinerario (reflejados en los conectores de zona) o bien en el transbordo o intercambio modal con el modo marítimo (reflejados en los conectores de zonas portuarias).

Para la elaboración del modelo de costes ferroviarios, se ha tomado como referencia el manual publicado por el Observatorio del ferrocarril en España ("*Costes del transporte de mercancías por ferrocarril. Aproximación para su estudio sistemático (Informe 2010)*"), actualizando las componentes de costes a 2017.

3.7.4.2.1 Costes asociados al recorrido

Los **costes asociados al transporte ferroviario** (circulación) dependen tanto de las características de los trenes como de las de la infraestructura y del

itinerario realizado. El establecimiento del coste por vehículo se ha realizado en función de diferentes aspectos relacionados con:

- el material rodante: las toneladas brutas máximas remolcables, TBR (según los “Cuadros de Cargas Máximas de Adif”), el tipo de locomotoras y vagones más representativos.
- la infraestructura, a nivel de tramos de la red que componen cada posible itinerario: longitud máxima de tren, electrificación y rampas máximas características.

Se han considerado los siguientes costes (fijos y variables):

- **Costes vinculados al material rodante:** amortización, financiación, mantenimiento, seguros, impuestos, etc.
- **Costes de operación:** Energía y personal de conducción.
- **Costes vinculados al uso de la infraestructura:** cánones de infraestructura, coste de pasos por terminales, fronteras, cambiadores, etc.

Además de los costes directos, los costes totales incluyen costes indirectos como son los de administración, gestión y de labor comercial. Se ha estimado que el impacto de estos costes es el doble en el caso del ferrocarril que en el caso de la carretera: un 13% de los costes directos.

Para el cálculo de los **costes vinculados al material rodante** se han utilizado los precios de adquisición de acuerdo a tasaciones de Renfe Mercancías y las producciones medias anuales de los operadores ferroviarios, publicadas en el informe de la CNMC (Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia – “Informe de supervisión del transporte ferroviario de mercancías”) de 2017. Asimismo, se han asumido diferentes hipótesis para su estimación (vida útil, valor residual, etc.)

Para pasar de costes anuales a costes anuales por kilómetro se han tenido en cuenta las producciones medias de vagones consideradas en las hipótesis del OFE (Observatorio del Ferrocarril en España).

Respecto a los **costes de operación**, los costes de energía se han determinado a partir de lo establecido en la Declaración de la Red de Adif de 2017 y de las producciones medias anuales de los maquinistas de los operadores, publicadas en el informe de la CNMC de 2017. Los costes del personal de conducción se han determinado a partir de los datos recogidos en el convenio de trabajadores de Renfe de 2017. Se estima un coste de 2,50 €/km para este coste.

Dentro de los **costes vinculados al uso de la infraestructura** para la circulación de trenes de mercancías, se han tenido en cuenta diferentes modalidades (canon por adjudicación de capacidad, por utilización de líneas ferroviarias y por utilización de instalaciones de transformación y distribución de energía eléctrica de tracción). Respecto a los costes vinculados a la infraestructura en nodos, se ha realizado el cálculo del coste de paso por la frontera francesa en sus diferentes pasos.

Con el fin de disponer de magnitudes de costes medios totales por tonelada transportada, se ha asumido un porcentaje de carga neta media en el retorno por tipo de tren.:

Tabla 40. Porcentaje de carga neta media en el retorno por tipo de tren

Tipo de tren	Porcentaje de carga neta media en el retorno
A_Automóviles	10%
B_Vagón convencional	15%
C1_Intermodal (piezas autos)	20%
C2_Intermodal (secos y cisternas)	65%
C3_Intermodal (reefer)	45%

Fuente: Ineco a partir de la matriz construida de toneladas transportadas por ferrocarril en 2017

Para ello, se ha partido de la matriz construida de toneladas transportadas por ferrocarril en 2017 y se ha analizado la compensación de flujos por tipo de tren.

De este modo, repercutiendo los costes anteriores según la carga media, se ha obtenido el coste medio del transporte ferroviario por tonelada y kilómetro en función del tipo de tren, tracción y rampa máxima característica para una longitud máxima de tren.

3.7.4.2.2 Costes de paso

En relación con los costes vinculados al uso de infraestructura en nodos se analizan los siguientes conceptos fundamentales:

- **Costes de paso por frontera:** se tienen en cuenta los costes de paso por la Línea Figueras-Perpiñán (peaje y cambio de locomotora en Le Soler), por Portbou-Cerbère e Irún-Hendaya (dos opciones: transbordo de la carga o cambio de ejes). También se considera el coste de inmovilización del material rodante por parada en frontera.
- **Costes de paso por terminal terrestre:**
 - Terminales origen/destino: costes de maniobras y operaciones ferroviarias.
 - Terminales de transbordo: costes de maniobras y operaciones ferroviarias + costes de transbordo (operaciones sobre la carga).

En ambos casos las instalaciones pueden ser titularidad de Adif o de titularidad privada. Los costes asociados varían en función del tipo de terminal, del tipo de maniobras y operaciones, y de las características y tipo de tren, pudiendo existir mucha disparidad dependiendo del caso.

Por simplificación, teniendo en cuenta la casuística más habitual en la realidad, en el modelo se considera que los trenes de las categorías A (Automóviles) y B (Vagón convencional) tienen como origen/destino final instalaciones privadas, y que los trenes intermodales (categorías C1, C2 y C3) pasan por terminales intermodales de Adif.

Del mismo modo, partiendo de los trenes tipo y de los componentes de costes asociados al paso por nodos, se han obtenidos los costes por tonelada

asociados al paso por zonas fronterizas, terminales terrestres y de apoyo de instalaciones portuarias.

En relación a los **costes fuera del territorio nacional**, se ha procedido a estimar unos costes medios por tipo de vehículo, partiendo de los costes medios españoles para cada tipo de tren, tomado como referencia los costes de tracción eléctrica y rampas de entre 15 y 20 milésimas.

Posteriormente se ha ajustado teniendo en cuenta que los costes vinculados al material rodante son similares en todos los países, el coste del personal y de la energía se ajusta mediante datos de Eurostat en 2017 y los cánones de infraestructura se ajustan, para cada país, a partir de coeficientes extraídos de las conclusiones del informe *“Charges for the use of rail infrastructure”*, publicado por OECD/ITF21 en 2008.

3.7.4.3 Componentes de tiempo

Se consideran en el desarrollo del modelo los siguientes tiempos:

- **Tiempos dependientes de la distancia de recorrido** durante la circulación por la red de la mercancía. Para su estimación se han calculado las velocidades medias comerciales que alcanzan los trenes de mercancías en los distintos tramos de la RFIG. Para ello, se ha analizado:
 - *“Plan de Transporte de Renfe Mercancías (2017)”*: Este archivo recoge las horas de salida y llegada de todos los servicios operados por Renfe Mercancías, establecidas a partir de los surcos asignados por Adif.
 - *Libros Horarios de Adif de circulaciones de Renfe Mercancías (2016)*: Además de las horas de salida y llegada de todos los servicios operados por Renfe Mercancías, estos libros registran las horas de paso programadas por los diferentes puntos intermedios que componen el itinerario de cada servicio.

En el caso de no disponer de información suficiente para determinar la velocidad media comercial de un subtramo concreto con estos datos, se ha aplicado la velocidad media comercial de los trenes de mercancías observada en toda la red, tomando los datos publicados por la CNMC en el informe del año 2017.

Estas velocidades se han reducido en los núcleos de Madrid y Barcelona con un análisis para tramos urbanos. Para las zonas externas se ha considerado asimilar a España los datos de Portugal y se ha realizado un análisis de las velocidades en corredores internacionales para el resto de Europa.

- **Tiempos de escala, o vinculados al paso por nodos**, se corresponden por los tiempos adicionales de espera que requieren las diferentes maniobras.
 - **Tiempos asociados al paso por frontera**, se ha estudiado la necesidad de transbordo de la carga en frontera o de un cambio de ejes del material móvil, dado que aún no se dispone a nivel comercial de un eje de ancho variable para mercancías (OGI), lo que repercute en un incremento significativo de los tiempos de transporte.
 - **Tiempos asociados al paso por terminal** de origen/destino que comprenden el necesario para la realización de maniobras y operaciones ferroviarias como pruebas de frenos, reposiciones de locomotoras o cortes de terminales.

3.7.5 MODO MARÍTIMO

La demanda de transporte marítimo de mercancías que recogen las matrices origen-destino del Modelo Nacional representa en 2017 casi el 19% del total de los flujos considerados (etapas). Este porcentaje se reduce al 3,1% si solamente se consideran los flujos a nivel nacional (bloques 1, 6, 7 y 10). Se

trata, por tanto, de un modo minoritario en comparación con la carretera, sin embargo, ocupa el segundo lugar.

Según el ámbito, el tráfico de mercancía internacional representa el 85% de las toneladas transportadas en el modo marítimo, frente al cabotaje, que representa un 15% de esta movilidad.

Con respecto al **cabotaje**, y desagregando por relaciones origen-destino, los mayores flujos se observan en movimientos internos de la Península (35%), entre la Península y Baleares (22%) y entre la Península y Canarias (28%). El resto corresponden a movimientos entre las Islas Canarias (11%), entre la Península y Ceuta (1%), entre la Península y Melilla (2%) o entre las Islas Baleares (1%).

3.7.5.1 Formas de presentación y categorías de mercancías

Tanto las Autoridades Portuarias como Puertos del Estado en su Anuario estadístico clasifican las mercancías que se manipulan por las infraestructuras portuarias que gestionan de acuerdo con las siguientes **formas de presentación**:

- **Graneles líquidos**. Las Autoridades Portuarias suelen distinguir entre distintos tipos, como son: productos petrolíferos, gas natural licuado, etc.
- **Graneles sólidos**. Al igual que para los graneles líquidos, también suelen distinguirse algunos tipos (minerales, agroalimentarios, etc.)
- **Mercancía general**. Habitualmente se distingue entre:
 - Mercancía general contenerizada.
 - Mercancía general no contenerizada.
 - Mercancía rodada (ro-ro). En este caso, en ocasiones las Autoridades Portuarias distinguen este tipo de mercancía. Esta clasificación es transversal a las dos anteriores, es decir existe

mercancía general contenerizada que entra en el buque por medidos rodados (por ejemplo, un contenedor que entra en buque subido a un semirremolque) y viceversa, mercancía general convencional que se carga en el buque por medios rodados (por ejemplo, vehículos transportados como mercancía).

al respecto. Estas cinco formas de presentación se agrupan en Visum mediante un sistema de transporte del modo marítimo (M_01).

En la siguiente tabla se recogen las cinco formas de presentación definidas y las hipótesis de participación porcentual consideradas a la hora de aplicar los costes de cada categoría de mercancía, en ausencia de información disponible

Tabla 41. Equivalencia entre las categorías del MNT y las formas de presentación de las mercancías en el modo marítimo

Sistema de transporte VISUM	Forma de presentación / Categoría de mercancía	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
		Automóviles	Piezas de automóviles	Industria siderúrgica	Combustibles líquidos y gaseoso	Industria química	Construcción	Minerales	Madera	Papel	Graneles sólidos agroalimentarios	Graneles líquidos agroalimentarios	Productos alimentarios perecederos	Otros Productos manufacturados	Maquinaria	Resto
M_01	Graneles líquidos				100%	100%										
	Graneles sólidos						100%	100%			100%					
	Mercancía general contenerizada		80%	20%					30%	90%		75%		75%	10%	90%
	Mercancía general no contenerizada (ro-ro)	100%	20%	30%					30%	10%		25%	100%	25%	80%	10%
	Mercancía general no contenerizada (convencional)			50%					40%						10%	

Fuente: Ineco

Sobre la base de las formas de presentación de las mercancías se ha procedido a identificar los distintos **tipos de buque** a través de los que se transportan las mismas: portacontenedores, ferries ro-ro/pax, tankers (transportadores de productos petrolíferos y químicos) y graneleros principalmente.

Cabe precisar que el tamaño de los buques se encuentra muy influenciado por diversos factores destacando el aprovechamiento de las economías de escala,

lo que ha dado lugar al incremento progresivo del tamaño de buques, especialmente en el segmento de los portacontenedores. Para poder aprovechar dichas economías de escala, factores como la demanda y la distancia resultan de especial transcendencia, por lo que el tamaño de los buques difiere en función del trayecto que realicen. Por tanto, se han dividido los distintos tipos de buque en dos grandes bloques:

- Los trayectos que se pueden asimilar al transporte marítimo de corta distancia o TMCD (donde se agrupan los desplazamientos nacionales, así como las relaciones con los países de las zonas exteriores de los niveles 1 y 2, incluyendo también los flujos con el resto del Magreb y del resto Europa en el nivel 3 de la zonificación del modelo).
- Los trayectos de larga distancia (*deep sea*) donde se agrupan las relaciones con las áreas geográficas recogidas en las zonas exteriores del nivel 3 de la zonificación, salvo los desplazamientos con el resto del Magreb y el resto Europa.

La división anterior es una simplificación al objeto de poder simular el comportamiento del transporte marítimo, dado que los buques empleados difieren de las distintas líneas y operadores, por lo que cabría una caracterización más desagregada.

3.7.5.2 Componentes de coste

En relación con los costes, se han analizado los siguientes conceptos:

- Los **costes dependientes de la distancia**, asociados a la operación de transporte,
- Los **costes no dependientes de la distancia** o costes de escala, es decir los asociados al paso por las terminales portuarias.

3.7.5.2.1 Costes asociados a la operación de transporte

Para la estimación de estos costes y dada la dificultad que conlleva por la falta de información en este modo de transporte, se han tomado como fuentes de información las siguientes:

- Publicaciones de reconocido prestigio en materia de transporte marítimo. A este respecto la publicación de la consultora Drewry “*Ship Operating Costs Annual Review and Forecast 2019/20*” puede

resultar interesante ya que se publica y actualiza periódicamente, cuenta con previsiones sobre cómo van a evolucionar los costes y ofrece gran cantidad de estimaciones de coste realizadas sobre diferentes tipologías de buque.

- Publicación de base de datos de la Universidad Técnica de Dinamarca, sobre la relación de entre la capacidad y el consumo de combustible por tipo de buque.
- Precio medio del fuel-oil de uso marítimo (IFO-380) en el año de referencia (2017).
- Se han determinado las distancias interportuarias, mediante los datos CEDEX.

Con el objetivo de estimar un coste unitario en €/t*km para introducir en el modelo, se han analizado los diferentes costes y su contribución al total:

- **Amortización y Financiación:** Se trata de los costes de tipo fijo debido a la compra y pago del propio buque.
- **Combustibles:** Incluye los costes debidos al consumo de combustible del buque en función del precio del mismo.
- **Coste de tripulación:** Los salarios constituyen la gran mayoría de los presupuestos de personal (incluida la paga básica, las vacaciones y las horas extraordinarias garantizadas).
- **Seguros:** La mayoría de los costes de los seguros de los propietarios de buques se dividen entre el casco y la maquinaria y el seguro de protección e indemnización (P&I). Aunque también se incluyen algunos costes de menor cuantía como: los costes por certificados de responsabilidad financiera, el seguro de demora y defensa de la carga, etc.

- **Provisiones y repuestos:** Las provisiones y los repuestos de los buques son adquiridos por una combinación de departamentos centrales de compras en tierra y personal de a bordo.
- **Lubricantes:** Comprenden varios aceites diferentes diseñados para cumplir los requisitos específicos para el correcto funcionamiento del buque. De hecho, son necesarios para cualquier pieza del equipo de a bordo donde sea necesario reducir la fricción y el desgaste, eliminar el calor o garantizar la limpieza de la maquinaria y el equipo.
- **Reparación y mantenimiento y el paso por astillero:** Generalmente se puede dividir en uno de los cuatro grupos, que son los siguientes:
 - Reparaciones programadas o planificadas, que incluyen mantenimiento de rutina, así como estudios de atraque intermedios y totalmente secos.
 - Reparaciones no programadas, que surgen de incidentes como colisiones y naufragios.
 - Reparaciones híbridas, que se producen como resultado del mercado o de decisiones estratégicas.
 - Reparaciones retrospectivas que se vuelven obligatorias a través de cambios en las normas y reglamentos.
- **Gestión y administración:** Los costes de gestión y administración de un propietario se ven influidos por las pautas comerciales de su flota, el número y ubicación de las oficinas, lo que tiene consecuencias en relación con la fiscalidad, la reglamentación y los tipos de cambio.

3.7.5.2.2 Costes de escala

Los **costes de escala**, es decir los asociados al paso por las terminales portuarias, son complejos, ya que incluyen diferentes componentes que dependen de cada Autoridad Portuaria, de cada tipo de buque y del tipo de mercancía.

Para la estimación de estos costes se tienen en cuenta las siguientes tasas y tarifas que los conforman:

- Tasas portuarias
- Tarifas de los servicios portuarios (salvo el de manipulación de mercancías)
- Tarifas asociadas al intercambio modal marítimo-terrestre (ferrocarril/carretera), que incluye el servicio portuario de manipulación de mercancías

A continuación, se describen y analizan los diferentes componentes que conforman los costes portuarios de escala en el caso del transporte de mercancías, con el objetivo de identificar las diferencias entre los costes del transbordo marítimo-carretera y marítimo-ferrocarril en puertos, así como de ver el impacto del modo marítimo como competencia a los modos terrestres.

Las **tasas portuarias** están compuestas por las tasas de utilización, estas se componen principalmente de:

- **Tasa portuaria imputable al buque (T1).** Esta tasa grava la utilización de las aguas incluidas en la zona de servicio del puerto, así como de las instalaciones portuarias que permiten el acceso al puesto de amarre o fondeadero que se asigna al buque y su estancia en estos. Esta tasa es independiente del tipo de tráfico (transbordo, tránsito marítimo o terrestre), y por lo tanto del modo terrestre de acceso/dispersión en el caso de tráficos de importación/exportación. Para el cálculo de dicha tasa se tienen que tener en cuenta la tipología de los buques y sus características (unidades de GT).
- **Tasa portuaria imputable a la mercancía (T3).** Esta tasa grava la utilización, por las mercancías y sus elementos de transporte (en operaciones de transbordo, tránsito marítimo o terrestre), de las instalaciones de atraque, zonas de manipulación de carga y descarga del buque, accesos y vías de circulación viarios y ferroviarios y demás instalaciones portuarias. En el función del modo de transporte

terrestre (ferroviario o carretera) se les aplican coeficientes reductores además de bonificaciones, por lo que el importe total sí depende del modo de acceso/dispersión.

- También podría ser susceptible de imputarse **la tasa de ayudas a la navegación**, si bien su importe es muy reducido, por lo que finalmente se ha desestimado su impacto.

Por otra parte, están las **tarifas de los servicios portuarios**, las cuales dependen únicamente del tipo de buque y sus parámetros básicos para su estimación, y dentro de las cuales se han distinguido los siguientes tipos de servicios:

- Los **servicios técnico-náuticos**, que incluyen las tarifas de:
 - **Tarifa de practicaaje.** Los conceptos tarifarios correspondientes a estos servicios que se han tenido en cuenta son: el practicaaje de entrada y el practicaaje de salida. El servicio de practicaaje consiste en el asesoramiento a capitanes de buques prestado a bordo de éstos, para facilitar su entrada y salida a puerto y las maniobras náuticas dentro de éste y de los límites geográficos de la zona de practicaaje en condiciones de seguridad.
 - **Tarifa de remolque,** comprende el coste del personal de remolque, el de los distintos medios que se utilicen para la realización de la tarea, así como cualquier otro gasto o coste necesario para la prestación del servicio.
 - **Tarifa de amarre,** comprenden el coste del personal de amarre, el correspondiente a las embarcaciones y otros medios que se utilicen, así como cualquier otro gasto o coste necesario para la realización del servicio.
- **Tarifa por el servicio de recepción de desechos generados por los buques,** corresponde al coste asociado a la recogida de los desechos generados por buques y su traslado a una instalación de tratamiento

autorizada por la Administración competente. En este caso se ha aplicado la tarifa fija que aplican las Autoridades Portuarias hagan o no uso del servicio portuario y que le da derecho al buque a descargar por medios terrestres los desechos de los Anexos I y V del Convenio Marpol.

Con respecto a las **tarifas asociadas al intercambio modal marítimo-terrestre** (carretera/ferrocarril), todas las tarifas dependen del tipo de mercancía implicada y en algunos casos también del modo que interviene en el acceso y la dispersión. En este grupo se distinguen los siguientes costes que conforman dicha tarifa:

- **Coste de carga/descarga y estiba/desestiba:** Incluye todas las actividades de carga, estiba, desestiba, descarga de mercancías que permitan la transferencia de la misma entre los buques y tierra u otros medios de transporte y forma parte del servicio portuario de manipulación de mercancías.
- **Coste de manipulación interna:** Incluye todas las operaciones internas de manipulación de la carga (entre muelle y zona de almacenamiento que formaría parte del servicio portuario de manipulación de mercancías, entre zona de almacenamiento y zona de carga/descarga, etc.). Este coste depende de del tipo de operativa aplicada en cada terminal, y es complicado de estandarizar. En general, en el caso de puertos con red ferroviaria interna, donde las vías llegan a los muelles de carga/descarga o a las zonas de almacenamiento de contenedores, no existe diferencia significativa de costes entre carretera y ferrocarril. Se considera que éste es el caso de los puertos existentes en el área de estudio, y que por lo tanto este coste es independiente del modo terrestre.
- **Coste de almacenamiento:** Incluye el coste por el tiempo de permanencia de la carga en las zonas de almacenamiento del puerto, y es independiente del modo terrestre. En el marco del Modelo

nacional no se tendrá en cuenta los días de almacenaje, y por tanto su coste asociado.

- **Coste de acarreo:** Incluye el coste de un servicio de transporte intermedio intraportuario (por ejemplo entre un muelle sin ferrocarril y una terminal ferropuertuaria), o entre un muelle y una zona exterior al puerto (por ejemplo una terminal de apoyo o una terminal terrestre próxima a las instalaciones portuarias). Este coste se aplica exclusivamente al modo ferroviario y depende de la configuración de la red ferroviaria en cada puerto. Se considera que en los puertos existentes en el área de estudio no se realizan acarreos intraportuarios. En el caso de acarreos a zonas exteriores, los costes de acarreo se vinculan al nodo en el que se realiza el transbordo al modo ferroviario (terminal de apoyo o terminal terrestre próxima a las

instalaciones portuarias). Por lo tanto, este coste no se vincula a las terminales portuarias y es independiente del modo terrestre.

- **Coste de carga/descarga al/del modo terrestre:** Incluye el coste de carga/descarga de la mercancía al camión o al ferrocarril. En general, el coste unitario correspondiente a esta operación es superior en el caso del ferrocarril que en el caso de la carretera, sin embargo, la posibilidad de formar trenes completos o con un grado de ocupación alto, hace que el ferrocarril pueda resultar más competitivo en esta partida.

A continuación, se recoge un cuadro que resume los distintos factores que afectan al cálculo de las tasas y tarifas a efectos de la estimación de los costes de escala.

Tabla 42. Costes de escala. Factores implicados en los cálculos de las tasas y tarifas

Costes de paso por instalaciones portuarias		Depende del tipo de modo acceso/dispersión	Depende del tipo/características de buque	Depende del tipo de mercancía
Tasas portuarias	Tasa portuaria imputable al buque (T1)		X	
	Tasa portuaria imputable a la mercancía (T3)	X		X
Tarifas de los servicios portuarios	Tarifa de practicaaje		X	
	Tarifa de remolque		X	
	Tarifa de amarre		X	
	Tarifa por el servicio de recepción de desechos generados por los buques		X	
Tarifas asociadas al intercambio modal marítimo-terrestre (carretera/ferrocarril)	Coste de estiba/desestiba (buque-muelle)			X
	Coste de manipulación interna			X
	Coste de almacenamiento			X
	Coste de acarreo (intraportuario o a terminal de apoyo)	X		X
	Coste de carga/descarga (carretera/ferrocarril)	X		X

Fuente: Ineco

3.7.5.3 Componentes de tiempo

Se contemplan las siguientes componentes de tiempo para la caracterización del transporte marítimo:

- **Tiempos de escala, es decir los asociados al paso por las terminales portuarias.** Incluyen los tiempos relativos a:
 - Carga/descarga y estiba/desestiba de la mercancía: se estiman para cada forma de presentación de las mercancías tomando en consideración datos de rendimientos (toneladas/hora, m³/h, contenedores/hora, vehículos/hora) que figuran en la Recomendación de Obras Marítimas (ROM) 2.0-11 publicada por Puertos del Estado. Asimismo, en aquellos casos en los que no se indican rendimientos en la citada publicación (carga rodada autopropulsada) se han empleado la información disponible en los estudios de la cadena de costes para el tráfico de carga rodada publicado por el Observatorio Permanente de los Servicios Portuarios.
 - Entrada y salida del puerto. Estos tiempos consideran el proceso de entrada y salida del puerto, donde se llevan a cabo los servicios técnico-náuticos (practicaje, remolque y amarre del buque). Estos tiempos dependen fundamentalmente del tipo de buque, condiciones de explotación en las que se accede al puerto, así como las propias características del puerto. No obstante, dada la dificultad de realizar un análisis específico para cada puerto, se han estimado para cada tipo de buque unos tiempos de entrada y salida medios.
 - Tiempos de espera de entrada a puerto: se estiman en función del tipo de servicio que presten los buques (líneas muy regulares o tráficos tramp). Para estimar estos tiempos se considera lo establecido en la ROM 2.0-11 en cuanto a la espera relativa, estableciendo tres niveles (10% para servicios

muy regulares, 50% para tráficos tramp y 25% para valores intermedios).

- **Tiempos de recorrido**, asociados a la operación. Se han estimado a partir de las distancias interportuarias (fuente: CEDEX), asumiendo una velocidad media de navegación de 15 nudos.

A los **tiempos** anteriores, se le añade el relativo a la propia operativa de **recepción y entrega de la mercancía** a los modos terrestres (carretera y ferrocarril).

3.7.6 MODO AÉREO

La demanda de transporte aéreo de mercancías que recogen las matrices origen-destino del Modelo Nacional representa en 2017 apenas el 0,045% del total de los flujos considerados (etapas). Este porcentaje se reduce ligeramente si solamente se consideran los flujos a nivel nacional, puesto que el 92% de las mercancías que pasan por los aeropuertos españoles tienen un origen o destino internacional. Se trata, por tanto, del modo minoritario, con escasa relevancia en el transporte de mercancías, probablemente por centrarse en carga de alto valor añadido por su coste o la urgencia de su transporte.

3.7.6.1 Formas de clasificación de la carga aérea y categorías de mercancías

La clasificación básica de la carga se puede dividir en función del tipo de vuelo en el que se realiza el viaje: en **avión carguero** (*freighter*) o en **bodega de los vuelos de pasajeros** (*belly cargo*). En España la carga se reparte entre los dos tipos, si bien es cierto que el tráfico de vuelos cargueros se concentra en los aeropuertos de Zaragoza y Vitoria (prácticamente sin tráfico de pasajeros) y en los de Madrid y Barcelona (junto a una mayoría de vuelos de pasajeros).

No está disponible la clasificación por tipo de mercancía para asimilarlo a las categorías de mercancías definidas para el MNT. En ausencia de datos

detallados se ha aplicado de manera racional el reparto por clase de mercancía, tomando los datos de la Agencia Tributaria, dividiendo también su transporte según el tipo de aeronave.

En la siguiente tabla se recogen las dos formas de clasificación de la carga aérea definidas y las hipótesis de participación porcentual consideradas a la

hora de aplicar los costes de cada categoría de mercancía. Se agrupan en Visum mediante un sistema de transporte del modo aéreo (A_01).

Tabla 43. Correspondencia entre el tipo de mercancía y el tipo de aeronave (a nivel nacional)

Sistema de transporte VISUM	Tipo de vuelo / Categoría de mercancía	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
		Automóviles	Piezas de automóviles	Industria siderúrgica	Combustibles líquidos y gaseoso	Industria química	Construcción	Minerales	Madera	Papel	Graneles sólidos agroalimentarios	Graneles líquidos agroalimentarios	Productos alimentarios perecederos	Otros Productos manufacturados	Maquinaria	Resto
A_01	Bodega avión pasajeros (belly cargo)		0%		0%								10%	70%		80%
	Avión carguero (freighter)		100%		100%								90%	30%		20%

Fuente: Ineco

De manera similar, se ha realizado un reparto por clase de mercancía a la carga con origen o destino internacional del total de aeropuertos de la red. En este caso, la media en el total de aeropuertos de la red es del 45% de la mercancía transportada en cargueros, con las mismas diferencias entre aeropuertos ya mencionadas en el caso nacional (por ejemplo, en Madrid el 28% de la carga internacional va en carguero, pero en Zaragoza o Vitoria es el 100%). Por otro lado, sí existe transporte de carga en modo aéreo para más tipos de categorías según los datos de la Agencia Tributaria, lo que es coherente con el propio mercado del transporte aéreo y la necesidad de recurrir a este modo para determinadas exportaciones/importaciones, bien por la urgencia en el transporte o la ausencia de otras alternativas eficientes.

También sigue influyendo mucho el tamaño de la mercancía y su paquetización en la utilización de aeronaves cargueras puras o en el transporte en bodega de aeronaves de pasajeros, como se recoge en la siguiente tabla según el criterio del consultor, en ausencia de datos exactos con este nivel de desagregación.

Tabla 44. Correspondencia entre el tipo de mercancía y el tipo de aeronave (a nivel internacional)

Sistema de transporte VISUM	Tipo de vuelo / Categoría de mercancía	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
		Automóviles	Piezas de automóviles	Industria siderúrgica	Combustibles líquidos y gaseoso	Industria química	Construcción	Minerales	Madera	Papel	Graneles sólidos agroalimentarios	Graneles líquidos agroalimentarios	Productos alimentarios perecederos	Otros Productos manufacturados	Maquinaria	Resto
A_01	Bodega avión pasajeros (belly cargo)		20%			50%							60%	70%		70%
	Avión carguero (freighter)	100%	80%	100%	100%	50%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	40%	30%	100%	30%

Fuente: Ineco

3.7.6.2 Componentes de coste

En relación con los costes, se analizan los siguientes conceptos:

- Los **costes dependientes de la distancia**, asociados a la operación de transporte.
- Los **costes no dependientes de la distancia** o costes de escala en aeropuertos.

3.7.6.2.1 Costes asociados al recorrido

De forma preliminar los principales componentes de este tipo de coste son los costes de capital asociados a la inversión en la aeronave o en su caso su coste de arrendamiento, los costes operativos de tripulación, mantenimiento, inspecciones y certificaciones, seguros y combustible, más una imputación a las operaciones de los costes indirectos de la compañía aérea por sus oficinas, personal comercial y otros costes no estrictamente relacionados con el transporte.

Para la estimación de estos costes, se toman como fuentes de información las publicaciones de las líneas aéreas dedicadas al transporte en aeronaves

cargueros. Es importante resaltar que no existe información pública sobre el reparto del coste entre el negocio de pasajeros y de carga de las aerolíneas.

Con el objetivo de estimar un coste unitario en €/Tm*km para introducir en el modelo, que permita representar este coste del transporte aéreo, se han analizado los diferentes conceptos y su contribución al total:

- **Coste de arrendamiento o de amortización de la aeronave:** en general las aeronaves no son propiedad de las aerolíneas, sino que están arrendadas en contratos de *leasing*, en ocasiones incluyendo las tripulaciones. Las compañías distribuyen estos costes de arrendamiento (o la amortización de la aeronave en los pocos casos de propiedad) entre las operaciones que realiza el avión, suponiendo aproximadamente el 20% del coste de una operación.
- **Coste de combustible:** se trata del coste variable asociado a la operación más significativo, por supuesto relacionado con la longitud de la ruta, y muy volátil por estar directamente relacionado con la evolución del precio del crudo. En general las aerolíneas contratan un seguro para protegerse de las fluctuaciones del precio y convertirlo en un coste más estable. El consumo de las aeronaves es muy diferente

en función del modelo, habiendo evolucionado muy a la baja en los modelos más modernos, que desafortunadamente no se suelen emplear para el tráfico de mercancías. De acuerdo a los datos de los fabricantes, una aeronave tipo B737 o A320 consumiría entre 2.800 y 3.000 litros por hora de vuelo. En rutas aéreas nacionales, este coste alcanza el 30-40% del coste de la operación.

- **Costes de mantenimiento:** las aeronaves deben pasar unas inspecciones y revisiones de mantenimiento de acuerdo a las especificaciones de los fabricantes cada cierto número de horas de vuelo o de operaciones. Estos costes, que en función de la aerolínea se realizan con recursos internos o, más comúnmente, se subcontratan a expresas especializadas, se repercuten a los costes de la operación de manera proporcional, y pueden suponer hasta un 10% del coste operativo.
- **Tasas de navegación aérea:** son los costes pagados al prestador de servicios de tránsito aéreo a lo largo de la ruta. En el caso de rutas nacionales, son solamente pagos al Ente Público ENAIRE y pueden suponer un 10% del coste operativo.
- **Costes Indirectos:** son los costes imputados a cada operación para contabilizar todos los costes de las aerolíneas no directamente relacionados con el vuelo, como los costes de sus oficinas, de la venta de billetes/fletes, coste de personal no tripulante, contingencias/provisiones... Pueden alcanzar entre un 10-20% del coste total.

En general, todos estos costes están vinculados a la operación del avión, su ciclo de despegue, vuelo de crucero y aterrizaje, y tan solo el consumo de combustible se ve ligeramente afectado por el peso de la carga de pago transportada.

3.7.6.2.2 Costes de escala

Para la estimación de estos costes se tiene como principal fuente de información los datos recogidos en la Guía de tarifas de 2017, publicada por Aena.

Teniéndose para ello en cuenta los siguientes costes por la utilización de los servicios aeroportuarios básicos, que tienen la consideración de prestaciones patrimoniales de carácter público:

- **Coste de utilización de pista,** estos costes incluyen la utilización de las pistas por aeronaves y la prestación de los servicios precisos para dicha utilización, distintos de la asistencia en tierra a aeronaves, pasajeros y mercancías, así como los servicios de tránsito aéreo de aeródromo facilitados por el gestor aeroportuario.
- **Coste de utilización de las zonas de estacionamiento de aeronaves,** estos incluyen la utilización de las zonas de estacionamiento de aeronaves habilitadas al efecto en los aeropuertos. Se aplica cuando la aeronave no esté ocupando posición de pasarela telescópica o de hangar, considerándose como tiempo de estacionamiento el tiempo entre calzos. Entre las cero y las seis, hora local, se interrumpirá el cómputo de tiempo a efectos de aplicación de la prestación.
- **Costes de los servicios de asistencia en tierra,** son aquellos que se deben a la utilización del recinto aeroportuario para la prestación de servicios de asistencia en tierra.
- **Coste de los servicios de meteorología,** incluyen los costes por los servicios de meteorología que facilite el gestor aeroportuario, sin perjuicio de que tales servicios se presten a través de los proveedores de servicios de meteorología debidamente certificados.
- **Coste del sistema de energía,** es debido al uso de los equipos e instalaciones del aeropuerto para el suministro a las aeronaves de energía eléctrica transformada en 400 hertzios.

- **Coste por servicio de handling TMBR** (tarifas máximas por los servicios básicos de rampa), son los que corresponden a los costes por los servicios de asistencia en tierra.

3.7.6.3 Componentes de tiempo

Se contemplan las siguientes componentes de tiempo para la caracterización del transporte aéreo (los tiempos de acarreo por carretera se consideran asociados a los correspondientes conectores):

- **Tiempos de escala, es decir los asociados al paso por los aeropuertos.** Incluyen los tiempos asociados a:
 - Tiempo de escala y de carga/descarga de la mercancía, siempre es muy rápida e inmediata a la llegada o salida del avión, por motivos de seguridad y de conservación. En base a los documentos "*Aircraft Characteristics for Airport Planning*" publicados por los fabricantes aeronáuticos para cada modelo de avión, se ha estimado que en general es de aproximadamente 15 minutos.

Tiempos de tratamiento de la mercancía: tiempos de llegada a terminal de carga, tiempos de almacenaje (dependen mucho del tipo de carga, en cuanto a sus necesidades de conservación -percederos o no, necesidad de refrigeración o no- y a su valor económico. Con respecto al tiempo de almacenamiento, se ha tenido en cuenta que no existirán días de almacenaje con tiempos asociados para las mercancías, por lo que los valores son nulos.
- **Tiempos de recorrido**, asociados a la operación. Se estiman en función de la duración de los vuelos (fuentes: distintas fuentes de bases de datos públicos como OAG y Flightradar24).

3.7.7 IMPLEMENTACIÓN DE LAS FORMULACIONES EN VISUM

En este capítulo se detalla el proceso seguido para la implementación de los modelos de reparto modal y asignación de mercancías en Visum.

En primer lugar, se describen los pasos previos realizados que permiten establecer las bases sobre las que se construyen los procedimientos propios de las etapas de reparto modal y asignación en Visum.

Seguidamente, se presenta la secuencia de procedimientos implementada, que constituye la modelización del reparto modal y la asignación del MNT de mercancías.

3.7.7.1 Pasos previos

Los cuatro pilares sobre los que se construye la formulación en Visum de los modelos de reparto modal y asignación son los siguientes:

- Definición de los "sistemas de transporte" a partir de los tipos de vehículo y modos,
- Definición de las cadenas multimodales,
- Estructura de la red,
- Implementación del Modelo de costes.

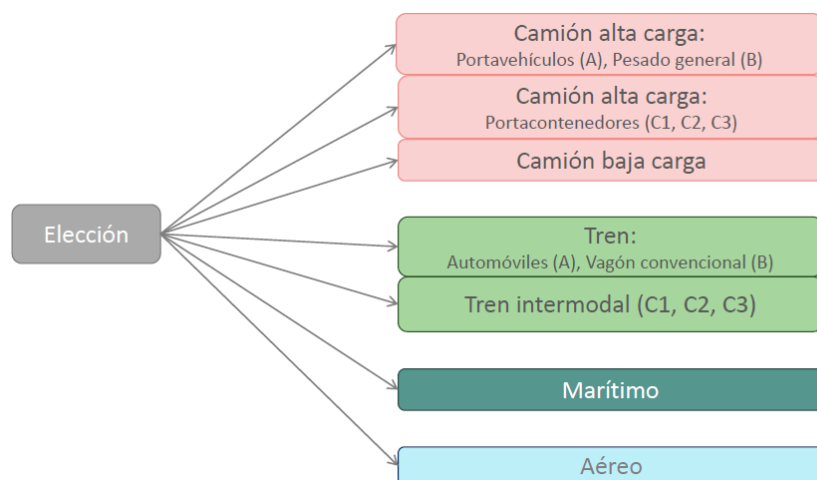
3.7.7.1.1 Sistemas de transporte

En Visum, cada una de las opciones sobre las que reside la elección modal son los llamados sistemas de transporte ("Transport Systems") y se corresponden con la oferta de transporte. En la dimensión de la demanda, y ya desde las etapas de generación y distribución, fueron definidas las 15 categorías de mercancías que constituyen los estratos independientes ("demand strata" en Visum) en que se estructuran asimismo las etapas de reparto modal y asignación.

Esta doble dimensión permite considerar todas las combinaciones posibles oferta-demanda, de manera que, para cada categoría de mercancía, se pueda particularizar la aplicación de diferentes parámetros (costes, tiempos, valor del tiempo, etc.) a cada opción modal o sistema de transporte. Esto permite reducir el número de alternativas, puesto que una misma categoría de mercancía no es transportada en todos los tipos de vehículo.

Para ello, se definen tantas opciones modales principales como la combinación de los cuatro modos (carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo) y sus respectivos tipos de vehículos que han sido descritos en los capítulos anteriores. Esto es, un total de **siete sistemas de transporte principales** según se muestra en el siguiente esquema:

Figura 50. Esquema de modos y sistemas de transporte



Fuente: Ineco

El planteamiento para **carretera** consiste en definir tres sistemas de transporte en Visum para cada tipo de mercancía (véase Tabla 38):

- **C_01:** engloba a los tipos de vehículo A y B de alta carga. Por definición, el tipo A (camión portavehículos) sólo puede transportar mercancías de la categoría M1 (automóviles) y viceversa, la mercancía de esta categoría sólo puede ser transportada en tipo A. El resto de las categorías se transportan en tipo B, para este primer sistema de transporte. Por lo tanto, cuando el modelo esté trabajando con la categoría M1, el sistema de transporte C_01 leerá los parámetros de utilidad (tiempo, coste, valor del tiempo) correspondientes a la categoría M1 y al tipo de vehículo A (alta carga). Y cuando se trabaje con las demás categorías, se aplicarán los parámetros del tipo de vehículo B (alta carga) y de la categoría que corresponda.
- **C_02:** engloba a los tipos de vehículo C de alta carga (portacontenedores). Por definición, el tipo C1 (camión portacontenedor de piezas de automóviles) sólo puede transportar mercancías de la categoría M2 (piezas de automóviles) y viceversa, la mercancía de esta categoría sólo puede ser transportada en tipo C1. De manera análoga, el tipo C3 (camión frigorífico) sólo puede transportar mercancías de la categoría M12 (perecederos) y viceversa, la mercancía de esta categoría sólo puede ser transportada en tipo C3. El resto de las categorías se transportan solamente en tipo C2, para este sistema de transporte.
- **C_03:** aglutina todos los tipos de vehículo de baja carga. Se asume que, debido a su baja representatividad en el cómputo total de la demanda y la ausencia de competencia de estos vehículos con el modo ferroviario, no compensa ir a una desagregación mayor a costa de introducir mayor complejidad al modelo. No obstante, para la aplicación de los parámetros de utilidad (tiempo, coste) se calcularán medias ponderadas por el peso relativo de cada tipo de vehículo dentro del sistema de transporte C_03, y con posibilidad de ser modificadas en un futuro si cambiasen los pesos o porcentajes de distribución.

De forma análoga, el planteamiento para **ferrocarril** consiste en definir dos sistemas de transporte en Visum para cada categoría de mercancía (véase Tabla 39):

- **F_01:** engloba a los tipos de tren A y B. Por definición, el tipo A (porta-automóviles) sólo puede transportar mercancías de la categoría M1 (automóviles) y viceversa, la mercancía de esta categoría sólo puede ser transportada en tipo A. El resto de las categorías se transportan en vagón convencional (tipo B), para este primer sistema de transporte. Por lo tanto, cuando el modelo esté trabajando con la categoría M1, el sistema de transporte C_01 leerá los parámetros de utilidad (tiempo, coste, valor del tiempo) correspondientes a la categoría M1 y al tipo de tren A. Y cuando se trabaje con las demás categorías, se aplicarán los parámetros del tipo de tren B y de la categoría que corresponda.
- **F_02:** engloba a los tipos de tren C (contenedores y cajas móviles intermodales). Por definición, el tipo C1 (vagón portacontenedor de piezas de automóviles) sólo puede transportar mercancías de la categoría M2 (piezas de automóviles) y viceversa, la mercancía de esta categoría sólo puede ser transportada en tipo C1. De manera análoga, el tipo C3 (camión frigorífico) sólo puede transportar mercancías de la categoría M12 (perecederos) y viceversa, la mercancía de esta categoría sólo puede ser transportada en tipo C3. El resto de las categorías se transportan solamente en tipo C2, para este sistema de transporte.

En relación con los modos **marítimo y aéreo**, la información disponible no permite cruzar datos por categorías de mercancías y formas de presentación/tipos de aeronave que permitiría realizar un calibrado a ese nivel de detalle, por lo que el planteamiento sólo contempla la consideración de un sistema de transporte para cada modo.

Para la aplicación de los parámetros de utilidad (tiempo, coste,) se tendrá en cuenta la categoría de mercancía con la que se esté trabajando desde el punto

de vista de la demanda, y la/s forma/s de presentación/tipo de aeronave que corresponden en cada caso, acorde a las hipótesis recogidas en la Tabla 41 y la Tabla 43 respetivamente.

En el caso de que una categoría de mercancía sea transportada de más de una forma se calculan medias ponderadas por el peso relativo de cada tipo de vehículo dentro del sistema de transporte, y con posibilidad de ser modificadas en un futuro si cambiasen los pesos o porcentajes de distribución.

Adicionalmente a los sistemas de transporte principales, se han establecido 24 sistemas de transporte auxiliares para reflejar las características de la red ferroviaria española en términos de costes.

3.7.7.1.2 Cadenas multimodales

Con el fin de representar la posible sucesión de sistemas de transporte dentro de un mismo viaje, se han establecido una serie de cadenas multimodales en Visum. Cada posible cadena multimodal se compone de un **sistema de transporte predominante**, y otros posibles **sistemas alimentadores** que pueden aparecer o no en el recorrido. Estas secuencias representan las diferentes etapas que componen cada viaje entre un origen y un destino.

En la Tabla 45 se enumeran las cadenas multimodales definidas en Visum, mediante la especificación de los sistemas de transporte alimentadores que pueden o no preceder o suceder a cada uno de los siete sistemas de transporte predominantes.

Por otra parte, los **conectores de centroide** a las redes de los diferentes modos ejercen también en el modelo una función alimentadora que representan el *acarreo en carretera* hasta el punto de conexión a la red correspondiente.

Nótese que el sistema de transporte F_01 carece de sistemas alimentadores debido a que corresponde a las tipologías de tren A (portavehículos) y B (vagón convencional), que no permiten intermodalidad con carretera y que generalmente están asociados a fábricas/campas de automóviles o cargaderos privados.

Por su parte, el sistema de transporte F_02 representa a las tipologías de tren C (contenedores y cajas móviles intermodales), por lo que se asume que el único sistema alimentador posible es el C_02 (camiones de alta carga tipo C o portacontenedores).

En el caso del sistema marítimo (M_01), se permite que todos los sistemas de carretera y ferrocarril sean sus alimentadores. Finalmente, las cadenas

multimodales que tengan como sistema de transporte predominante el aéreo (A_01), se considera que solamente existe intermodalidad con la carretera como modo alimentador.

Tabla 45. Cadenas multimodales definidas en Visum

Modo	Sistema de transporte principal		Cadena de sistemas predominante y alimentadores
Carretera	C_01	Camión alta carga: Portavehículos (A), Pesado general (B)	C_01
Carretera	C_02	Camión alta carga: Portacontenedores (C1, C2, C3)	C_02
Carretera	C_03	Camión baja carga	C_03
Ferrocarril	F_01	Tren: Automóviles (A) Vagón convencional (B)	F_01
Ferrocarril	F_02	Tren intermodal (C1, C2, C3)	C_02- F_02-C_02
Marítimo	M_01	Marítimo	C_01-C_02-C_03-F_01-F_02-M_01-F_02-F_01-C_03-C_02-C_01
Aéreo	A_01	Aéreo	C_03-A_01-C_03

Fuente: Ineco

3.7.7.1.3 Estructura de la red

La red multimodal de transporte compuesta por **arcos** o *links* y **nodos** ya definidos con anterioridad en fases anteriores del trabajo de modelización requiere de dos conjuntos de elementos adicionales para completar la estructura que sostiene la oferta del modelo de mercancías:

- Zonas de intercambio modal
- Conectores

Aparte de la zonificación principal, y como se expone con anterioridad, se definen en Visum una serie de **zonas auxiliares de intercambio modal**:

- **Marítimo-terrestre:** 23 zonas portuarias que representan el nodo de intercambio entre el modo marítimo y la carretera o el ferrocarril.
- **Carretera-ferrocarril:** 32 terminales ferroviarias intermodales.

En las tablas y figuras siguientes del apartado 3.1 *Zonificación*, se enumeran y se ubican ambos grupos de zonas.

3.7.7.1.4 Implementación del Modelo de costes

Según se expone en apartados precedentes, las componentes que constituyen el modelo de costes que alimenta el submodelo de reparto modal y asignación, corresponden tanto a los costes y tiempos asociados al recorrido (en tramos) como a las escalas o paso por nodos de cada uno de los modos carretera, ferrocarril, marítimo y aéreo.

A efectos de una correcta implementación del modelo de costes, se han establecido 16 tipos de **arcos** o *links* (atributo TYPENO), agrupados a su vez en 5 según la infraestructura que empleen (atributo GTYPE): carretera, ferrocarril, marítimo, aéreo o conexión (ficticia) carretera-ferrocarril.

Para cada uno de estos tipos de arcos y conectores se han determinado las componentes de coste y tiempo de la función de coste generalizado que les son de aplicación en función del modelo de costes definido para tramos y nodos, por modo de transporte.

3.7.7.2 Secuencia de procedimientos de reparto y asignación multimodal

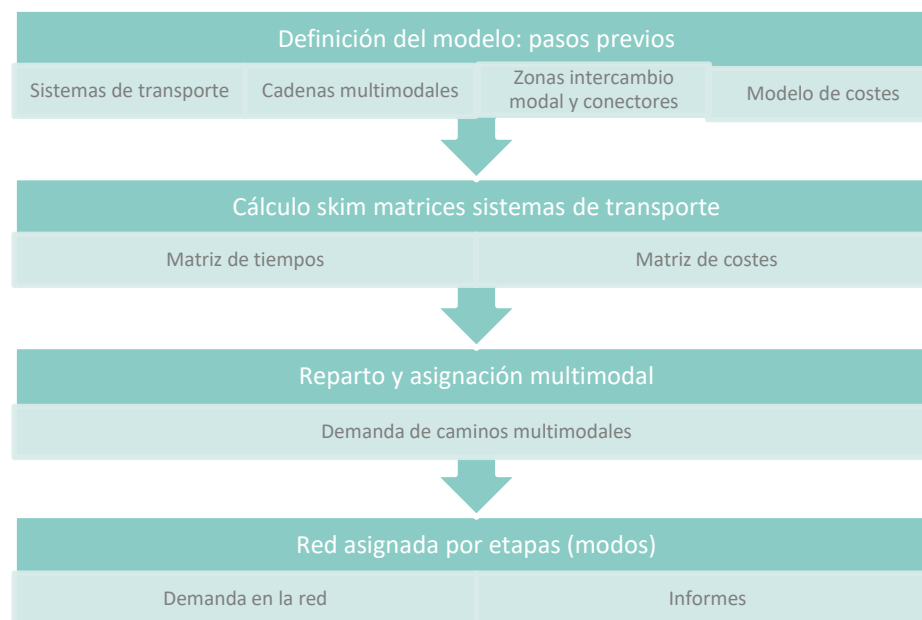
La **asignación multimodal** está formulada en dos niveles:

- **Reparto multimodal:** nivel superior en el que se elige la secuencia modal entre alternativas de cadenas multimodales para cada sistema de transporte predominante (el que utiliza en la mayor parte del viaje). Esta elección modal, formulada mediante ecuaciones de tipo Logit, se apoya en el estudio de los costes/tiempos introducidos entre todas las zonas del modelo (incluyendo las zonas de intercambio modal). Para cada sistema de transporte predominante, se evalúan las cadenas multimodales con las impedancias que en cada etapa son utilizadas (pudiendo depender éstos de sistemas de transporte alimentadores). El resultado de este primer nivel es doble:
 - matrices de viajes multimodales por cadena de transporte,
 - matrices de etapas unimodales por sistema de transporte

- **Asignación unimodal** sobre sistema de transporte principal o auxiliar: en el nivel inferior se asigna cada matriz de etapas obtenida en la asignación multimodal de manera separada en su sistema de transporte correspondiente. Todos ellos se definen en Visum como sistemas de transporte privado.

En el siguiente esquema se pueden observar los procesos que sigue el modelo desarrollado en Visum para la realización de la etapa de reparto modal y asignación.

Figura 51. Diagrama de flujo para las etapas de reparto modal y asignación en Visum



Fuente: Ineco

Se definen *skim matrices* como aquellas que representan los atributos de impedancias entre zonas origen/destino. Estos atributos pueden ser de costes, de tiempos, de distancias, etc.

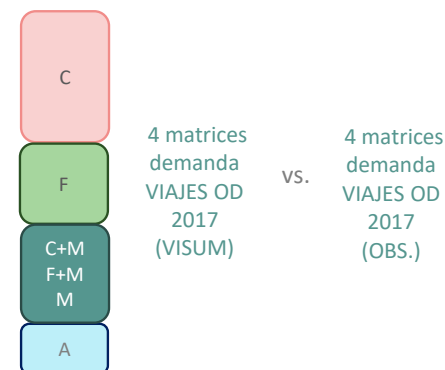
3.8 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE MERCANCÍAS

El proceso de calibración y validación seguido en cada una de las cuatro etapas de la modelización de las mercancías (3.4 Estructura del modelo de mercancías) se ha realizado de forma independiente. En los epígrafes correspondientes a los submodelos de generación y distribución respectivamente se describen las metodologías aplicadas en cada caso. En el presente epígrafe se expone la metodología seguida en la última etapa de la modelización: reparto modal y asignación.

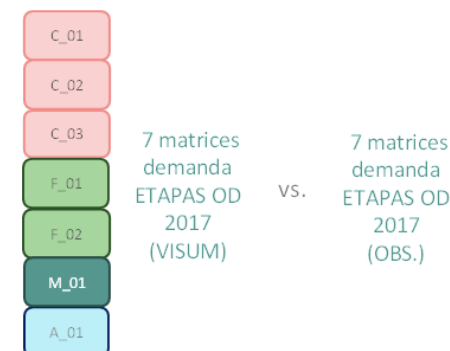
El objetivo principal de la calibración de un modelo es lograr que sus resultados se ajusten a la realidad observada en el año base (2017). Para ello, en primer lugar, se establecen una serie de comparativas entre determinados outputs del modelo y los datos disponibles “observados” que se toman como referencia.

Se trata de un proceso iterativo de cálculo mediante el cual se van determinando o ajustando ciertos parámetros del modelo de manera que se vayan minimizando las diferencias existentes entre los outputs del modelo y los datos “observados”. En el caso del submodelo de reparto modal y asignación construido para el MNT de mercancías, el proceso de calibración se estructura en dos fases secuenciales íntimamente relacionadas entre sí:

- **Reparto multimodal:** se realiza de forma independiente para cada categoría de mercancía mediante minimización de las diferencias entre dos colecciones de outputs del modelo en paralelo:
 - Matrices de viajes multimodales por cadena de transporte: se comparan con las matrices de viajes “observadas” según los cuatro modos principales (carretera, ferrocarril, marítimo²⁴ y aéreo).



- Matrices de etapas unimodales por sistema de transporte: se comparan con las matrices de etapas “observadas” por tipo de vehículo.



²⁴ En el modo marítimo se hace referencia a la suma de todos aquellos flujos que tienen alguna etapa marítima: viajes de carretera con etapa marítima, viajes de ferrocarril con etapa marítima, viajes marítimos “puros”.

- **Asignación unimodal:** de forma agregada para todas las categorías de mercancías, se comparan los volúmenes resultantes a nivel de arco en vehículos para las redes de carretera y ferrocarril con los datos disponibles (aforos de vehículos pesados excepto autobuses en carretera y circulaciones ferroviarias de mercancías, respectivamente).

Las principales métricas empleadas en términos de comparación de cómo el modelo reproduce los datos observados de calibración son las desviaciones absolutas/relativas y GEH.

El estadístico GEH es una fórmula ampliamente utilizada como indicador de calibración para comparaciones en el ámbito del transporte. La magnitud del volumen observado es claramente fundamental a la hora de decidir la bondad de un ajuste. Por tanto, además de considerar porcentajes o diferencias absolutas, el estadístico GEH aporta la ventaja de incorporar los errores relativos y absolutos. La formulación que define a este estadístico es la siguiente:

$$GEH = \sqrt{\frac{(M - C)^2}{0.5 \times (M + C)}}$$

donde “M” indica los valores modelizados y “C” los observados.

La **validación** se ha realizado utilizando las salidas del modelo calibrado de asignación, de manera que posibles malos resultados obtenidos durante el proceso de validación pueden evidenciar desviaciones en alguna de las dos

fases del proceso (desde errores en la codificación de la red, parametrización incorrecta de los modelos de reparto modal, etc.).

Para el proceso de validación los parámetros utilizados para comparar las salidas del modelo con los datos observados procedentes de las estadísticas de transporte disponibles (OTLE²⁵ y Puertos del Estado) son medidas tales como:

- Red de carreteras: toneladas-km y vehículos-km a nivel nacional
- Red de ferrocarril: toneladas-km y trenes-km a nivel nacional
- Reparto modal carretera/ferrocarril en los accesos terrestres a los puertos.

²⁵ Observatorio del Transporte y la Logística en España (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana).