

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES



**APLICACIÓN DE DINÁMICA DE SISTEMAS PARA EL
ESTUDIO DEL REPARTO MODAL EN EL TRANSPORTE**

Proyecto de fin de carrera – Ingeniería Industrial

Autor: Gaspar Manzanera Benito

Director: D. Luis Javier Miguel González

Departamento: Ingeniería de Sistemas y Automática

Valladolid, Enero de 2015

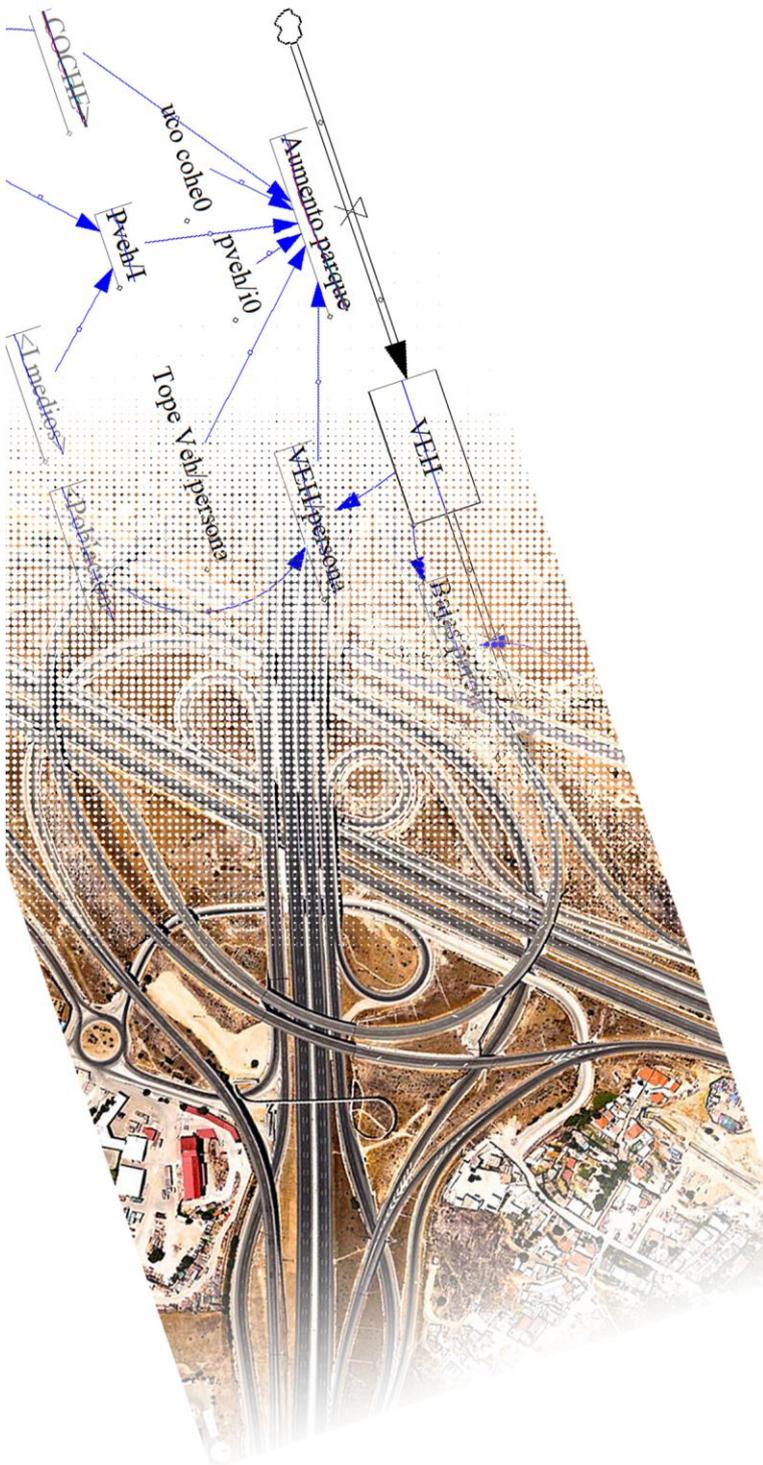
Índice

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	3
a. Introducción.....	5
b. Justificación.....	5
c. Objetivos.....	8
d. Estructura de la memoria.....	8
2. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DEL TRANSPORTE.....	11
a. Caracterización: el transporte como sistema.....	13
b. Desarrollo del sistema actual del transporte.....	18
c. Situación actual y principales indicadores.....	21
1. Datos de reparto modal.....	23
2. Datos sobre la evolución reciente.....	26
3. Datos sobre infraestructura existente.....	27
3. IMPACTOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y ESTRATEGIAS AL RESPECTO ...	31
a. Importancia.....	33
b. Impactos.....	34
1. Impactos ambientales.....	34
2. Impactos sociales.....	35
c. Estrategias y medidas institucionales.....	37
1. Estado Español.....	37
2. Unión Europea.....	45
3. Instituciones mundiales: Banco Mundial.....	47
4. DINÁMICA DE SISTEMAS.....	51
a. Introducción y desarrollo del método.....	53
b. Estructura elemental de sistemas.....	54
c. Paso de la estructura al comportamiento.....	56
d. Construcción, análisis y explotación de los modelos.....	57
5. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO.....	59
a. Introducción.....	61
b. Espacio de trabajo y herramientas.....	61
c. Simulación.....	63
d. Salida de datos.....	65

6. DESARROLLO Y JUSTIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE REPARTO MODAL	67
a. La elección modal en la ingeniería de transporte	69
b. Nuevos enfoques: desvío modal y motilidad.....	71
c. Los modelos propuestos	73
1.El primer modelo: correlaciones.....	75
i. El modelo de elección modal.....	75
ii. El modelo de producción de transporte en coche	83
2.El segundo modelo: causalidad	87
i. Cambios en la forma de modelar el Hábito	87
ii. Cambios en la forma de modelar la producción de transporte	90
7. SIMULACIÓN Y RESULTADOS	99
a. Primer modelo	101
1.Resultados obtenidos en la simulación	101
2.Análisis de sensibilidad	112
b. Segundo modelo	130
1.Resultados obtenidos en la simulación	130
2.Análisis de sensibilidad	139
c. Comparativa de modelos y datos históricos	151
8. ESTUDIO ECONÓMICO	155
a. Introducción.....	157
b. Costes directos.....	157
c. Costes indirectos.....	159
d. Coste total del proyecto	160
9. CONCLUSIONES	161
a. Resumen del trabajo realizado.....	163
b. Conclusiones.....	163
c. Posibles líneas futuras	166
BIBLIOGRAFÍA.....	171
ANEXO1	175
ANEXO2.....	178
ANEXO3.....	188

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS



a. Introducción

El transporte es uno de los ámbitos de la ingeniería que más relación tiene con otros campos del conocimiento, desde la geología a la psicología social. En el siguiente Proyecto de Fin de Carrera se parte de una visión de teoría de sistemas para analizar el comportamiento de los usuarios del transporte frente a la elección modal y su efecto agregado en el reparto modal del transporte.

Para ello se utilizará la Dinámica de Sistemas aplicada a la teoría de elección modal. La Dinámica de Sistemas es una herramienta que sirve para entender las interrelaciones existentes entre sujetos diversos en sistemas complejos, por lo tanto, el alcance analítico de este estudio no va más allá de ofrecer información sobre tendencias y relaciones entre distintos actores que influyen en el sistema de transporte, lo cual en sistemas tan complejos como el que se pretende estudiar es una tarea amplia. Esta disciplina aparece en los años 50 del pasado siglo, enmarcada en el área de Teoría de Sistemas y Automática, siendo desarrollada en un principio para el estudio de sistemas industriales y extendiéndose con el tiempo a otras áreas del conocimiento como la meteorología, la ecología o la economía. [1][2] El desarrollo de esta disciplina es consecuencia de la accesibilidad de ordenadores, dado que es un método principalmente iterativo que sin computación queda muy limitado.

Según los documentos de la Comisión Europea, englobados en la Hoja de ruta 2050 para la descarbonización de Europa, el transporte en 2009 supuso el 25% de las emisiones de CO₂ de la Unión Europea, sólo por detrás del sector energético. [3] Por otro lado las problemáticas asociadas al transporte no se limitan sólo a los efectos globales como participar del cambio climático de origen antropogénico, sino que tienen efectos ambientales y sociales con impactos mucho más cotidianos sobre la vida de la población: usos del suelo, fragmentación del territorio, polución, accidentalidad, empleo...[4][5]. Una gran mayoría de los estudios apuntan hacia que un cambio en el reparto modal aliviaría parte estos problemas, señalándolo como el camino a tomar. [3][6][7][8][9][10] Sin embargo la elección modal es uno de los elementos más complejos de la teoría del transporte, en el que las políticas públicas son tan solo un factor que no siempre es determinante. La complejidad de esta elección se presenta por tres causas principales:

- la gran cantidad de variables que intervienen, de las que las mensurables son minoría [11]
- el aparato matemático y estadístico necesario para el análisis [12]
- relacionado con las 2 anteriores, la falta de datos de todas las variables con suficiente calidad para poder usarlos en los modelos analíticos.

b. Justificación

El desarrollo del transporte es uno de los motores de la industrialización, y por tanto, es simultáneamente causa y consecuencia del desarrollo económico a todos los niveles. [13][14][15] Las implicaciones históricas que el desarrollo del transporte ha tenido se dejan sentir a todos los niveles, desde la perspectiva más limitada de las contabilidades nacionales hasta la difícilmente estudiable convivencia cotidiana de toda la población. Por ello la

problemática del transporte no se puede limitar ni subordinar por un orden claro de magnitud de sus impactos.

Sin embargo, la urgencia de algunos de los problemas obliga a trabajar con especial atención sobre algunos campos del sector. Son problemas de urgencia para y por el sector:

- Su contribución a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). El cambio climático es ya un problema de primer orden y con *extrema probabilidad* de origen humano [16]. Desde los estudios del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático se desprenden tanto las posibles consecuencias del actual proceso en el que está envuelto el clima planetario y sus impactos regionales como las alternativas posibles. El sector del transporte es uno de los principales emisores de los gases GEI, cuya evolución es uno de los factores clave para los probables escenarios del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).

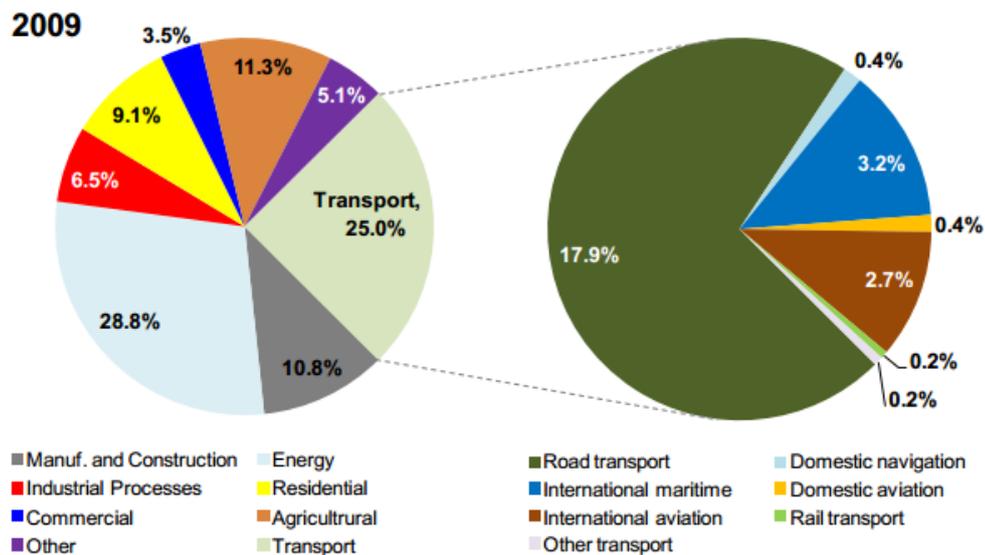


Figura 1 – Emisiones de GEI en la UE27 en 2009. [3]

- Su vulnerabilidad energética. El despegue del transporte como hoy lo conocemos se debe al uso de energías fósiles y sus derivados. Las energías fósiles serían principalmente carbón, petróleo y gas. Sus derivadas serían el resto de energías, dado que toda la industria incluyendo la energética depende de los combustibles de alta concentración y versatilidad que hoy sólo son fósiles. Según la teoría del pico de Hubbert [17] este tipo fundamental de fuentes de energía alcanzan un pico de extracción, a partir del cual la producción sólo puede caer en rendimiento, llegando a un punto en el que deje de ser rentable, en términos energéticos, seguir extrayendo. Según diversas fuentes autorizadas, como la Agencia Internacional de la Energía [18][19][20][21], el pico global de extracción del crudo- la principal fuente de energía fósil tanto por su nivel de consumo como por la cantidad de tecnologías que dependen de él- se alcanzó en torno a 2006-2008. Por lo tanto ante un escenario de escasez que se refleja en una subida constante de precios de las materias energéticas, el sector de transporte encuentra un reto ante el que adaptarse.

- Su impacto en el desarrollo urbano. Según datos del Banco Mundial [22] la mitad de la población humana ya vive en territorios urbanos. El transporte, sus infraestructuras y sus impactos asociados marcan en este tipo de territorio las principales contradicciones y conflictos. Especialmente conflictivos son los problemas de polución, la congestión, la accidentalidad, el ruido, la segregación social y la planificación de infraestructuras. Por esa centralidad en el desarrollo urbano, todos los sujetos que participan de la vida en la ciudad se ven envueltos de una u otra forma en los conflictos del transporte, por lo que se configura un campo de disputa más entre segmentos sociales diferentes y en ocasiones contrapuestos. [13][23][31]
- Su alta tasa de mortalidad asociada. El problema de la accidentalidad es especialmente grave en nuestras sociedades tanto por el hecho en sí como por el tratamiento que se da a una situación de tal emergencia. El problema de la mortalidad en el tráfico viario, que si bien se ha reducido a una tercera parte en 20 años para el Reino de España, no deja de ser la segunda causa de muerte externa tan sólo adelantada a partir de 2010 por los suicidios, según datos del Instituto Nacional de Estadística. La gestión de este problema está caracterizado por no apuntar nunca a la causa del problema, que es el modelo de transporte viario motorizado, sino que las “soluciones” propuestas y emprendidas siempre tienden de apuntalarlo.[4]

Ante este panorama diversas instituciones e investigadores apuntan y apuestan por una eficiencia en el uso y el consumo del transporte para evitar algunos de estos problemas presentados. Una de las posibilidades para mejorar la eficiencia del sector es una mejor distribución modal, esto es, un mejor reparto del consumo de transporte entre modos, dado que si en 1992 el modo viario cubría el 82,2% de la demanda de transporte de viajeros y el 95,7% de la demanda de transporte de mercancías[4], en 2012 las cifras eran el 87,6% para viajeros y el 96,7% para mercancías [24] Siendo el modo viario el que más consume y con una menor eficiencia, desde los años 90 todas las políticas públicas[4] apuntan a la necesidad de reducir el volumen de viajes que usan los medios viarios, y sin embargo vemos que no sólo no disminuyen sino que aumentan ligeramente. Esto es debido a un estudio aún superficial de los motivos que impulsan la elección modal de empresas, instituciones, grupos e individuos.

Mediante Dinámica de Sistemas se pretende arrojar luz sobre esta parcela del análisis del sector, para integrar en el análisis variables complejas como el efecto que un aumento de la eficiencia provoca en forma de efecto rebote [25] y el impacto que tiene la demanda inducida [25] [26] [27] por las políticas públicas de construcción de infraestructura en ese aumento del uso del modo viario. De esta forma se puede esbozar sencillamente qué políticas -tanto institucionales como comunitarias o empresariales- benefician o perjudican a los objetivos de reducción de uso del modo viario, de reducción de emisiones o de reducción de consumo planteados en cada instancia.

El modelo que aquí se presenta es en un principio generalista y adaptado al marco del Reino de España, para el que hay suficiente información con la que hacer funcionar el modelo.

c. Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es contribuir al diseño de una herramienta que mediante Dinámica de Sistemas permita ayudar al diseño de políticas de transporte. Para ello se han tratado de abordar los siguientes objetivos concretos:

1. Estudiar las principales variables involucradas en el sistema de transporte desde una perspectiva general y recopilar los datos de las mismas para el caso español.
2. Estudiar, a partir de la bibliografía disponible, las relaciones entre las variables anteriormente estudiadas.
3. Estudiar los modelos de elección modal del transporte existentes en la bibliografía.
4. Desarrollar un modelo basado en Dinámica de Sistemas del reparto modal del transporte, que integre los aspectos estudiados anteriormente.
5. Realizar análisis de sensibilidad del modelo frente a distintas variables que puedan ser objeto de las políticas en materia de transporte.

d. Estructura de la memoria

La memoria se estructura con los siguientes apartados.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El presente apartado indica las líneas generales que motivan y estructuran el proyecto. En él se recogen también los objetivos planteados por el proyecto.

2. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DEL TRANSPORTE

En este apartado se hace una breve síntesis y caracterización de lo que es el sistema de transporte, su desarrollo histórico, sus principales actores en la actualidad.

3. IMPACTOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y ESTRATEGIAS AL RESPECTO

Seguidamente se repasan los principales impactos documentados del sector a distintos niveles (ambiental, social, económico y fiscal). Tras ese repaso, se expondrán las distintas políticas públicas que se han ido desarrollando en los últimos años evaluando sus efectos sobre los problemas hacia los que apuntaban.

4. DINÁMICA DE SISTEMAS

En este apartado se exponen brevemente las características fundamentales de la Dinámica de Sistemas, su desarrollo histórico y sus actuales aplicaciones.

5. DESCRIPCIÓN DE SOFTWARE UTILIZADO

Para una mejor comprensión del modelo que después se desarrolla es necesario adentrarse en la herramienta utilizada para la simulación, en este caso el software VENSIM PLE.

6. DESARROLLO Y JUSTIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE REPARTO MODAL

En este apartado se analizan de forma teórica la evolución del estudio del reparto modal así como sus principales postulados. Se profundizará especialmente en el concepto “motilidad” [11] y en sus implicaciones en el estudio de la elección modal, lo que derivará en la definición de las variables a utilizar en los modelos de Dinámica de Sistemas.

Posteriormente se desarrollan dos modelos: el basado en correlaciones y el basado en relaciones de causalidad.

7. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Con los datos utilizados y en el marco espacial y temporal a que se refieren se exponen las principales tendencias observadas y mediante el análisis de sensibilidad se apuntarán las variables más relevantes del estudio. Con esos resultados se puede contrastar la utilidad de los modelos y su verosimilitud, permitiendo compararlos.

8. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se evalúan los costes asociados a este proyecto.

9. CONCLUSIONES

Para terminar, se exponen las principales ideas derivadas del estudio realizado, comentarios sobre las políticas públicas adoptadas en los últimos años a la luz de los resultados y finalmente, los posibles campos de actuación que se abren con el material propuesto.

ANEXOS

Los tres anexos profundizan en aspectos tangenciales a la memoria, como la justificación de los costes estimados para cada modo y el listado de variables de los modelos.

a. Caracterización: el transporte como sistema

Para contextualizar el estudio que se aborda en las siguientes páginas hay que caracterizar lo que vamos a llamar “Sistema del Transporte”.

Como indica F. Aparicio [28] la actividad del transporte puede concebirse desde dos perspectivas: como actividad económica y como sistema.

- a. Como actividad económica el transporte se sitúa dentro de la microeconomía, aunque tiene bastantes peculiaridades que hacen de la economía del transporte un campo muy particular. El producto del transporte sería la movilidad de personas, bienes e información.

Desde el paradigma neoclásico, el punto de vista dominante en el campo de la economía, los principales problemas para aplicar las leyes de mercado al sector del transporte son [29]:

- La demanda de transporte es una demanda derivada de otros mercados.
- Los trayectos son únicos en el tiempo y el espacio y no son intercambiables entre sí.
- La intervención de agentes externos al mercado es una condición histórica inseparable de la actividad del transporte, por su propia naturaleza.
- El factor tecnológico está siempre presente y genera economías de escala difíciles de prever y de estudiar desde la microeconomía.

Algunos autores han realizado una crítica a la economía del transporte desde el paradigma neoclásico basándose en sus limitaciones desde el punto de vista ecológico. En el libro “*Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*” [4] se enumeran las siguientes limitaciones del enfoque:

- Incluye sólo los bienes apropiables, valorables a intercambiables. Esto deja fuera muchos de los elementos ecológicos y sociales que interactúan en la economía del transporte y acaba generando problemas para internalizar costes sociales y ambientales. Tampoco estudia todas las formas de producir movilidad, limitándose sólo a las existentes en el mercado.
- La sectorización de la economía no es posible en algunos sectores como este, completamente dependientes del resto de sectores, tanto en su ciclo de vida como en su ciclo de actividad.

- b. Por otro lado el transporte puede concebirse como sistema. La visión de sistema implica contemplar la presencia de distintos sujetos que interactúan entre sí de manera organizada y en función de distintos intereses que les definen como sujetos. Dentro del sistema de transporte se pueden definir varios subsistemas, en función del problema a analizar, de la misma forma que el sistema de transporte se puede considerar un subsistema dentro del sistema económico, del sistema social o de la biosfera.[30][29]

Por ejemplo, en el libro “*Transportation Engineering*” de C. J. Khisty y B. K. Lall [29] encontramos este modelo del sistema de transporte.

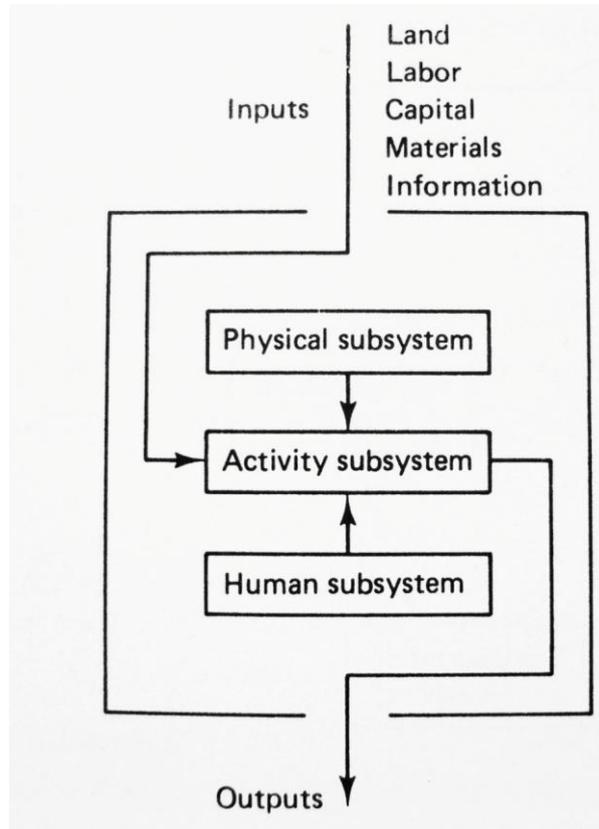


Figura 2- Ejemplo de modelo de sistema de transporte. [29]

Los modelos son representaciones que sirven para analizar sistemas ante distintas problemáticas.

Esta perspectiva será la que se adopte para este estudio, dado que se van a contemplar las interrelaciones con el medio físico, la biosfera y principalmente con la sociedad.

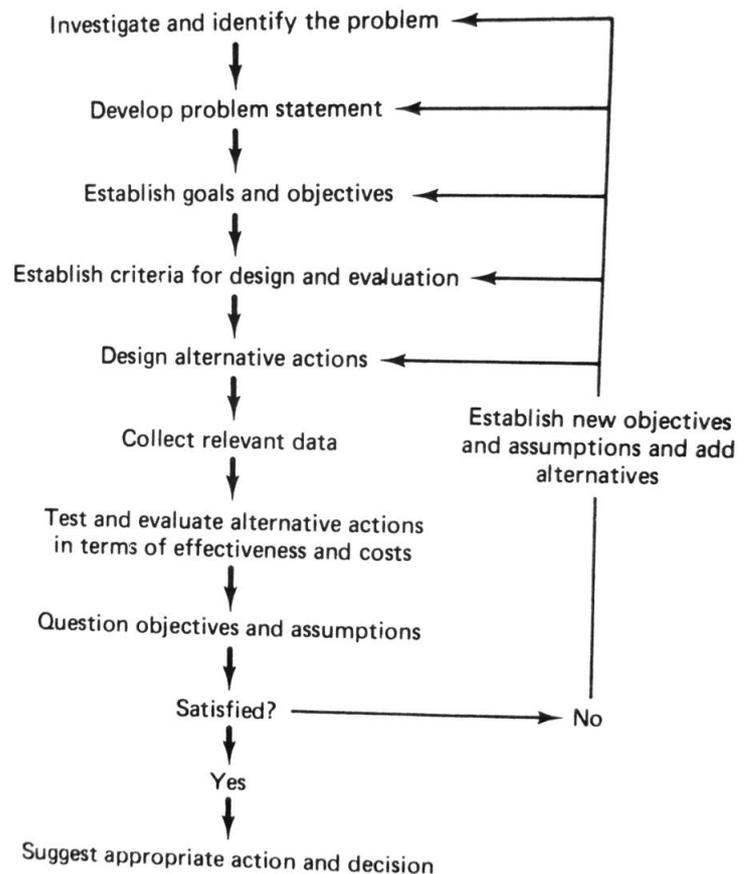


Figura 3 – Ejemplo de método de análisis para toma de decisiones mediante metodología sistémica [29]

A continuación se caracteriza el transporte como sistema.

Khisty y Lall identifican los siguientes elementos que interactúan en el sistema del transporte en el plano físico:

- **Enlaces:** se refiere a todos los elementos que sirven de conexión. Principalmente se refiere a las infraestructuras lineales del transporte: carreteras, ferrocarriles, cables, túneles...
- **Vehículos:** se refiere a todos los elementos móviles que tienen la función de transportar material.
- **Terminales:** se refiere a los elementos nodales de la red de transporte: aeropuertos, puertos, aparcamientos, peajes...
- **Trabajo y mantenimiento:** se refiere al elemento dinámico que conecta el resto de elementos en el plano físico. El trabajo entendido como la actividad de transformación y movimiento que se da en transporte, combinación de potencial y control. Por ello en este elemento se incluye tanto la energía y sus transformaciones que se dan especialmente en los vehículos como el trabajo humano necesario para el control y la dirección de los mismos. También incluye el mantenimiento de los distintos elementos que lo requieren y que no requiere necesariamente trabajo o energía, dado que puede darse de forma pasiva.

Por otro lado, identifica 3 atributos del transporte. Los atributos son características que sirven para definir y distinguir entre distintos modos y medios:

- **Ubicuidad:** la capacidad del modo o medio de llegar a cualquier lugar. En este aspecto tiene gran importancia la capilaridad del modo, esto es, la distribución en el territorio de los enlaces y terminales.
- **Movilidad:** la capacidad del modo o medio de mover a personas o materiales en un tiempo determinado.
- **Eficiencia:** la capacidad del modo o medio de conseguir una movilidad con el mínimo gasto en trabajo y mantenimiento.

Dentro de la perspectiva sistémica, las características fundamentales del transporte serían [28] [29] [4]:

- Gran dependencia de la actividad económica
- Gran interrelación con la actividad social y ambiental
- Sector muy capitalizado, especialmente por las infraestructuras (enlaces y terminales).
- La producción no puede almacenarse
- Fuertes descompensaciones entre flujos, debido a que las rutas no son intercambiables entre sí, generando flujos principales y flujos secundarios.
- Fluctuaciones temporales de demanda.
- Intervención institucional. El mercado no sigue sus propias reglas por la fuerte y necesaria intervención a la que está expuesta el sector, debida a la necesidad de grandes capitalizaciones y su carácter estratégico.
- Dificultad para cuantificar la producción de movilidad, por tratarse del transporte de personas, mercancías e información.

- Gran diversidad en funciones, modos y medios, lo que multiplica los aspectos cualitativos del transporte.

Sobre esta última característica profundizamos con la adaptación al transporte del Diagrama de Abell realizada por A. Gómez Ortega et al. [32]. En él se definen 3 dimensiones:

- Ámbito al que va dirigido el servicio.
- Función que el servicio va a realizar.
- Tecnologías de las que se sirve.

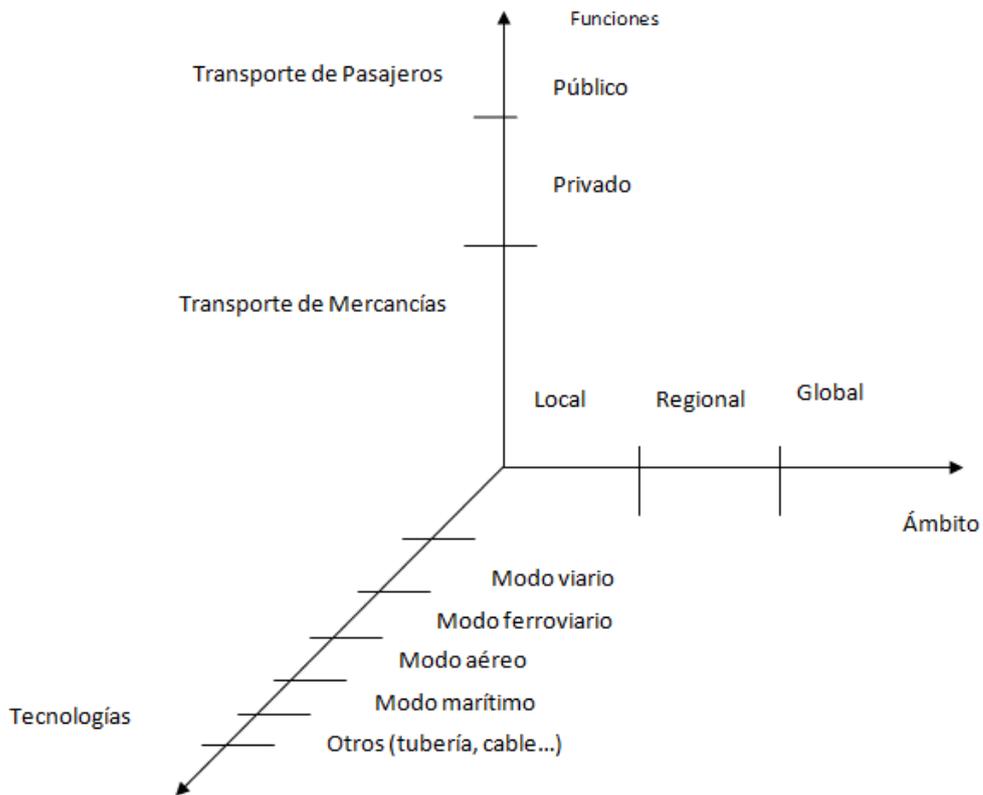


Figura 4- Adaptación de Diagrama de Abell del transporte [32]

Se añade también para los distintos modos y algunos medios una tabla que clasifica de forma cualitativa sus atributos principales.

Modo	Ubicuidad	Movilidad	Eficiencia	Medio	Servicio a pasajeros	Servicio a mercancías
Viario	Muy alta: propietarios de tierra tienen acceso directo a la carretera o la calle. Accesos directos limitados por los usos del suelo.	La velocidad está limitada por factores humanos y límites de velocidad. La capacidad por vehículo es baja, pero hay gran disponibilidad de vehículos.	No muy alta respecto la seguridad, energía y algunos costes.	Camión	despreciable	Local y regional
				Bus	regional y local	pequeños bultos
				Coche	regional y local	objetos personales
				Bicicleta	local	despreciable
Ferroviario	Limitada por las grandes inversiones en infraestructuras. También limitada por usos de suelo.	Velocidad y capacidad pueden ser mayores que las de los modos viarios.	Generalmente alta.	Trenes	regional y global	Regional. Grandes equipamientos.
				Metropolitanos	local	despreciable
Aéreo	Los costes de los aeropuertos limitan la accesibilidad. Excelente oportunidad para las rutas directas.	Velocidades más altas, pero la capacidad por vehículo es limitada.	Bastante baja por la energía y los costes de operación	Corredor aéreo	global	mercancías de gran valor y poco tamaño
				Aviación general	regional, global: entre ciudades	Minorista
Naval	Rutas directas y accesibilidad limitada por la disponibilidad de canales y puertos seguros.	Baja velocidad. Mucha capacidad por vehículo.	Muy alta: bajo coste y poco consumo energético. La seguridad varía mucho.	Barcos	servicios de ferry	grandes cargas, especialmente petróleo
				Cargueros	nada	grandes cargas, especialmente petróleo
Tubería	Limitada por las pocas rutas y puntos de acceso.	Baja velocidad. Alta capacidad.	Generalmente alta, poco consumo de energía	Tubería	nada	líquidos y gases de gran demanda
				Cintas	Cortas distancias	cortas distancias
				Cable	Ascensores y cortas distancias	cortas distancias

Tabla 1 – Características de los distintos modos y medios de transporte. Adaptación de Khisty y Lall [29]

b. Desarrollo del sistema actual del transporte

El sistema actual de transporte debe entenderse dentro de un contexto histórico, vinculado a desarrollos económicos, sociales y culturales. Por ello en el siguiente repaso se van a marcar los principales hitos del desarrollo del transporte contextualizados, para subrayar así la perspectiva sistémica.

En el sistema de transporte actual el principal hito se da con el proceso de industrialización, que transforma completamente la concepción social de la distancia e introduce tecnologías que aprovechen las nuevas fuentes de energía exógena de alta densidad. Por tanto el proceso, que se da en los siglos XVIII y XIX supone un antes y un después.

Durante toda la historia pre-industrial son dos los desarrollos técnicos relevantes que se dan en torno al transporte.

El primero es la aparición del modo viario. En un primer lugar, con la definición de rutas de forma consciente, con ayuda de guías para la orientación como estrellas, que fuesen útiles a las migraciones del último paleolítico, en torno a 30.000 años atrás. En segundo lugar, y vinculado a la aparición de la civilización jerárquica, con la creación de carruajes militares que se sirven de la rueda. Constancia de este tipo de carruajes hay en las civilizaciones orientales desde hace 5.000 años, si bien a Europa empiezan a extenderse por Grecia en torno al siglo VI a.C. y se acepta que en la península Ibérica entrasen por primera vez con la invasión Etrusca. La combinación de ambos desarrollos se da en territorio peninsular bajo dominación romana, creando un sistema de vías estables que permitía la circulación de carros, lo que generaliza su uso y permitió su desarrollo en aplicaciones no militares. [28]

El segundo desarrollo vinculado al transporte se da en el modo acuático. No hay consenso en torno a las condiciones que dispusieron el inicio del transporte marítimo, que es algo extendido en las sociedades complejas desde la existencia del comercio. Sin embargo, el desarrollo técnico más importante en materia de navegación se da en la Edad Media con la brújula. La brújula es una técnica que existe en Asia desde el siglo XII a.C., pero que no se extiende a Europa hasta 2.200 años después, teniendo la primera constancia del uso de la brújula por parte del inglés Alexander Neckam en 1180 d.C. La técnica supone la posibilidad de hacer grandes viajes por mar abierto, lo que despierta la posibilidad de conocer nuevos mundos. Esto nos lleva al cambio de paradigma que hace posible la extensión del transporte.

En torno a los siglos XIV, XV y XVI se da en Europa un cambio de paradigma cultural que posibilita, como veremos, los posteriores desarrollos del transporte. Frente a la cultura medieval, la extensión de la brújula y de los grandes navíos permite pensar en la exploración de nuevos mundos, espoleados por una incipiente industria primaria y los cambios sociales que eso implicaba. L. Mumford [15] sitúa en tres campos las áreas de exploración que se abren a partir de esa época: el nuevo mundo orgánico (exploración de tierras, mares, fauna y flora), el nuevo mundo humano (creación de utopías, escapismos que rompen con la visión estática de la Historia en la Edad Media) y el nuevo mundo de la máquina (exploración de lo mecánico y lo analítico, entendiendo el mundo natural como un ingenio mecánico). La nueva composición social que marca las líneas de conflicto de clases que se empieza a esbozar en esos siglos adjudica el paradigma explorador a la nueva y pujante clase burguesa, dejando a las tradicionales estructuras clericales y nobiliarias como defensoras de la escolástica medieval.

El complejo asentamiento de la burguesía como clase dominante en lo que ya es “Occidente” se da por el creciente poder económico que esta clase acumula y en medio de violentas revoluciones políticas y sociales, cuyo máximo exponente se da en la Revolución francesa de finales del siglo XVIII. Estos cambios en la estructura social apuntalan como dominantes las ideas que la burguesía abanderaba tanto en la concepción del mundo natural como de la sociedad, lo que tiene su reflejo en la creación de estructuras para el transporte como lo que recientemente se ha bautizado como “transporte público”.

El primer ejemplo de este fenómeno se da en París en 1650, vinculando “estaciones de postas” y vehículos arrastrados por caballos, lo cual posteriormente daría lugar al desarrollo de un reglamento de vehículos destinados al transporte de viajeros, en 1657. El reflejo peninsular de estos desarrollos es escaso, como escasa es la evolución de la estructura social peninsular hasta el siglo XIX. Los servicios de diligencias que se establecen en el siglo XVIII están vinculados a la monarquía y la corte y conectan los Reales Sitios (Aranjuez, la Granja y el Escorial), para posteriormente implantar la primera línea Madrid-Bayona, pasando por Valladolid en 1788. Este desarrollo de las diligencias viene acompañado de una apuesta por las infraestructuras radiales, de inspiración Ilustrada, que desarrolla en la segunda mitad del siglo XVIII más de 2.000 km de carreteras en el Reino de España.

El siguiente avance significativo en el transporte es la máquina de vapor aplicada a la navegación en 1807 por Robert Fulton, tras varios años de investigaciones e invención de mecanismos. La primera industria textil y minera, precursora de la revolución industrial, se había servido de la existente red de canales para comunicarse con otros núcleos, dejando patente la vinculación entre industrias y vías de comunicación desde los primeros momentos. Esto explica el desarrollo de canales motivados por la actividad mercantil, como el Canal de Castilla iniciado en 1753. Este contexto es el que explica porqué un artefacto, la máquina de vapor, que llevaba siendo conocido al menos desde que Herón de Alejandría dejó constancia de ello en el siglo III a.C. se empieza a utilizar como medio de producción. Este avance también multiplica el interés por el carbón como fuente de energía primaria, lo que aumenta la actividad de la industria minera.

El desarrollo paralelo del barco de vapor y la locomotora, vinculados a las industrias energéticas y productivas, marcan la constante del siglo XIX. El ferrocarril se extiende por Europa rápidamente, dejando a un lado el territorio peninsular que empieza la inversión en ferrocarril en 1848, cuando Francia, R.U. y la futura Alemania ya sumaban 20.000 km instalados. El ferrocarril en el Reino de España tiene una implantación tortuosa. Por un lado, desde el principio y debido al reglamento de 1844 el ancho viario es distinto al del resto del continente, aislando de facto el sistema ferroviario peninsular. Por otro lado, la aparición de un fuerte competidor en el transporte viario cuando aún no se había desarrollado la infraestructura ferroviaria llevó a las empresas del ferrocarril a quedar al borde del cierre en la segunda década del siglo XX, situación que se mantendría hasta la integración de todas las empresas en RENFE en 1941.

El fuerte competidor del ferrocarril es el transporte viario, vinculado al motor de explosión patentado en 1877 por Nikolaus Otto y en 1897 el motor de Rudolf Diesel. La extensión de los vehículos que se sirven de estos motores es inmediata, aprovechando las redes viarias que históricamente se habían desarrollado, cosa que el resto de infraestructuras del transporte no podían hacer quedando vinculadas a fuertes inversiones. Por otro lado, la explotación del petróleo encuentra un motivo para expandirse, siendo una fuente de energía más limpia y con

mayor densidad energética que el carbón aunque peor distribuida geográficamente, lo que provoca nuevas tensiones geopolíticas.

El desarrollo del transporte en el siglo XX ha venido marcado principalmente por la extensión del automóvil y todo su entramado. El desarrollo del automóvil ha tenido profundas implicaciones en el urbanismo, el empleo, la energía, la gestión territorial... Para subrayar las vinculaciones intrínsecas del automóvil con otras estructuras se rescata aquí esta ácida aunque acertada cita de los Amigos de Ludd [33]:

“Resulta cómico que al coche se le nombre “automóvil”, cuando de todos los medios de traslación de la historia humana quizás sea el menos dotado de autonomía. En efecto, el llamado automóvil, como mero artefacto, se inserta dentro de un orden técnico y mecánico que necesita movilizar increíbles fuerzas materiales, políticas, ingenieriles, legislativas, etc., para poder desplazarse por una carretera. La expansión interior del vehículo automóvil es una ficción que ha necesitado transformar el mundo, hacerlo a su medida, para que resulte creíble.”

También durante el siglo XX otros modos, como el aéreo o por tubería han hecho aparición. Durante el siglo XX la aviación, retratada como *súmmum* del transporte, ha aparecido y se ha desarrollado comercial y militarmente. La dependencia de la aviación de los derivados del petróleo quedó patente en la Segunda Guerra Mundial, en la que al aislar a los ejércitos del Eje de las reservas de crudo de oriente su derrota se precipitó. Esta nueva dependencia y el desigual reparto regional de los recursos impulsaron el desarrollo del transporte de estos recursos energéticos por tubería, siendo uno de los principales objetos de este modo de transporte, por detrás del agua.

A finales del siglo XX, con el fin del mundo bipolar en lo político, social y militar; la globalidad que suponen los anteriores modos y medios de transporte descritos alcanza su máxima potencialidad, antes limitada por los conflictos bélicos y las estructuras políticas y ahora potenciada por una mundialización de la economía liberal.

Sin embargo, tras los conflictos sociales, políticos y económicos de la década de 1970, un nuevo paradigma con respecto al estudio de la técnica se abre paso. En un contexto de expansión de la economía productiva por el planeta y por tanto de máxima explotación de las técnicas de transporte existentes, se produce una crisis en torno al recurso más vulnerable para el sector, el petróleo, que espolea la búsqueda de alternativas. Esa búsqueda de alternativas alimenta la crítica ecológica y ecologista a la civilización industrial. Surgen, especialmente del campo académico occidental, distintas corrientes que estudian el impacto ambiental de las técnicas que la economía explota para su expansión generando fuertes críticas en el seno de la sociedad a determinados procedimientos. Esta corriente crítica toma protagonismo entre las clases populares de occidente en paralelo con el menguante protagonismo del movimiento obrero tal y como se había estructurado hasta entonces. Esta nueva corriente impulsa un cambio en el paradigma de los estudios tecnológicos, a partir de entonces en una constante contradicción entre aumentar la producción y con ello el beneficio monetario y a la vez minimizar los impactos ambientales. [34]

En el campo del transporte, como en casi todas las industrias, esta corriente deja su impronta en una constante apuesta por parte de instituciones e industrias en aumentar la eficiencia, como forma de aliviar los impactos de su actividad, y en eliminar algunas prácticas nocivas substituyéndolas por otras inocuas o menos nocivas. Las primeras constataciones a principios del

siglo XXI de la existencia de un Cambio Climático global de causas antropogénicas impulsaron aún más medidas en esta dirección [16].

Aún con esta tendencia vigente, el desarrollo industrial ha sido el principal motor del desarrollo del sistema en las últimas décadas. En Europa, el proyecto institucional surgido desde la Comisión Europea apunta a construir una red transeuropea para tener un sistema homogéneo de transporte especialmente orientado a las mercancías. Bajo esta cobertura, especialmente en el Reino de España el despliegue de infraestructuras de transporte de gran capacidad se ha disparado a partir de 1996, muy relacionado la expansión de las empresas del sector. Con el aprendizaje y los beneficios obtenidos de esta expansión se convirtieron a principios del siglo XXI en grandes empresas a nivel mundial y empezaron su extensión por América.

Actualmente, el transporte se sitúa en un contexto en el que la movilidad, como indica V. Kaufmann [35] se caracteriza por:

- Conectividad en vez de contigüidad: los espacios ya no se vinculan por la distancia física sino por los medios técnicos que hay entre medias.
- Movilidad reversible frente a movilidad irreversible: los flujos migratorios y la movilidad en general se torna reversible.
- Ubicuidad frente a unidad: la actividad económica deja de estar localizada en determinado lugar para dar lugar a la capacidad de actuación y comunicación descentralizada desde la distancia.

c. Situación actual y principales indicadores

Caracterizado y visto en perspectiva, ahora se van a aportar datos sobre la situación actual del sistema de transporte en el Reino de España, marco para el cual hay suficientes datos para realizar este análisis.

La fuente de datos más actualizada y completa y con una información más sistematizada es la que se encuentra en “*Las Cuentas Ecológicas del Transporte en España*” [5], documento de Ecologistas en Acción con el apoyo de la Fundación Biodiversidad y el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. En este documento, actualización del libro de 1996 “*Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*” [4] de A. Sanz y A. Estevan. En este estudio se presenta un análisis completo del sector, incluyendo figuras que tradicionalmente no se incluyen como transporte aunque por definición sí lo sean, como el transporte vertical en edificios o el transporte de agua y energía. Estos últimos son accesorios para el ámbito del presente estudio, por lo que se excluirán del análisis que aquí se desarrolla. El enfoque con que se hacen estas “Cuentas”, explicado en el libro de 1996, se enmarca en la economía ecológica y por tanto debe contabilizar todos los flujos vinculados al sector desde el punto de vista de la energía y los materiales y no sólo desde el punto de vista monetario, que también está incluido.

Las características del enfoque de la economía ecológica aplicada en el transporte y con el que se obtienen estos datos son las siguientes: [4] [5]

1. Reconocimiento de los límites ecológicos: inclusión del concepto “capacidad de carga” a los ecosistemas afectados por la actividad del transporte.

2. Integración de la variable tiempo: se incluyen los aspectos relacionados con los flujos y stocks de recursos que afectan a generaciones futuras.
3. Titularidad colectiva de los recursos naturales: considerar que los recursos naturales son un patrimonio colectivo implica considerar que su explotación sólo puede darse en régimen de sostenibilidad y equidad para toda la población. Esto implica que la movilidad, limitada por la capacidad de carga ambiental, debe además de distribuirse de tal forma que garantice el derecho de acceso equitativo a todos los recursos implicados en la producción de transporte.
4. Globalidad de procesos físico/económicos: se contemplan los procesos económicos vinculados a sus procesos físicos que les sirven de soporte y estos a la vez a todos los procesos anteriores y posteriores que los hacen posibles. Esto implica tener una visión global del proceso.
5. Interconexión entre los valores económicos, sociales y ambientales: frente al concepto de “coste externo” los procesos económicos se contemplan como un todo que incluye efectos en distintas dimensiones más allá de la monetaria. El estudio de las interrelaciones entre las dimensiones económicas, sociales y ambientales es el objeto de la economía ecológica.
6. Heterogeneidad, “irreductibilidad” o “inconmensurabilidad” monetaria de las diferentes dimensiones: se considera que los procedimientos por los que se calculan los costes monetarios de los procesos sociales y ambientales son arbitrarios y por tanto, inservibles para el estudio de la economía desde la perspectiva ecológica.

Algunas definiciones importantes se dan a la hora de medir la producción del transporte. Según esta concepción, producción es “Cualquier desplazamiento de personas, bienes, materiales o mercancías realizado con intencionalidad por los seres humanos” frente al enfoque tradicional en el que sólo se contemplan los desplazamientos que conlleven una valoración económica.

Para lo cual se adoptan una serie de definiciones básicas que se recogen aquí porque serán también de utilidad en el resto del estudio.

Conceptos asociados a la medición del transporte

Concepto	Significado
• Viaje	Desplazamiento realizado por una persona o por un vehículo por cualquier motivo entre un origen y un destino particulares
• Viajero o viajera	Persona que realiza un viaje entre un origen y un destino de desplazamiento
• Vehículo-km	Desplazamiento de un vehículo a lo largo de un kilómetro
• Persona-km	Desplazamiento de una persona a lo largo de un kilómetro. Se obtiene, por ejemplo, multiplicando los vehículos-kilómetro por su ocupación, sin contar los conductores de los vehículos de transporte público, pero sí los conductores de vehículos privados
• Plaza-km	Desplazamiento de una plaza de vehículo a lo largo de un kilómetro. Se obtiene de multiplicar los kilómetros recorridos por el vehículo por las plazas que ofrece.
• Tonelada desplazada	Peso de la mercancía o bien desplazado, sin contar el peso del vehículo que lo transporta
• Tonelada-km (t-km)	Desplazamiento de una tonelada de mercancías a lo largo de un kilómetro
• Tonelaje máximo transportable	Capacidad de carga o número máximo de toneladas de la mercancía o bien desplazado, sin contar el peso del vehículo, que puede transportar un vehículo
• Tonelaje máximo-km (t_{\max} -km)	Desplazamiento del tonelaje máximo de mercancías a lo largo de un kilómetro

Tabla 2 – Conceptos utilizados para medir magnitudes del transporte. [5]

1. Datos de reparto modal

En el año 2007, último año de la tendencia expansiva de la economía iniciada a mediados de los años 90, el reparto modal en el transporte interior de personas era el que se muestra en la tabla siguiente.

Modo	Millones de personas-km	%
Automóvil	489.918	69,4
Autobús	75.582	10,7
Motocicleta y ciclomotor	20.768	2,9
Peatonal	25.750	3,6
Bicicleta	1.404	0,2
Subtotal viario	613.421	86,9
Ferrocarril convencional	21.856	3,1
Metro	7.233	1,0
Tranvía	214	0,0
Subtotal ferrocarril	29.303	4,2
Subtotal aéreo	61.225	8,7
Subtotal marítimo	1.612	0,2
TOTAL	705.561	100,0

Tabla 3 – Producción del transporte de personas en 2007. [5]

Estos datos, en personas-kilómetro, son los más apropiados para caracterizar el sector del transporte dado que reflejan la producción del transporte. Sin embargo, hay que señalar aquí la diferencia entre transporte y movilidad, siendo el transporte una expresión de la movilidad pero no todas sus expresiones. La movilidad es un concepto muy relacionado con la ubicuidad y por lo tanto con la accesibilidad. La movilidad se expresa en Viajes, según la Tabla 2.

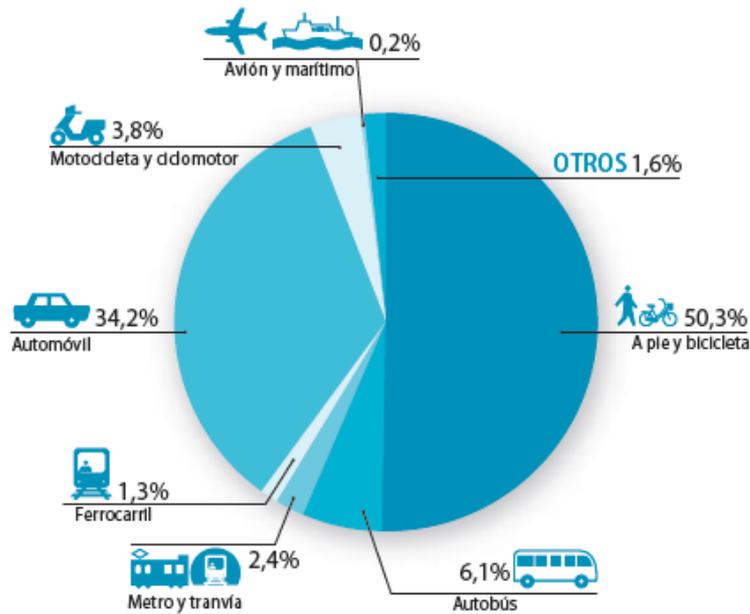


Figura 5 – Reparto modal de la movilidad (viajes) en España en 2007. [5]

Por otro lado, el transporte está relacionado con las técnicas que permiten la movilidad. La diferencia se manifiesta al comparar estas cifras sobre la producción de transporte con cifras de desplazamientos y medios usados, que para la misma situación que en el gráfico anterior y con la misma metodología arroja la siguiente distribución:

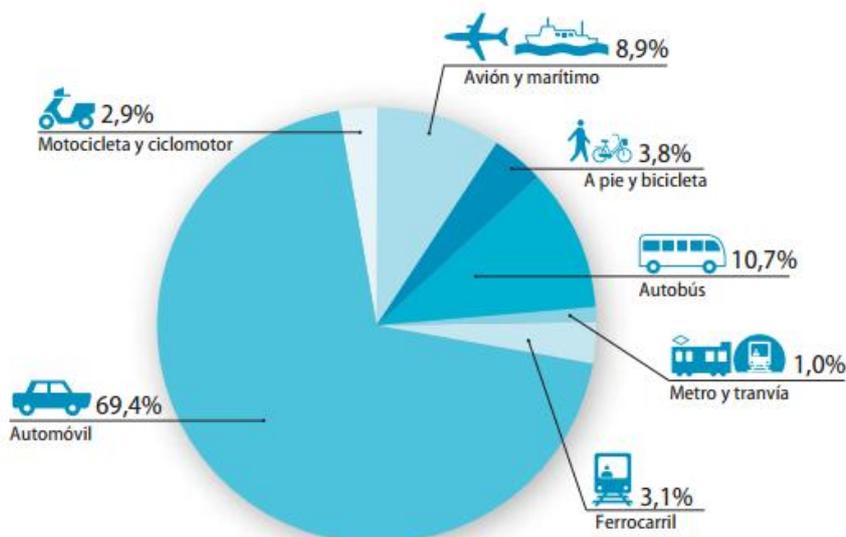


Figura 6 – Reparto modal de la producción de transporte (pers-km) en España en 2007. [5]

La distribución cambia principalmente por el peso que adquieren los modos de transporte no motorizados, que pasan de ser un 3,8% de la producción a ser un 50,3% de los desplazamientos. Este otro reparto es imprescindible para entender la movilidad, puesto que revela que la mayoría de los desplazamientos que realizamos se realizan con medios no motorizados y que por lo tanto, la movilidad se da principalmente mediante estos modos, mientras que en la producción el medio predominante es el automóvil.

En el estudio del reparto modal que aquí se lleva a cabo, se va a trabajar con ambos conceptos, diferenciándolos claramente.

Por otro lado, merece la pena también ver como es la situación del transporte de mercancías, aunque no sea el centro del estudio que se va a llevar a cabo en estas páginas. Es interesante por la enorme interrelación existente entre el transporte de pasajeros y el de mercancías, principalmente por la parte estructural del transporte, en la mayoría de los casos compartida. Se incluye en los datos el transporte de agua, lo cual no es muy común en los estudios sobre economía del transporte. Obviamente, es la principal “mercancía” transportada, por lo que acapara la mayor parte de la producción que se expone a continuación, seguida por el transporte viario y ya muy de lejos por el resto de modos y medios. Los datos sobre el transporte de mercancías presentan este reparto:

Modo	Toneladas-km desplazadas (millones)	%
Camión y furgoneta en carreteras	361.227	26,3
Camión y furgoneta en viario urbano	27.523	2,0
Total viario	388.750	28,3
Ferroviario	11.212	0,8
Aéreo	147	0,0
Marítimo	44.040	3,2
Tubería convencional (oleoductos) interior	8.936	0,7
Tubería convencional (gasoductos) interior	3.670	0,3
Total tubería de productos energéticos	12.606	0,9
Agua uso urbano	181.248	13,2
Agua uso agrario	731.931	53,3
Aguas residuales	1.450	0,1
Total tubería agua	914.629	66,6
Cable eléctrico ³²	2.380	0,2
TOTAL	1.373.764	100,0

Tabla 4 – Producción del transporte de mercancías en 2007 [5]

Excluyendo el agua del transporte, en tanto que como se ha indicado es una “mercancía” que no se suele contabilizar como tal en las estadísticas del sector, obtenemos:

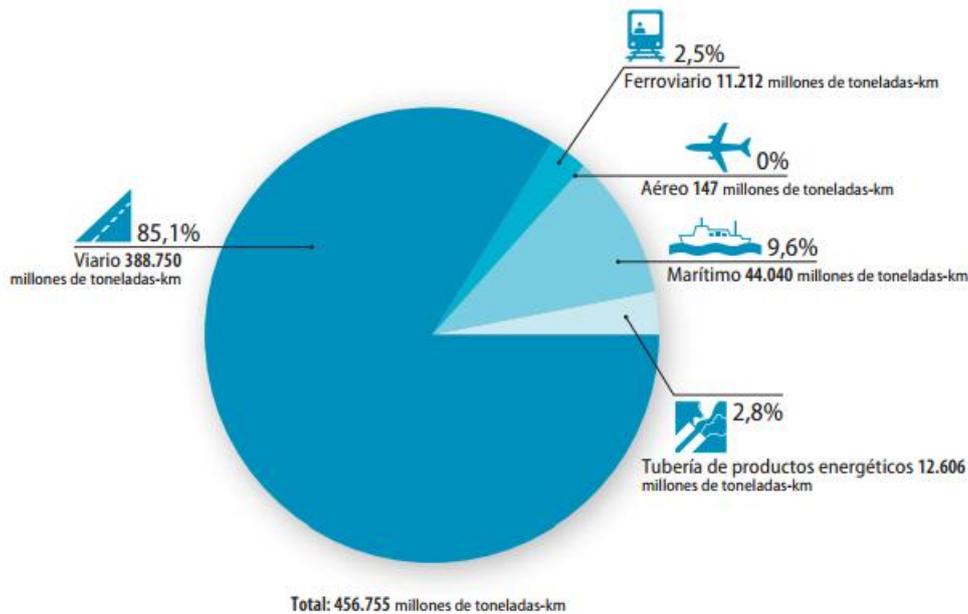


Figura 7 – Reparto modal de la producción de transporte de mercancías en España en 2007 [5]

2. Datos sobre la evolución reciente

En el estudio se muestran también datos de la evolución del transporte en los últimos tiempos divididos en 2 intervalos: 1992-2007 y 2007-2012. El primer intervalo es claramente expansivo en todos los aspectos, lo cual es comprensible en tanto que crecieron todos los indicadores normalmente relacionados al sector: población, actividad económica, capacidad de consumo, inversión en infraestructuras...

El segundo intervalo revela los efectos que la reestructuración económica ha tenido sobre el sector. Este intervalo no ofrece resultados tan evidentes, pues si bien la actividad en el sector se ha reducido en términos generales hay alguna excepción. En cuanto al transporte de personas la cantidad de personas-km se ha reducido un 8%, mientras que el transporte de mercancías ha caído un 30% respecto de las ton-km transportadas en 2007.

En el transporte de viajeros el modo que más cae es el aéreo, mientras que el ferroviario aumenta ligeramente (un 1%). La explicación a este fenómeno se encuentra en las fuertes inversiones en infraestructura del periodo, especialmente en la alta velocidad, que ha facilitado que el ferrocarril compitiese con la aviación interior y cuya red ha pasado de 1511 km en 2007 a 2144 en 2012.

Merece la pena en este apartado de evolución aportar los datos de inversión en millones de euros que las administraciones públicas españolas hicieron cada año en los distintos tipos de infraestructuras del transporte:

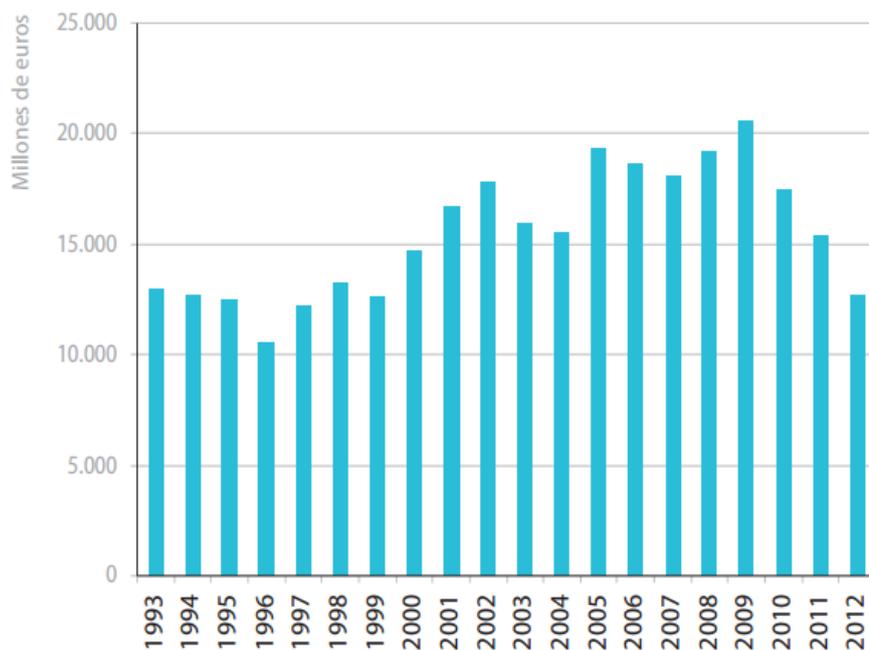


Figura 8 – Inversión en infraestructuras de transporte en España 1993 – 2012 [5]

3. Datos sobre infraestructura existente

En cuanto a la infraestructura desarrollada los siguientes cuadros resumen la situación actual:

Modo	Categoría	Kilómetros
Viario	Carreteras del Estado, las CCAA y las Diputaciones y Cabildos	165.595
	Carreteras de otros organismos	11.355
	Total de carreteras de administraciones supralocales	176.950
	Viario municipal interurbano	361.517
	Viario municipal urbano	136.919
	Total de viario municipal	498.436
	Total viario convencional	675.386
Ferroviario	Ferrocarril	15.922
	Metro	583,8
	Tranvía	174,1
	Total ferroviario	16.680
Tubería	Gaseoducto	9.680
	Oleoducto	4.743
	Total tubería de productos energéticos	14.423
	Grandes conducciones de riego y abastecimiento de agua	14.734
Electricidad	Electricidad alta tensión 400 kV	20.104
	Electricidad tensión 220 kV	18.429
	Total infraestructuras de transporte de electricidad	38.533

Tabla 5 – Extensión de las infraestructuras lineales de transporte en España en 2012. [5]

Modo	Categoría	Número
Aéreo	Aeropuertos comerciales	49
	Puertos del Estado	48
Marítimo	Puertos de las Comunidades Autónomas	364
	Total de puertos	412
Agua	Embalses	1.538
Ferrovioario	Estaciones de ferrocarril	1.548

Tabla 6 – Número de infraestructuras nodales en España en 2012. [5]

La infraestructura más desarrollada a la luz de estos datos parece que son las redes municipales de carreteras, seguidas de las autonómicas y estatales. Esta percepción se confirmará en el apartado de impactos. Sin embargo, el desarrollo reciente más espectacular es el vinculado a la red de ferrocarriles para alta velocidad. Por tanto, la red de carreteras es la más grande pero, aunque crecen las carreteras de gran capacidad, no se puede afirmar lo mismo del resto de carreteras. Parece lógico que el desarrollo de carreteras en territorio urbano esté limitado y en la mayoría de los casos esté ya en su máximo desarrollo.

	1992	2007	2012
Carreteras de gran capacidad	7.324	14.689	16.335
Ferrocarril de alta velocidad	478	1.511	2.144
Metro	191,3	536,2	583,8
Tranvía	0	127,5	174,1
Gaseoducto	3.866	7.665	9.680
Electricidad alta tensión más de 220 kV	28.503	33.894	38.533

Tabla 7 – Evolución 1992-2012 de las infraestructuras de transporte de reciente implantación. Kilómetros. [5]

En cuanto al parque de vehículos tenemos los siguientes datos:

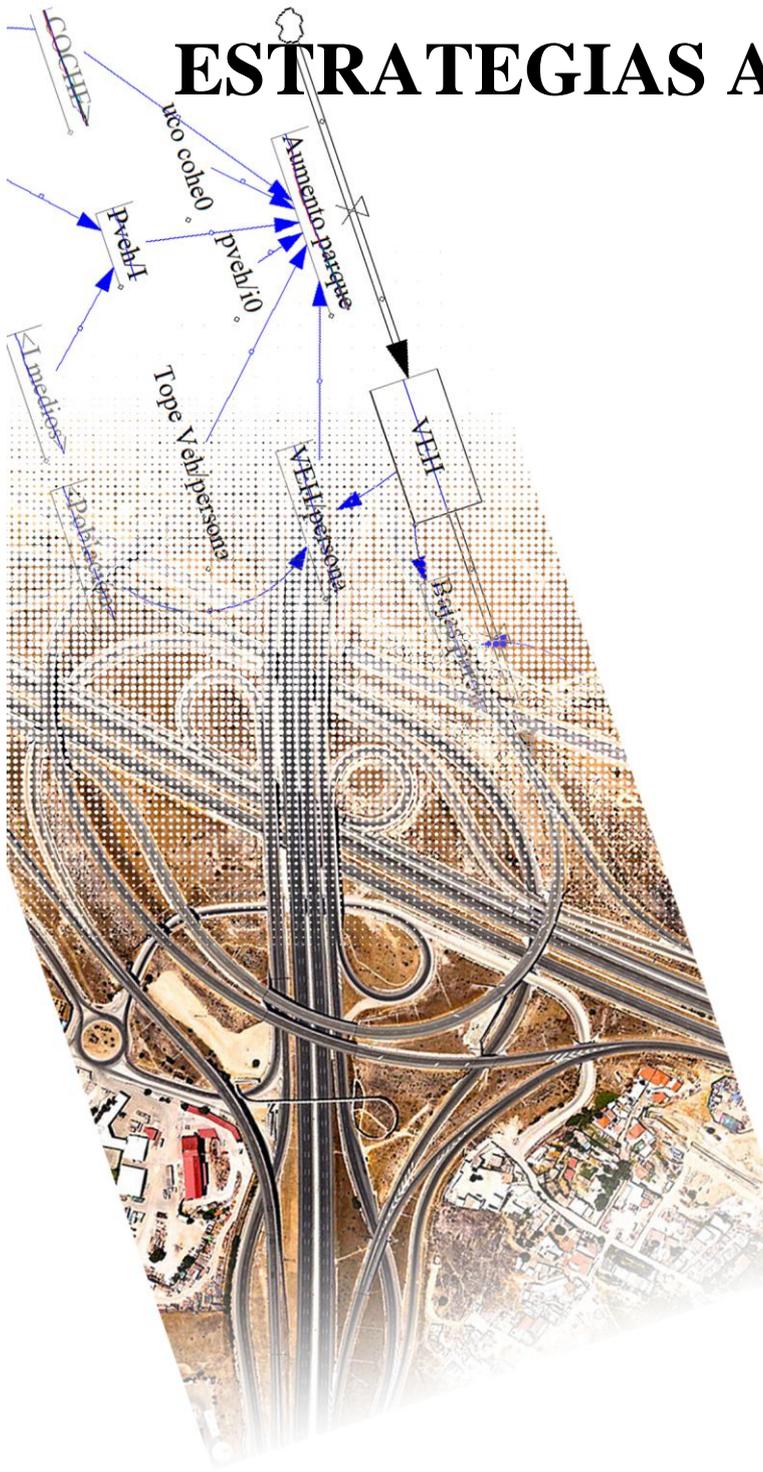
Modo	Medio	Número
Viario	Turismos	22.247.528
	Camiones	2.696.904
	Furgonetas	2.287.818
	Motocicletas	2.852.297
	Cidomotores	2.169.668
	Autobuses	61.127
	Tractores industriales	186.964
	Remolques y semirremolques	410.369
	Otros vehículos	460.196
	Bicicletas	12.599.016
	Total viario motorizado	33.372.871
	Total viario	45.971.887
	Ferroviarios	Trenes
Metropolitanos		3.570
Tranvías		226
Total ferroviario		23.967
Aviones	Transporte aéreo comercial	614
	Otros explotadores	2.307
	Total aviación	2.921
Barcos	Buques	1.230
	Embarcaciones de recreo	220.000
	Total marítimo	221.230
Transporte vertical	Ascensores	750.000
TOTAL		46.970.005

Tabla 8 – Parque de vehículos de distintos modos en España en 2012 [5]

Destaca claramente la cantidad de turismos muy por encima del resto. En 2012 había un parque de 22.247.528 turismos con una población de 46.818.219, lo que indica que por cada persona había 0.47 turismos.

CAPÍTULO 3

IMPACTOS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE Y ESTRATEGIAS AL RESPECTO



a. Importancia

Siguiendo con la misma fuente de datos que en el capítulo anterior, “*Las cuentas ecológicas del transporte en España*” [5], podemos encontrar varios indicadores económicos que señalen la relevancia del sector en la actualidad desde una visión economicista.

En cuanto a los flujos económicos, el transporte viario y todas sus actividades -desde la venta de vehículos al cobro de multas- movieron en 2007 139.217 millones de €, mientras que en 2012 fueron 103.068 millones de €. Otros modos como el ferroviario tuvieron una contribución más modesta, de 9.542 millones de € en 2007 y 8.881 millones de € en 2012 o el aéreo de 15.171 millones de € en 2007 y 11.370 millones de € en 2012.

En total, este sector movió en 2007 unos 179.000 millones de € y en 2012 unos 138.000 millones de €. Esto significa respecto al PIB un 17% en 2007 y un 13.41% en 2012.

Respecto a la balanza fiscal del Estado, la importancia del sector también es muy relevante. Tomando los datos de estos años, la balanza fiscal de transporte viario supuso unos ingresos de entre 1500 y 3000 millones de €. Esto se debe especialmente a la recaudación vía impuestos a hidrocarburos. Los otros modos tienen balanzas fiscales negativas para el estado, como se resumen en la siguiente tabla:

	2007	2012
Ferrocarril	-8.030	-6.850
Aéreo	-3.300	-1.850
Marítimo	-1.630	-480
TOTAL	-12.960	-9.180

Tabla 9 – balance fiscal de los modos ferroviario, aéreo y marítimo. Millones de euros. [5]

Vemos que las sumas que se mueven en torno al sector, tanto las cifras de movimiento como las de las balanzas fiscales son muy elevadas y sobretodo, significativas dentro del conjunto de la macroeconomía y de las cuentas del estado.

Por otro lado hay que destacar el carácter central del transporte hoy en día, que como se ha indicado en el apartado 2.b. ha sido fundamental en el desarrollo industrial y aún hoy lo es. Sin embargo no hay estudios que cuantifiquen con precisión en la actualidad cómo de “dependiente” es toda la actividad económica respecto del transporte, debido a la compleja relación existente entre sectores económicos y en particular la que existe entre el sector del transporte y el resto de sectores.

b. Impactos

En este apartado se van a estudiar los impactos del sector tanto en la esfera ambiental como en la social. Los impactos se refieren al conjunto de afecciones que la actividad del sistema del transporte tiene sobre distintos aspectos naturales y sociales.

1. Impactos ambientales

En cuanto a los impactos ambientales, el siguiente cuadro resume las principales afecciones y en qué fase del ciclo del transporte se producen.

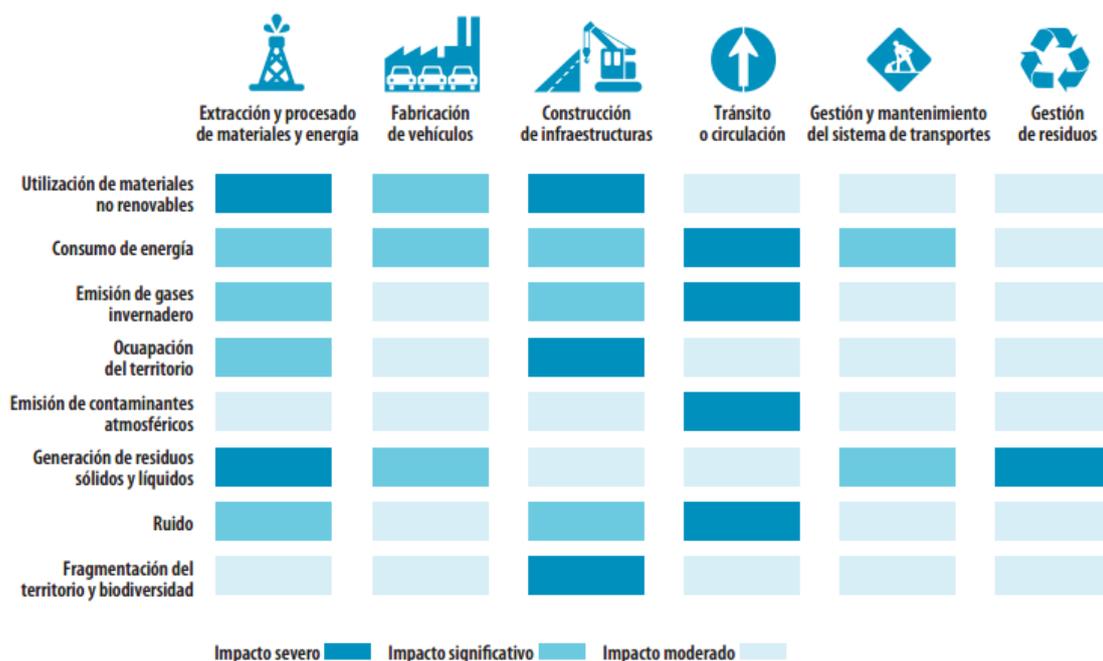


Figura 9 – Cuadro de impactos ambientales de las diferentes fases del ciclo del transporte. [5]

Los impactos más severos por la urgencia de los problemas que plantean sin duda son los vinculados a las emisiones de gases de efecto invernadero. El sector se responsabiliza de la emisión de 141,5 millones de toneladas de CO₂ equivalente que se reparten de la siguiente manera entre modos y fases:

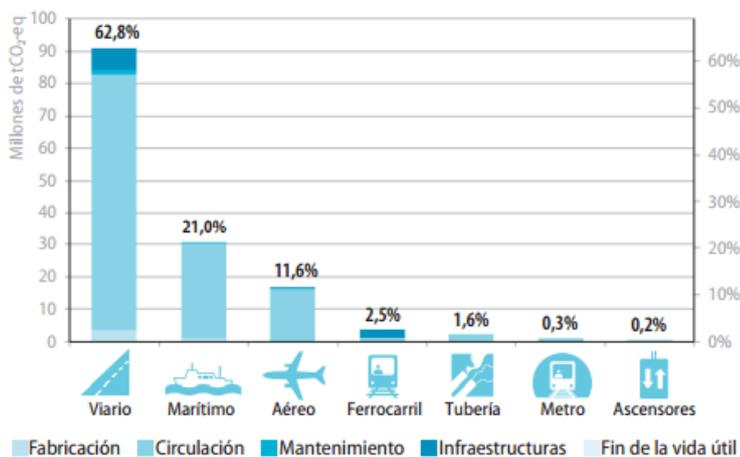


Figura 10 – Emisiones de GEI del sistema de transportes en España. tCO₂-eq. 2012. [5]

Lógicamente, al ser el transporte viario el más utilizado y a la vez el menos eficiente, es el que mayor contribución tiene a este volumen de emisiones. Cabe recordar aquí que la metodología empleada en el estudio no es la misma que, por ejemplo, la usada por las instituciones, que cifran el volumen de emisiones de gases GEI para el transporte en 83 millones de toneladas equivalente de CO₂. La diferencia se encuentra en los modos considerados, las fases del ciclo de vida incluidas así como la internalización de la parte correspondiente de los trayectos internacionales.

Otros aspectos, como la emisión de contaminantes o la ocupación de suelo también tienen su reflejo en el estudio. Como se observa en las siguientes tablas.

	hectáreas	%
Viario (infraestructuras lineales únicamente)	659.200	93,1
Aeropuertos	18.022	2,5
Ferrovionario (infraestructuras lineales únicamente)	15.433	2,2
Puertos	9.606	1,4
Tubería energética	5.769	0,8
TOTAL	708.030	100,0

Tabla 10 – Suelo vinculado a las infraestructuras de desplazamiento en España en 2012. [5]

	Valor de referencia de la UE	Porcentaje expuesto (mínimo y máximo en el periodo de referencia)
NO ₂	Año (40 µg/m ³)	0-36
PM ₁₀	Día (50 µg/m ³)	3-20
O ₃	8 horas (120 µg/m ³)	5-38

Tabla 11 – Población urbana afectada por concentraciones de contaminantes por encima de los objetivos de calidad de la UE (2009-2011) [5]

2. Impactos sociales

Se incluyen en esta categoría los distintos impactos que la actividad del sector tiene entre la población, tales como el empleo, los accidentes o el tiempo dedicado. Siguiendo una metodología similar a la de los impactos ambientales, se presenta un resumen inicial de afecciones:

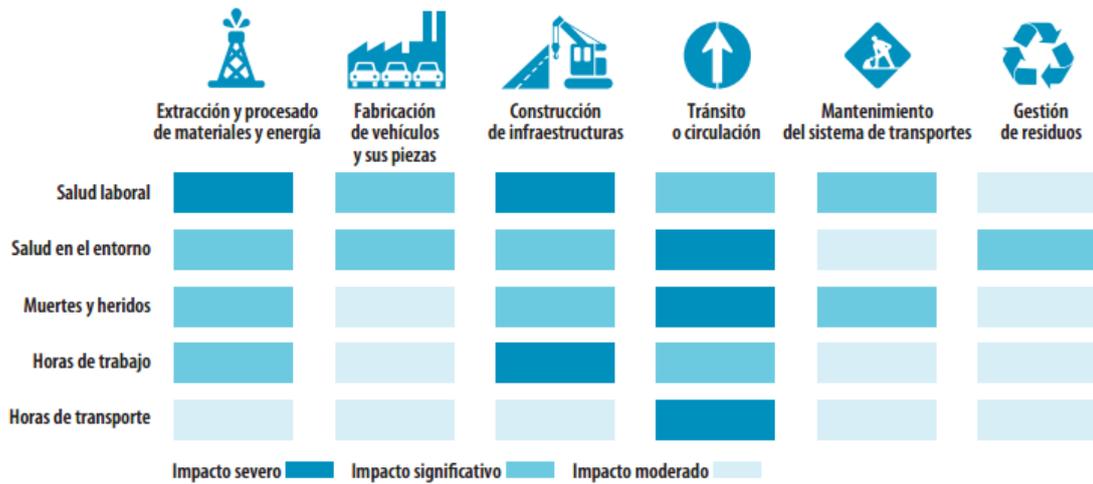


Figura 11 – Cuadro de impactos sociales de las diferentes fases del ciclo del transporte. [5]

De este aspecto, sin duda, el efecto más importante es la mortalidad vinculada al transporte, cuya evolución es positiva.

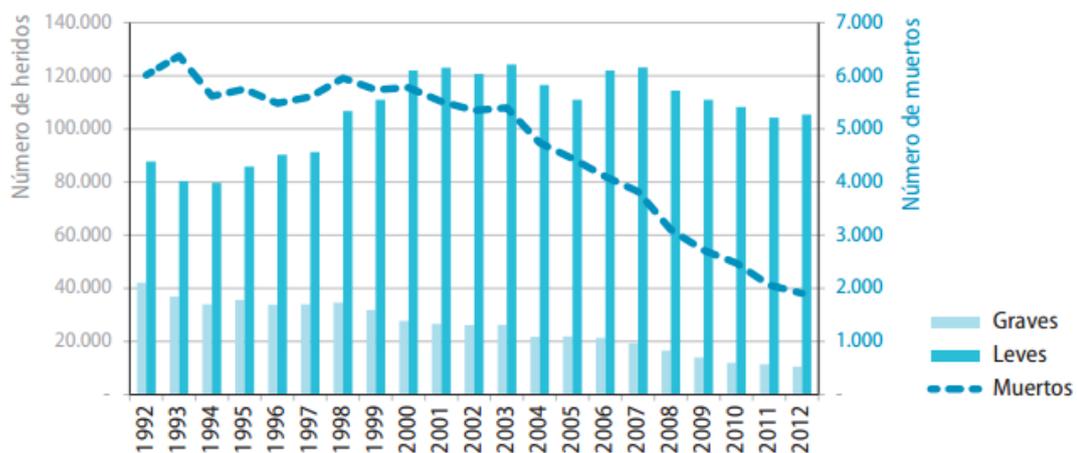


Figura 12 – Evolución de las víctimas de accidentes registradas por las FSE (1992-2012) [5]

Sin embargo, aunque la mortalidad ha disminuido muy notablemente a partir de 2003, los heridos en accidentes de tráfico siguen una curva similar a la de la producción, lo que da a entender que aunque los accidentes ahora son de menor impacto, se producen con la misma probabilidad. Por otro lado, como se indica en el informe, estas cifras son blanco de un fuerte debate sobre su rigor, dado que los accidentes registrados por las FSE son menos de los ocurridos entre otras causas. Por ello, en el estudio cita fuentes de seguros que estiman en 3 veces superior la cantidad de heridos en accidentes de tráfico.

La accidentalidad de los otros modos es mucho más limitada.

En cuanto a otros impactos sociales del sector, se contempla el impacto sobre el empleo, dado que se estima en un 9,5% del total de asalariados los que se dedican a tareas vinculadas al sector, 1.648.756 personas en 2012.

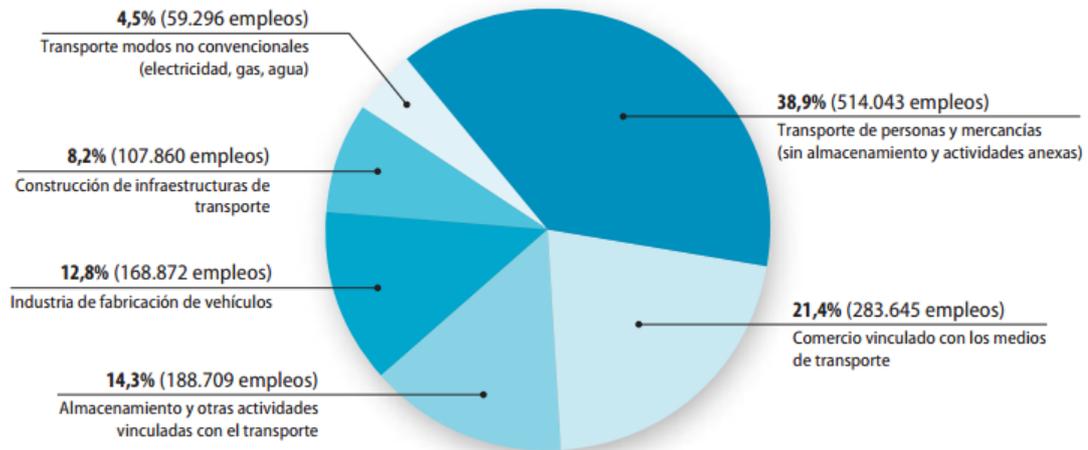


Figura 13 – Distribución de los empleos en el sector del transporte según fases y modos. 2012. [5]

c. Estrategias y medidas institucionales

En vista de los principales problemas derivados del sistema de transporte, las instituciones llevan planteando en las últimas décadas planes y estrategias para mitigarlos o eliminarlos.

1. Estado Español

Para entender el recorrido actual de las políticas públicas de transporte españolas el principal documento de referencia es el “*Plan Estratégico de Infraestructuras y Transportes*” (PEIT) de 2005. Es el principal documento porque es el que ha marcado las políticas públicas que se han llevado a cabo en los últimos años, condicionando todas las demás, como se reconoce en la “*Estrategia Española de Movilidad Sostenible*” (EEMS) de 2009, la normativa más reciente que abarca todos los aspectos del sector.

En los últimos años además de la EEMS han aparecido otras normativas que afectan al transporte:

- “*Estrategia Española de Sostenibilidad Urbana y Local*” (2011) que afecta al planeamiento urbano, fuera de las competencias directas del Estado central.
- “*Estrategia para la Economía Sostenible*” (2009) que se recoge en la Ley de Economía Sostenible y que apuesta por un crecimiento económico que incluye un reparto modal con más peso de los modos no motorizados.

- “Estrategia de Seguridad Vial 2011-2020” que se recoge en las modificaciones de la Ley sobre Tráfico, Circulación de vehículos a Motor y Seguridad Vial hechas en 2014.
- “Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera 2013-2016” en la que se recogen diferentes medidas de varios sectores para mitigar la contaminación y las emisiones de GEI. En este plan se incluyen medidas que actúan sobre la información, la concienciación, la administración, los programas de I+D+i y la fiscalidad.

La EEMS [37] se sitúa en un contexto en el que según su propio análisis se da la siguiente situación:

- Gran aumento de la demanda que ha producido congestión
- Desequilibrio entre modos hacia el modo viario
- Declive del ferrocarril
- Desigual nivel de acceso por territorios a la red
- Nuevos requerimientos de calidad que obligan a replantear el mantenimiento
- Débil integración entre modos de transporte que deriva en poca intermodalidad
- Aislamiento respecto países vecinos
- Aumento de los desplazamientos urbanos por el desarrollo urbanístico
- Aumento del coste en externalidades: emisiones GEI, contaminación (NO₂, PM₁₀), ruido, congestión y accidentes.
- Fuerte actividad del turismo en territorios muy concretos
- Fragmentación de hábitats naturales
- Ocupación del espacio urbano por infraestructuras de transporte superior al 50%
- Pérdida de carácter socializador del espacio público
- Pérdida de autonomía y movilidad de determinados colectivos (infancia, ancianos, personas de movilidad reducida)

Ante este panorama las propuestas se basan en un marco normativo derivado de la Unión Europea y en los antecedentes de la legislación española, separados por temáticas.

En territorio urbano, el marco sobre el que trabaja la EEMS es la “Estrategia Española de Desarrollo Sostenible” (EEDS) de 2007. Las áreas prioritarias de la EEDS eran 7:

- Cambio climático y energías limpias
- Transporte Sostenible
- Producción y consumo sostenibles
- Retos de la salud pública
- Gestión de recursos naturales
- Inclusión social, demografía y migración
- Lucha contra la pobreza mundial

Tanto en el apartado de cambio climático y energías limpias como en el de transporte sostenible se marcaban pautas que afectaban al desarrollo de la posterior EEMS. Estas pautas abarcaban aspectos del transporte (impulsar modos limpios de transporte, combustibles alternativos, mayores eficiencias), de urbanismo y planificación y de coordinación con los municipios para impulsar el transporte público.

Las medidas recogidas en la EEMS se dividen en 5 campos de actuación y se listan a continuación.

1. Territorio, planificación del transporte y sus infraestructuras
 - a. Territorio
 - i. Potenciar el urbanismo de proximidad
 - ii. Vincular la planificación urbanística con la oferta de transporte público y no motorizado
 - iii. Plataformas logísticas para promover la intermodalidad
 - iv. Optimizar el uso de las infraestructuras existentes
 - v. Promover la permeabilización de las infraestructuras para la fauna
 - b. Planificación del transporte y sus infraestructuras: ámbito interurbano
 - i. Itinerarios ferroviarios preferentes para mercancías
 - ii. Red ferroviaria de altas prestaciones (AVE)
 - iii. Nuevas terminales ferroviarias de mercancías
 - iv. Autopistas del mar y transporte marítimo de corta distancia
 - v. Ajustar los sistemas de transporte a las demanda de zonas con baja densidad de población, rurales e insulares
 - c. Planificación del transporte y sus infraestructuras: ámbito urbano y metropolitano
 - i. Estudio de evaluación de la movilidad generada
 - ii. Implantar planes de movilidad sostenible
 - iii. Cercanías ferroviarias
 - iv. Conexión entre transporte público y terminales de otros modos
 - v. Plataformas reservadas a transporte público y alta ocupación
 - vi. Promover modos no motorizados
 - vii. Planes de movilidad urbana, para empresas, para polígonos, para centros educativos, comerciales y de ocio.
 - viii. Adecuación de las vías de acceso
 - d. Planificación del transporte y sus infraestructuras: elementos comunes
 - i. Sistemas inteligentes
 - ii. Administración electrónica, teletrabajo o comercio electrónico
2. Cambio climático y dependencia energética
 - a. Priorizar el transporte público
 - b. Mejorar y aumentar la eficiencia del transporte público
 - c. Medidas operacionales para el transporte aéreo
 - d. Vehículos limpios y eficientes

- e. Nuevas tecnologías en tracción, motores y combustibles
 - f. Biocarburantes
 - g. Promoción de la conducción eficiente
 - h. Etiquetado energético
3. Calidad del aire y ruido
- a. Áreas de limitación de velocidad para vehículos
 - b. Zonas de bajas emisiones para ciudades
 - c. Diseño de mapas de ruido
 - d. Planes de acción para reducir el ruido ambiental
4. Seguridad y salud
- a. Mejora en la seguridad vial
 - b. Mejora la seguridad ferroviaria
 - c. Mejora en la seguridad marítima
 - d. Mejora en la seguridad en aeropuertos y aviación civil
 - e. Mejor en la seguridad común
 - f. Mejora de la accesibilidad para personas con movilidad reducida
5. Gestión de la demanda
- a. Aparcamientos disuasorios e incentivos para el uso del transporte público
 - b. Medidas coercitivas para la mejora de la sostenibilidad
 - c. Promoción de medidas económicas para incentivar el uso de transporte público
 - d. Fiscalidad favorable a comportamientos sostenibles a nivel UE
 - e. Fiscalidad favorable sobre vehículos y carburantes sostenibles a nivel UE
 - f. Coche multiusuario y coche compartido
 - g. Informar y sensibilizar

Como se ha indicado antes, la EEMS viene fuertemente condicionada por el desarrollo del PEIT. El PEIT marcó las políticas en cuanto a infraestructuras y actualmente ha sido sustituido por el PITVI. El PEIT ha sido el marco de políticas públicas que mayor impacto ha tenido en el sistema de transporte.

El plan no es el inicio del desarrollo explosivo de determinadas infraestructuras de transporte, que viene anteriormente del “*Plan Director de Infraestructuras*” (PID) de 1993 a 2007 y el “*Plan de Infraestructuras*” (PIT) de 2000 a 2007.

Efectivamente, las políticas públicas en el Reino de España vinculadas al sector del transporte han ido dirigidas principalmente a la expansión de las infraestructuras, en paralelo al proceso de liberalización del sector (Iberia, AENA, Renfe...). Esta apuesta por las infraestructuras se fundamenta en la teoría de que, como se explica en la justificación y los objetivos del PEIT, una mayor extensión de las redes de transporte permite una mayor movilidad además de ser un motor económico. [51]

Los objetivos del PEIT se resumen en:

- Mejorar la eficiencia del sistema de transporte:
- Fortalecer la cohesión social y territorial
- Contribuir a la sostenibilidad general del sistema
- Impulsar el desarrollo económico y la competitividad

Para el PEIT lo prioritario es desarrollar las redes de infraestructuras en una primera fase 2005-2008 para después, durante la fase 2009-2013 mejorar el reparto modal y así tener hasta 2020 para cumplir los objetivos medioambientales.

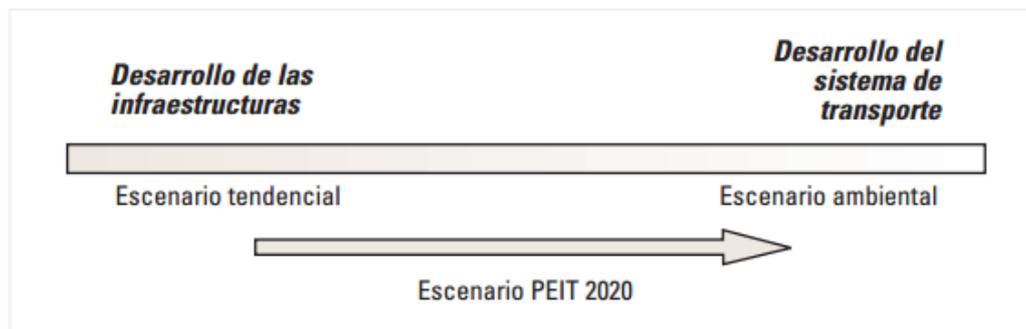


Figura 14 – Esquema de prioridades de los escenarios alternativos en el PEIT [51]

En el marco de este plan se ha dado la gran expansión de las infraestructuras del transporte, acompañada por otras iniciativas de las comunidades autónomas y de la unión europea. En el caso de las comunidades autónomas cada una ha tenido un desarrollo más o menos ambicioso. La Junta de Castilla y León ha aprobado en el marco del Plan Regional de carreteras 2008-2020 una expansión de 83 km en carreteras, dedicando casi todo el esfuerzo en la conservación y mejora de la red existente, interviniendo e 12094 km. [52]

Más recientemente y ahora en vigencia está el “Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda” (PITVI) 2012-2024. [53] En el PITVI se constata que aunque la inversión en infraestructuras ha sido abundante, el desequilibrio territorial y la cobertura de necesidades de movilidad ha sido limitada a la vez que las redes de infraestructuras están infrautilizadas.



Figura 15 – Vías de gran capacidad de la RCE en 2102. [53]



Figura 16 – Red ferroviaria de altas prestaciones en 2012. [53]

El PITVI es más amplio que los anteriores planes, más limitados a las infraestructuras. Incluye propuestas y estrategias para el transporte urbano, del que hace una breve

descripción y concluye que no es necesario realizar grandes inversiones, sino mantener las existentes.

Entre los objetivos del PITVI destaca la apuesta por la intermodalidad a la vez que por la promoción de una movilidad sostenible.



Figura 16 – Objetivos y principios del PITVI [53]

Los objetivos en cuanto a carreteras de alta capacidad y ferrocarriles de altas prestaciones se resumen en los siguientes gráficos, en los que se incluyen también los objetivos de la Red Transeuropea de Transporte (RTE-T). En líneas generales son una continuación de los objetivos del plan anterior, el PEIT. La principal modificación es la estrategia de implantación, en la que se quiere dar mucho más peso a la participación privada en todas las fases del desarrollo del plan, especialmente en la financiación, hasta ahora eminentemente pública.



Figura 17 – Red de carreteras de gran capacidad de la RCE prevista en el PITVI [53]



Figura 18 – Red ferroviaria de altas prestaciones prevista en el PITVI [53]

2. Unión Europea

La institución que desarrolla los planes estratégicos en este sentido es la Comisión Europea, que desarrolla hojas de ruta a seguir por todos los estados miembros de la Unión. La Unión Europea, en líneas generales persigue 2 objetivos fundamentales: la homogeneidad entre las redes de transporte de los estados miembros y la reducción de emisiones de GEI.

En el *Libro blanco de 2001: “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”* [7] se apuestan por 3 campos principales para promover un mercado común del transporte acorde con los objetivos de la CE.

Los 3 campos son:

- Equilibrar el reparto modal en toda Europa para garantizar la movilidad
- Reducir la congestión y los impactos ambientales
- Orientar la política de transportes hacia la ciudadanía: más seguridad, más calidad y más protección.

Para ello se detallan 60 medidas que proponen a los estados miembros. Las medidas se agrupan en torno a los siguientes objetivos:

1. Desarrollo y ordenación de los medios existentes:
 - a. Creación del cielo único europeo
 - b. Mayor competencia en el transporte ferroviario
 - c. Marco claro para la competencia en el transporte público
 - d. Mejores condiciones para la competencia entre puertos
 - e. Programas de cambio modal
 - f. Crear plataformas logísticas
 - g. Internalización de costes externos
2. Protección de la movilidad de los ciudadanos
 - a. Mejorar la seguridad aérea
 - b. Normativas de conducción y descanso
 - c. Tacógrafos digitales
 - d. Desarrollo del libro verde del transporte urbano
3. Mejores sistemas de transporte mediante innovación:
 - a. Aprovechamiento de la navegación por satélite (Galileo, ERMTS y SESAR)
 - b. Estrategia logística para mercancías

Estas directrices dependen de la Dirección general de Transporte y Energía y se complementan con otros desarrollos que dependen de la Dirección General de Medio Ambiente y que tiene como ejes prioritarios:

1. Integrar la evaluación ambiental a todos los procesos de planificación pública
2. Reducción de emisiones GEI y la dependencia del petróleo
3. Mejorar el medio urbano y la calidad del aire
4. Competitividad, I+D y política industrial de vehículos limpios y eficientes

En el campo especialmente sensible del consumo energético del sector y, vinculado a este, su volumen de emisiones de GEI, este Libro Blanco apuesta “profundizar los procesos de liberalización del transporte-para hacer llegar al usuario la señal de los precios-, el

establecimiento de mecanismos que aseguren que estos precios reflejan los costes reales y la promoción del ahorro energético”[6]. Esta línea, acorde con los principios y las políticas hegemónicas en la Unión Europea, se ve recogida también en otros documentos oficiales como el Libro Verde de 2005 sobre la eficiencia en el uso final de la energía y servicios energéticos.

Una década después de este Libro Blanco se lanza la estrategia 2020, por la que los estados miembros se comprometen a reducir para 2020 un 20% sus emisiones de GEI, aumentar un 20% la contribución de las energías llamadas renovables a la combinación energética de la UE y lograr como objetivo el 20% de la eficiencia energética. La mayor apuesta se realiza de cara a la reducción de emisión de GEI, puesto que para 2050 el Consejo Europeo ha aprobado reducir entre un 80% y un 90% las emisiones de GEI, para conseguir el objetivo de evitar una subida mayor de 2°C de cambio climático. Para ese fin el documento de 2011 “*Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica en 2050*” [3] marca los siguientes objetivos recogidos en la tabla y representados en el gráfico.

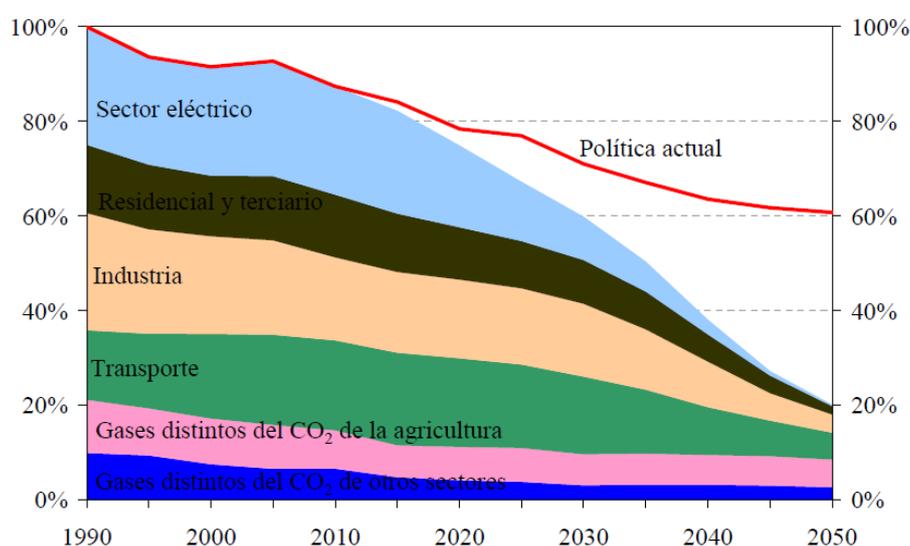


Figura 19 – Emisiones de GEI en la UE desde 1990 y proyecciones hasta 2050 según la política de emisiones. 100% = emisiones GEI 1990. [3]

Reducciones de GEI respecto a 1990	2005	2030	2050
Total	- 7 %	- 40 a - 44 %	- 79 a - 82 %
Sectores			
Electricidad (CO ₂)	- 7 %	- 54 a - 68%	- 93 a - 99 %
Industria (CO ₂)	- 20%	- 34 a - 40 %	- 83 a - 87 %
Transporte (incluida la aviación, excluido el transporte marítimo) (CO ₂)	+ 30%	+ 20 a - 9 %	- 54 a - 67 %
Residencial y servicios (CO ₂)	- 12%	- 37 a - 53 %	- 88 a - 91 %
Agricultura (distintas de las de CO ₂)	- 20%	- 36 a - 37 %	- 42 a - 49 %
Otras emisiones distintas de las de CO ₂	- 30%	- 72 a - 73 %	- 70 a - 78 %

Tabla 12 – Reducciones sectoriales entre 2005, 2030 y 2050 para toda la UE. [3]

En concreto para el sector del transporte apuesta por un sistema europeo de transporte más eficiente y sostenible por 3 vías, que se desarrollan en profundidad en el *Libro Blanco de 2011: “Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible”*. Las 3 vías son:

- La eficiencia en los vehículos mediante nuevos motores, materiales y diseño
- El recurso a una energía más limpia mediante nuevos combustibles y sistemas de propulsión
- Una mejor utilización de las redes y un funcionamiento más seguro mediante sistemas de información y comunicación

En este caso las propuestas lanzadas por el Libro Blanco pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Apuesta por la multimodalidad en cada recorrido
- Integración de tecnologías de la información
- Mejorar la eficiencia de vehículos, especialmente camiones y del transporte urbano
- Internalizar los costes en los usuarios, para evitar distorsiones de mercado
- Unificar el espacio europeo del ferrocarril y aéreo
- Estrategia europea de investigación
- Estudiar pautas alternativas de movilidad urbana desde la multidisciplinaridad
- Empleo de calidad
- Seguridad en el transporte: objetivo cero muertes en carretera para 2050

La diferencia más significativa en la estrategia europea con respecto al sector que atañe a este estudio es el cambio de la apuesta decidida de hace una década por un mejor reparto modal hacia modos más eficientes, hacía una integración de los modos más eficientes en rutas multimodales, coordinadas con tecnologías de la información, de forma que el mejor reparto modal se produzca por utilizar los medios más eficientes para los trayectos más largos o intensivos.

3. Nivel global

A nivel global, por contemplar qué tendencia se puede esperar de las instituciones en el futuro, destacan los estudios del Banco Mundial [38]. En ellos se apunta principalmente hacia la relación entre uso del suelo y transporte como factor determinante en las políticas de transporte.

Intentar promover políticas a nivel global en el campo del transporte es muy complejo por la gran diversidad de tradiciones y modelos de desarrollo territorial urbano y rural. También por la enorme diferencia en la penetración de los medios motorizados en las distintas sociedades, vinculada a las enormes diferencias en los desarrollos industriales. Por ello los estudios, como este caso el del Banco Mundial, intentan señalar los lugares comunes entre urbanismo, planificación y desarrollo del sistema de transporte, para que las pautas sean válidas tanto para los territorios poco afectados por el desarrollismo como para los que tienen ya hondos afecciones.

Haciendo una revisión de los distintos modelos de ciudad y por tanto de urbanización, concluyen una serie de implicaciones que hay sobre la movilidad y la intensidad energética de cada modelo de ciudad.

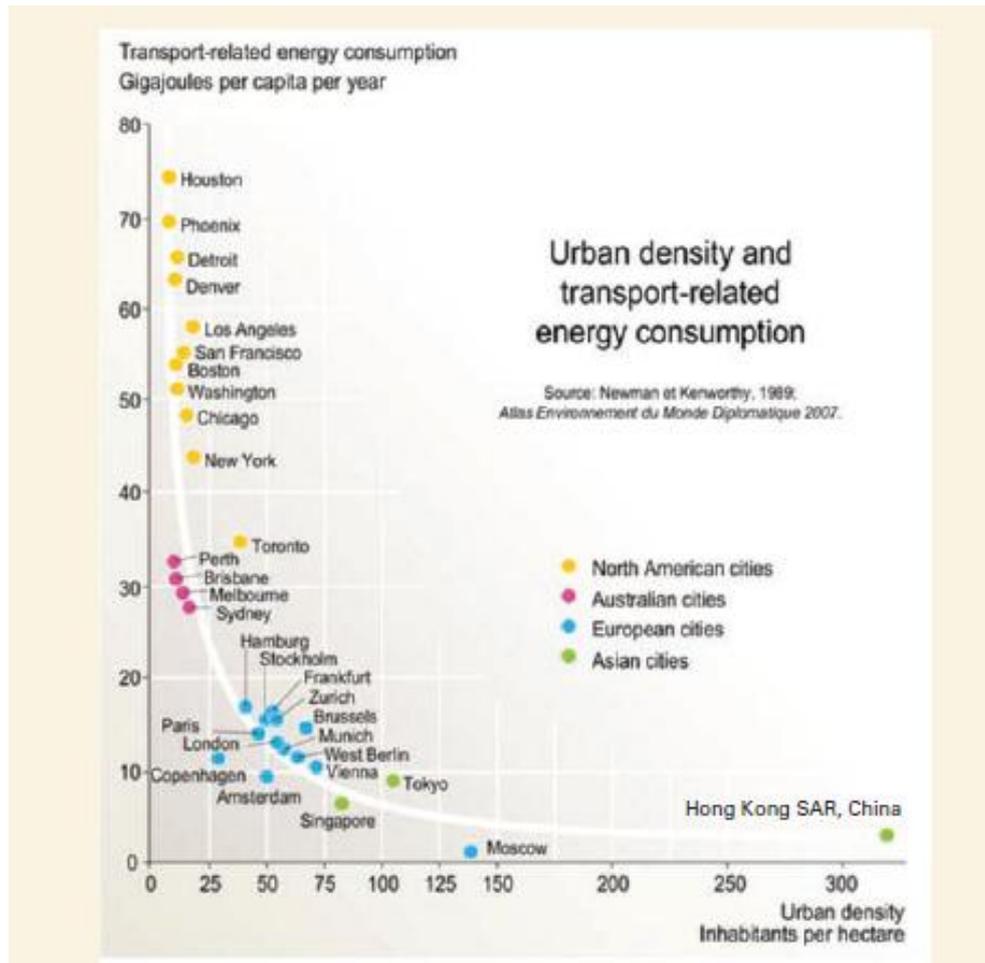


Figura 20 – Densidad de población relacionada con el consumo de energía de algunas ciudades. [38]

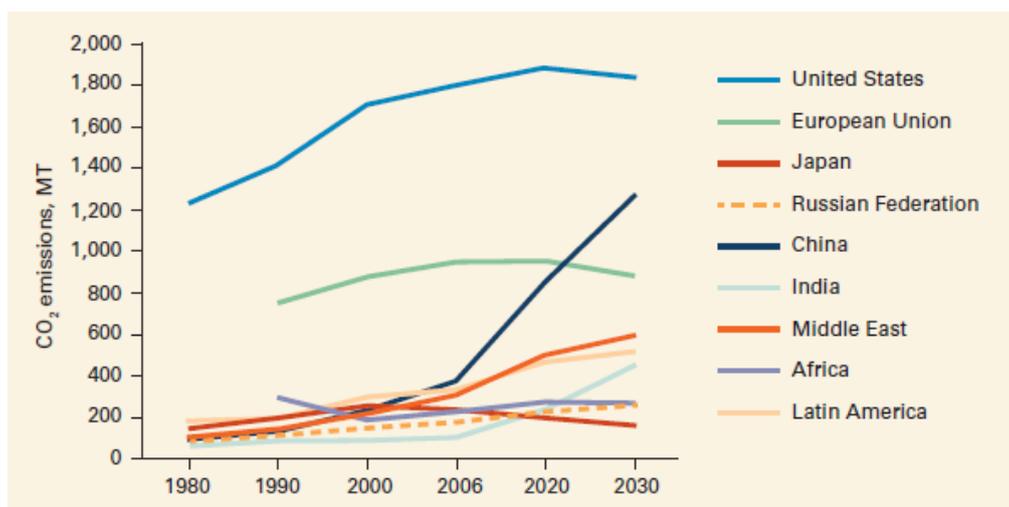
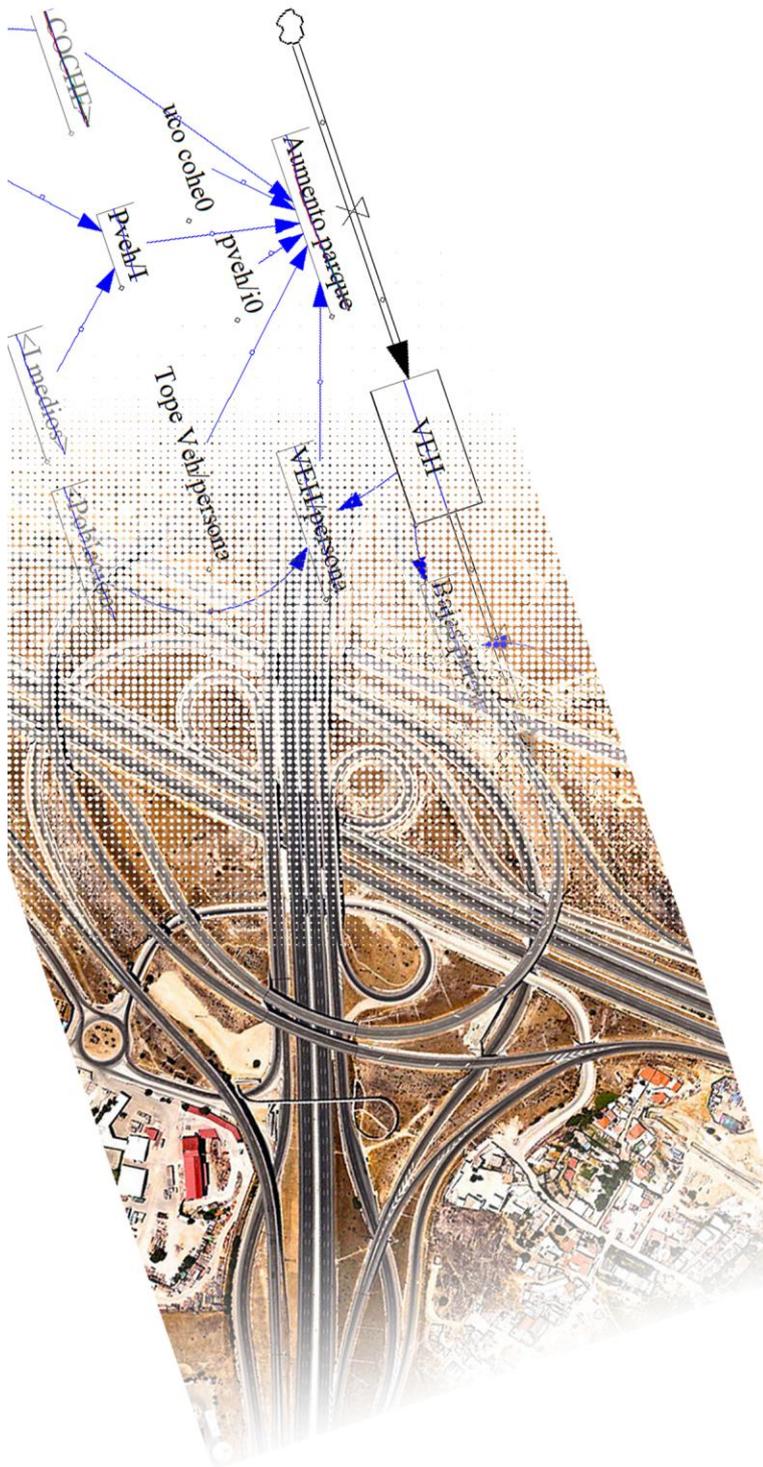


Figura 21 – Proyecciones de emisiones de GEI del sector transporte. [38]

Así, tras un estudio mundial de estrategias llevadas a cabo en distintas ciudades de distintos continentes y por tanto, de distintas culturas, se llega a una serie de propuestas de transformación parcial o completa de las áreas urbanas según sus características previas.

CAPÍTULO 4

DINÁMICA DE SISTEMAS



a. Introducción y desarrollo del método

Por Dinámica de Sistemas se conoce al método de estudio del comportamiento de los sistemas mediante la construcción de modelos informáticos en el que se pongan de manifiesto las relaciones entre la estructura del sistema y su comportamiento. [1]

Para entender la necesidad y la utilidad de la Dinámica de Sistemas hay que definir qué se entiende por sistema, dinámica y modelo:

- **Sistema:** objeto conceptual formado por diferentes partes relacionadas entre sí y cuya unidad entre partes y relaciones forman el sistema. Casi todo se puede conceptualizar como sistema, de distintas formas y además, casi todos los aspectos de la realidad se pueden conceptualizar como partes de otros sistemas. Por ello, para evitar caer en un pensamiento de los sistemas etéreo en la que todo se relaciona con todo, los sistemas se suelen acotar, eliminando algunas de las relaciones endógenas o exógenas del modelo bajo hipótesis fundamentadas que definirán la solidez del modelo.
- **Dinámica:** se entiende por dinámico aquello que se diferencia de lo estático. Por lo general, la dinámica tiene una vinculación esencial con el tiempo, puesto que caracteriza a un sistema que evoluciona con el tiempo. Cuando esto ocurre, se atribuye al sistema la característica de dinámico.
- **Modelo:** por modelo se define al objeto que sirve para representar a otro objeto y para facilitar la comprensión del objeto representado. Un modelo es un instrumento, tiene una función concreta para resolver un problema y por lo tanto, un modelo no puede tomarse como una realidad, sino como una representación de esta con sus limitaciones. Los modelos además pueden clasificarse de dos maneras: modelos de predicción y modelos de gestión. Los primeros son modelos que aspiran a representar fielmente la realidad de forma que permita suministrar datos acerca del futuro de la realidad. Los segundos modelos tan sólo ofrecen datos sobre alternativas posibles de desarrollo de la realidad.

Vistas estas definiciones queda definir y contextualizar la Dinámica de Sistemas como método para elaborar modelos de sistemas dinámicos.

El primer origen de la Dinámica de Sistemas se puede encontrar en la década de los 30 del siglo pasado con los primeros avances en teoría de automática, de los servomecanismos. En ellos aparecían retroalimentaciones, que como veremos son uno de los aspectos más interesantes de la Dinámica de Sistemas.

El desarrollo de la computación informática es el principal impulsor del desarrollo de esta técnica. A mediados de los años 50, Jay Forrester desarrolla en el MIT la Dinámica Industrial. Esta técnica se servía de un enfoque sistémico y algunas representaciones estandarizadas para analizar los problemas de las empresas industriales. Los resultados y el desarrollo de este método quedan recogidos en “*Industrial Dynamics*” [54]. El principal avance de J. Forrester es la normalización de los diagramas de Forrester, o de flujos-niveles.

En la siguiente década, el propio J. Forrester empieza a aplicar una metodología análoga al análisis de problemas urbanos, creando la dinámica urbana.

El reconocimiento de la Dinámica de Sistemas como herramienta analítica y de hecho, la asignación del nombre a esa metodología se da a partir de la publicación del primer informe al

Club de Roma, “*World Dynamics*” en 1971. Tras él se publicará el célebre y polémico estudio “*Los límites del crecimiento*” de Donella y Dennis Meadows en 1972. En este estudio, que motivó el informe al Club de Roma, se estudiaba la dinámica mundial de población, economía, industria y contaminación en un solo sistema mediante magnitudes agregadas.

A partir de la difusión de este informe la Dinámica de Sistemas, ya conocida como tal, se empieza a difundir en distintos campos del conocimiento. La organización de empresas, la ecología o la ciencia social se han servido de diferentes modelos hechos mediante dinámica de sistemas para distintos fines, aunque en estos años el modelo de los “*Límites del crecimiento*” sigue siendo el más conocido y del cual se han hecho 2 revisiones, una en 1992 [55] y otra en 2004 [56].

b. Estructura elemental de sistemas

La mayoría de los sistemas comparten algunos componentes en su estructura que hace que sus comportamientos se puedan clasificar y comparar entre sí. Para poder hacer esto es necesario establecer un lenguaje común.

Para ello, antes de realizar un diagrama de Forrester, se debe representar el modelo de manera más elemental, representando que partes forman el sistema y qué relaciones hay entre ellas. Para ello nos servimos de los diagramas causales o de influencias. El Diagrama Causal es un diagrama que recoge los elementos clave del Sistema y las relaciones entre ellos. En él se representan las relaciones entre elementos con grafos orientados, flechas acompañadas del signo de la influencia.

En los diagramas causales se pueden definir las principales estructuras comunes a muchos sistemas dinámicos.

Retroalimentaciones.

Una cadena cerrada de relaciones causales recibe el nombre de bucle, retroalimentación o *feedback*. Estos elementos son centrales en el estudio de sistemas y son lo que da interés a las técnicas de la Dinámica de Sistemas.

Los bucles pueden ser “positivos” o “negativos”. “Positivos” si el número de relaciones negativas es par y “negativos” si es impar. Esta diferenciación fundamental se muestra luego en comportamiento del sistema que contiene un bucle así. La Figura 23 representa el comportamiento de ambos tipos de bucles y el diagrama causal básico de un bucle de cada tipo. [1][2]

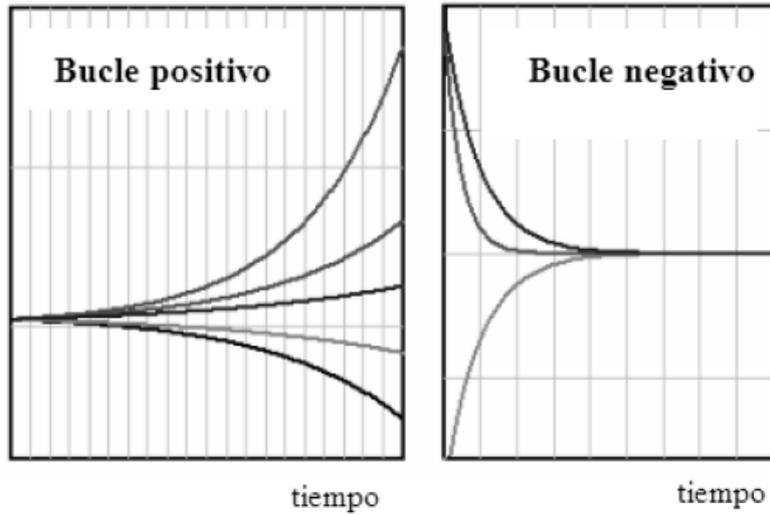


Figura 23 – Desarrollo de un sistema con realimentación positiva y negativa en el tiempo [1]

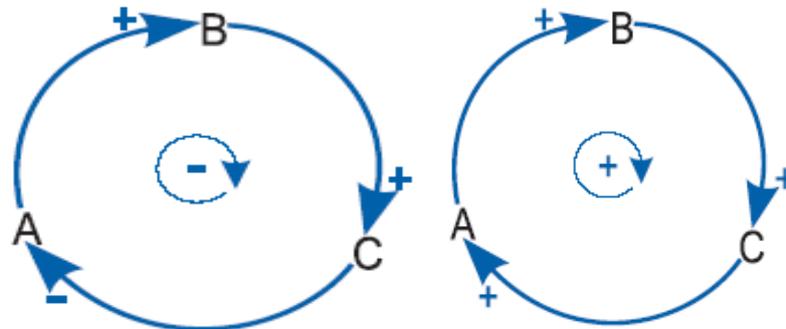


Figura 24 – Diagrama causal de un sistema con realimentación negativa y uno con realimentación positiva. [1]

Retrasos.

En la realidad hay procesos en los que el tiempo no opera igual y las relaciones causales se ven retrasadas por la propia naturaleza de los procesos. En Dinámica de Sistemas este efecto del tiempo se representa mediante retrasos en las relaciones causales. [1]

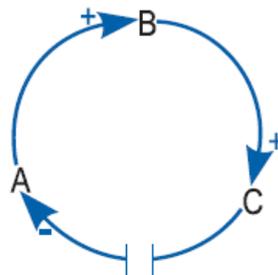


Figura 25 – Diagrama causal de un bucle negativo con retraso. [1]

El elemento limitativo.

El elemento limitativo es aquel elemento del sistema que ahora mismo limita el crecimiento del sistema. Es único en cada momento, pero a lo largo del tiempo diferentes elementos del sistema pueden actuar como elementos limitativos. [2]

Los elementos clave.

Los elementos claves del modelo son aquellos que tienen una gran influencia sobre el comportamiento del modelo. En un sistema puede haber varios elementos clave y no suelen variar a lo largo del tiempo. Normalmente encontrar estos elementos no es sencillo y no es intuitivo y es para lo que la Dinámica de Sistemas es útil mediante análisis de sensibilidad. [2]

c. Paso de la estructura al comportamiento

Para estudiar el comportamiento del sistema es para lo que se hace necesario el lenguaje de los diagramas de Forrester y la simulación informática. Es necesaria la traducción desde el diagrama causal, puramente cualitativo, a una terminología que permite la simulación.

Para ello se siguen 3 pasos: [2]

1. Distinguir las variables más relevantes del modelo, que definen el estado del sistema para cada momento. Serán los niveles.
2. Definir las variables que provocan cambios en los niveles. Serán los flujos.
3. El resto de variables serán variables auxiliares.

Las relaciones entre variables, desde el punto de vista matemático, se representan mediante ecuaciones diferenciales. Si un nivel es X , sus flujos serán de forma dX/dt . El resto de relaciones dependerán de la naturaleza y las hipótesis del modelo.

Por último, la construcción del gráfico diagrama de Forrester se sirve de los siguientes diagramas para cada tipo de elemento: [1]

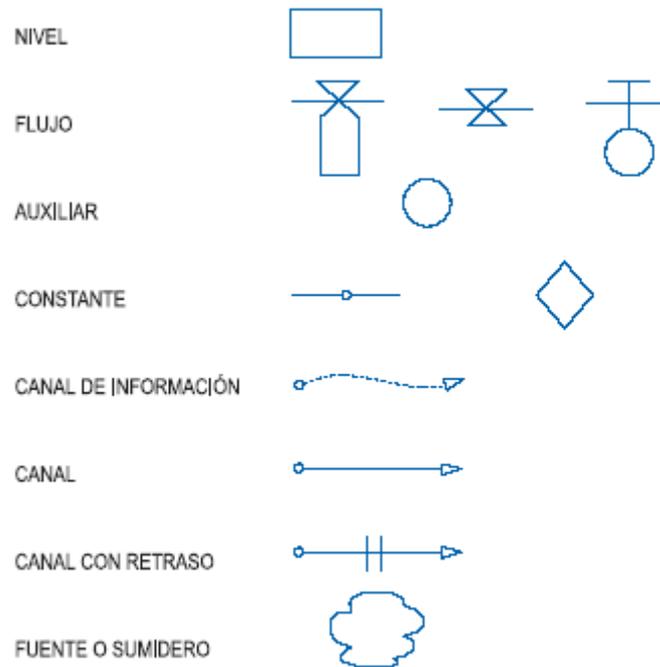


Figura 26 – Elementos de los diagramas de Forrester. [1]

d. Construcción, análisis y explotación de los modelos

La metodología fundamental del desarrollo de modelos analíticos mediante Dinámica de Sistemas sigue los siguientes pasos: [1] [2]

1. Identificación del problema: aunque resulte obvio en la ingeniería, la definición del problema a resolver es algo imprescindible y que debe hacerse con claridad. En la definición del problema entrará definir también las fuentes que aporten conocimiento sobre el problema: teorías, hipótesis, resultados históricos. Toda esa información debe agruparse de forma que permita definir los elementos y relaciones que conformen el sistema a estudiar y que según nuestras hipótesis intervienen en el problema.
2. Identificar los límites del sistema: como se ha indicado antes, para hacer de la Dinámica de Sistemas una herramienta operativa, los modelos deben representar sistemas limitados y simplificados, pero que abarquen todos los factores relevantes del problema que analizamos.
3. Construcción del modelo:
 - a. Conceptualización: adopción de una perspectiva y esbozo de una comprensión del fenómeno a estudiar en base a las hipótesis recogidas y la información disponible.
 - b. Formulación del modelo: representación de elementos intuitivos elaborados en la fase de conceptualización por medio de un lenguaje formal.
 - c. Evaluación del modelo: análisis del modelo pruebas de aceptabilidad.

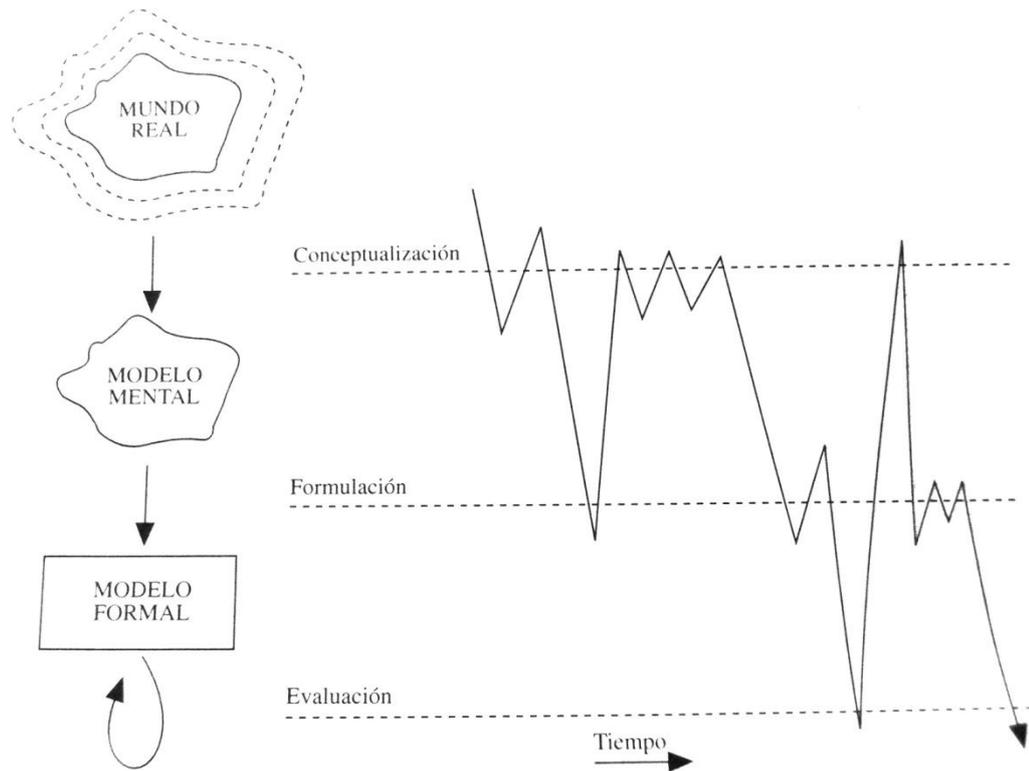


Figura 27 – Fases de la construcción de modelos [1]

El análisis del modelo tiene que abarcar los siguientes aspectos: [2]

- Capacidad para reproducir los datos históricos del sistema modelado bajo condiciones normales y extremas
- Aceptabilidad de las suposiciones hechas para definir el modelo
- La plausibilidad de los valores adoptados por los parámetros

Cuando se considere que el modelo cumple con esos criterios y que por lo tanto puede utilizarse para simular escenarios posibles de desarrollo del sistema con verosimilitud, el último análisis que quedaría por hacer es el que nos revele cuales son los elementos claves del sistema. Para ello se realiza un análisis de sensibilidad.

Si el modelo se ha simulado mediante programas informáticos, lo común es hacer los análisis de sensibilidad mediante simulaciones intensivas frente al método tradicional basado en la linealización de las variables. [1] El análisis de sensibilidad busca medir el impacto que una pequeña variación sobre los valores iniciales (de un 5% o un 10%) tiene sobre los valores finales de la simulación y con especial atención a los cambios de comportamiento que puedan darse.

a. Introducción

Para la elaboración del modelo siguiendo la metodología de la Dinámica de Sistemas es necesario utilizar un software informático que permita la simulación. Las opciones más conocidas y extendidas serían: Stella o ithink, Powersim y Vensim.

Stella es un programa con orígenes en los años 80 diseñado para equipos Mac. Este programa supuso el marco conceptual sobre el que se desarrollan el resto de programas. Stella estaba muy volcado en el entorno gráfico, traduciendo directamente los diagramas en ecuaciones, por lo que está muy orientado a la enseñanza. En paralelo se desarrolló el programa ithink, muy similar a Stella pero de orientación profesional y no tan académica.

Powersim es un programa de origen noruego que amplía las posibilidades de Stella. Es un programa de tipo comercial y por ello se suele emplear en ámbitos empresariales, orientando su uso al análisis de modelos financieros, recursos humanos o gestión de clientes entre otros.

Vensim, el programa que se usa en este proyecto, ofrece unas posibilidades similares a los otros programas. Tiene una mayor portabilidad y aunque es un software privativo ofrece una versión gratuita para uso personal con algunas capacidades limitadas, el Vensim PLE.

b. Espacio de trabajo y herramientas

El espacio de trabajo de Vensim PLE sigue una lógica tradicional en los programas de modelado de circuitos electrónicos, en el que hay un espacio vacío rodeado de paneles de herramientas con las opciones del programa.

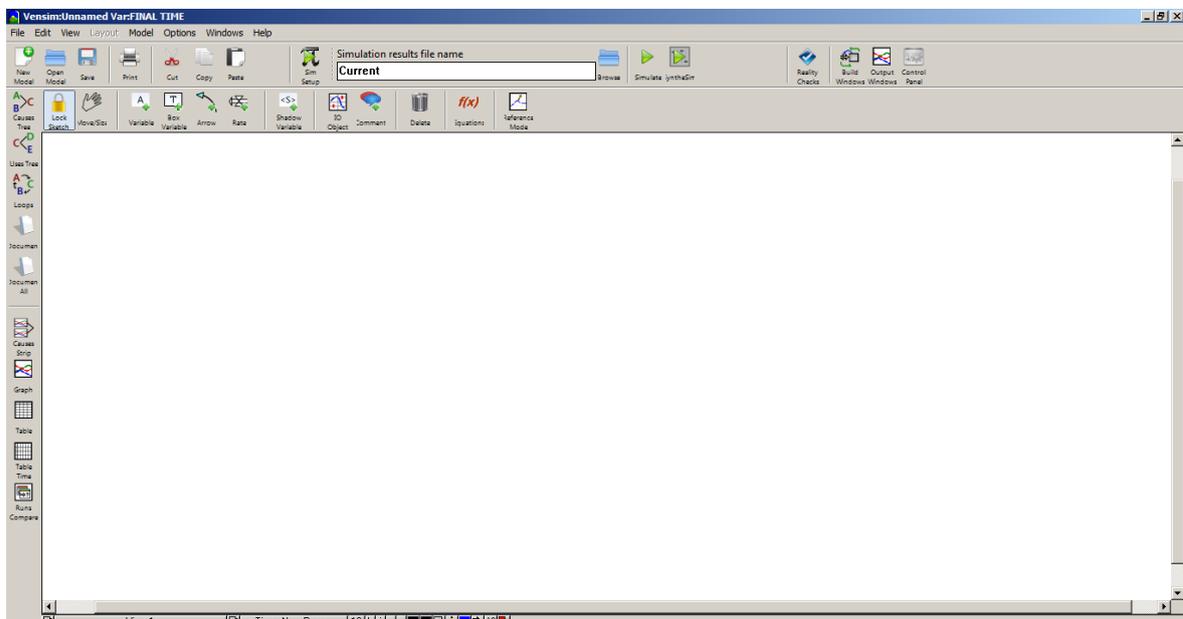


Figura 28 – Espacio de trabajo del VENSIM PLE

La representación de los elementos descritos de los diagramas de Forrester en este entorno es como se representa en la Figura 29.

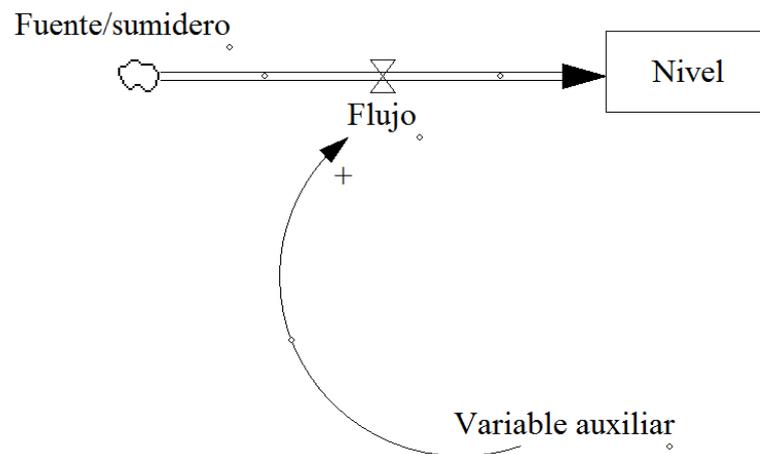


Figura 29 – Elementos de los diagramas de Forrester en VENSIM PLE.

Los elementos representados en esta figura son los elementos básicos de un diagrama de Forrester, incluida un grafo de relación en este caso positivo.

En el espacio de trabajo hay opción a trabajar en distintas vistas, de forma que no todas las variables del modelo tengan que aparecer a la vez, con todas sus relaciones, en el espacio de trabajo. Esta posibilidad es fundamental en los modelos complejos. Junto a esta posibilidad está la de insertar variables “sombra”, que operan como cualquier otra variable pero que pertenecen a otra vista y que, por tanto, pueden situarse tantas veces como sea necesario para simplificar las vistas y de esa forma, facilitar el trabajo sobre el modelo.

También se pueden editar tamaños, colores, tipos de objetos...lo que facilita aún más el trabajo en modelos complejos.

c. Simulación

La simulación en Vensim PLE implica definir los parámetros temporales (inicio, fin e intervalos) y el método de integración. Los métodos de integración contemplados son:

- Método de Euler: más rápido y sencillo
- Diff: utiliza el método de Euler para integrar ecuaciones en diferencias.
- RK 4 auto: usa un método Runge-Kutta de cuarto orden con ajuste automático de paso
- RK 4 fixed: del mismo tipo que el anterior con paso fijo
- RK 2 auto: usa un método Runge-Kutta de segundo orden con ajuste automático de paso
- RK 2 fixed: como el anterior con paso fijo

La interfaz es de la siguiente manera:

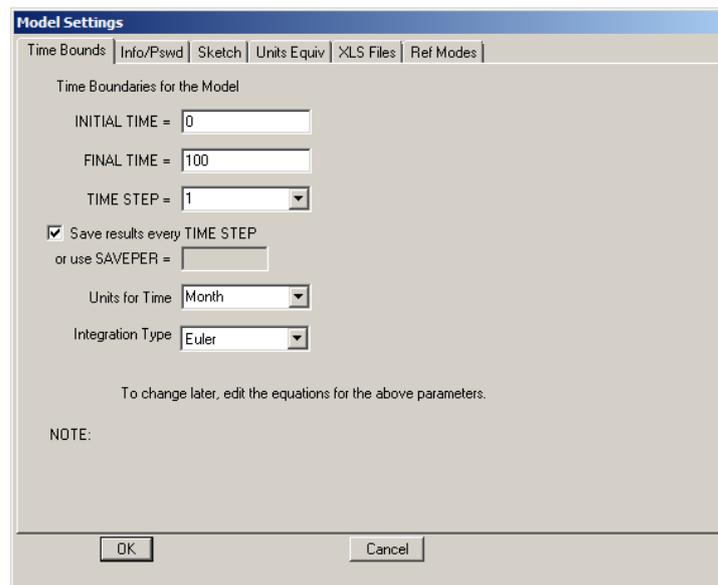


Figura 30 – Interfaz de condiciones iniciales y de simulación de VENSIM PLE

Para la simulación, existe la opción de insertar unidades en cada variable y comprobar de forma automática la consistencia del modelo, si las ecuaciones dimensionales son correctas con la simulación.

En general, VENSIM emite errores siempre que hay problemas para la simulación (ecuaciones erróneas o incompletas). También avisa cuando hay alguna variable que no se está utilizando.

A la hora de ejecutar la simulación VENSIM avisa cuando las variables auxiliares, que sirven para introducir datos, dejan de tener un dato configurado (cuando se simula por encima del tiempo de diseño de modelo, por ejemplo). En ese momento VENSIM simula con el último dato que tuviera la variable auxiliar.

También, especialmente con el modo de integración Euler, cuando se sobrepasan los límites de cálculo avisa en qué variable y con qué valor.

La definición de variables es igual tanto para niveles, como para flujos y variables auxiliares. La interfaz es como sigue:

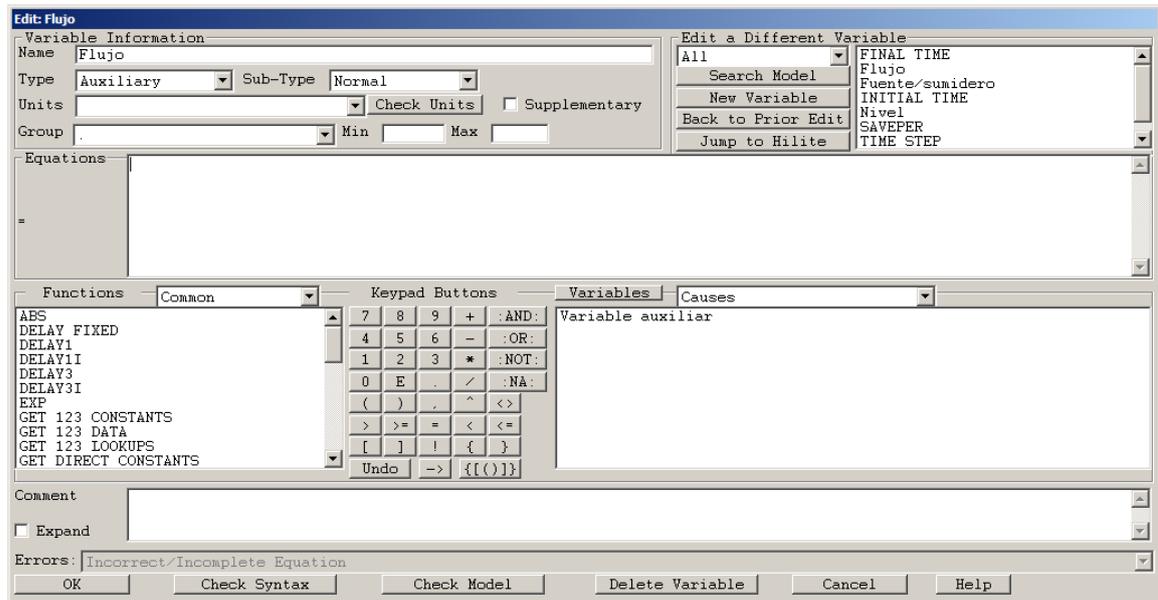


Figura 31 – Panel de definición de elementos en VENSIM PLE

En esta ventana se puede configurar el tipo de variable, la manera de definirla (con valor inicial, normal o con tabla), sus unidades, la ecuación que la define y las variables con las que se relaciona como parámetros más relevantes. También permite evaluar la corrección de la ecuación insertada y la consistencia del modelo por si hay errores de omisión de uso de variables.

En las ecuaciones hay un gran abanico de funciones a utilizar. Distribuciones estadísticas, retrasos, filtros, funciones matemáticas básicas, funciones lógicas...

En este mismo cuadro el programa permite evaluar la consistencia de las ecuaciones y también del modelo completo.

d. Salida de datos

Vensim PLE permite extraer varios datos de salida de la simulación.

- Árboles de causas, efectos y realimentaciones. A diferencia de otros programas, Vensim permite visualizar árboles de causa y efecto para cada variable así como los lazos en los que la variable está involucrada.
- Listado de variables y sus ecuaciones.
- Gráficas. A lo largo de este proyecto se van a mostrar algunas gráficas generadas por Vensim, generadas automáticamente mostrando la evolución temporal.
- Tablas de datos. La evolución de los parámetros seleccionados se pueden exportar a formato CSV y XLS.
- Comparación entre simulaciones, destacando las constantes que cambian entre simulaciones.
- Gráficas enfrentando variables entre sí, mediante el panel de control. Esta opción tiene una interfaz más potente que permite un mejor manejo de las gráficas de salida.

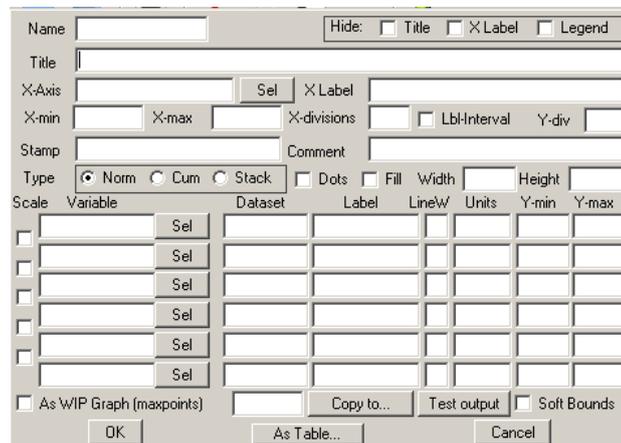
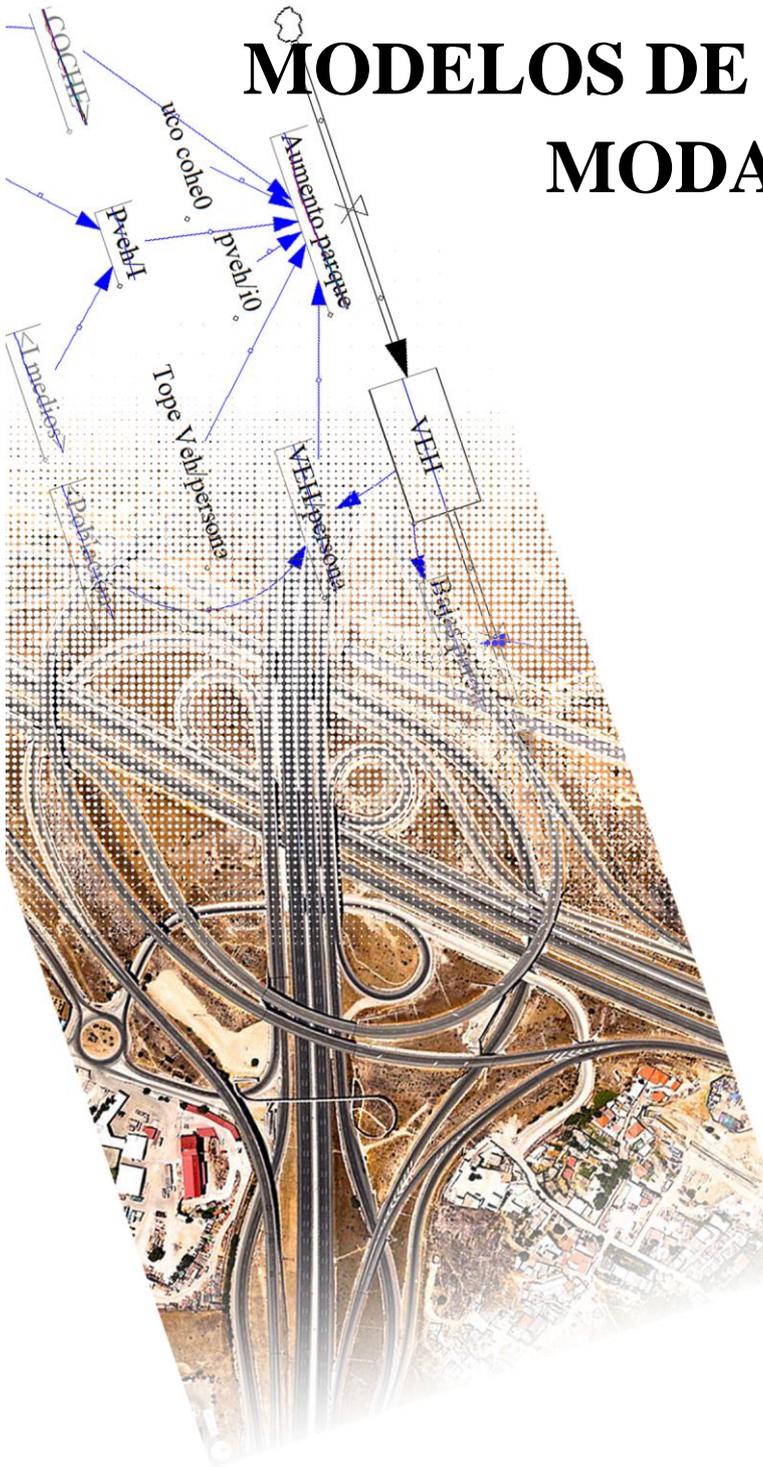


Figura 32- Panel de control en VENSIM PLE

CAPÍTULO 6

DESARROLLO Y JUSTIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE REPARTO MODAL



a. La elección modal en la ingeniería del transporte

El modelo clásico de previsión de la demanda es un modelo secuencial de 4 fases de estudio [39] [28]:

1. Generación y atracción de viajes: estimación del número de viajes atraídos y generados por cada zona → Modelos de generación-atracción de viajes
2. Distribución espacial: estudios de los flujos entre zonas → Modelos de distribución de viajes
3. Reparto modal: determinación de los viajes entre los diferentes modos y/o medios de transporte → Modelos de reparto modal
4. Asignación a la red: asignación de los desplazamientos entre centroides por uno o diversos caminos. → Modelos de asignación de ruta

En el presente estudio nos centramos en el tercer apartado, en tanto que lo que se pretende estudiar son los modelos de reparto modal.

Los modelos de reparto modal parten de dos campos de estudio: la economía y la psicología. Hoy en día, los modelos más extendidos parten de estudios económicos con origen en la economía neoclásica, posteriormente combinados con los modelos de Luce basados en la Independencia de las alternativas relevantes y finalmente desarrollados como Modelos de Utilidad Aleatoria (RUM por sus siglas en inglés) de aplicación para la microeconomía por Daniel McFadden a partir de 1972, nobel de economía en el año 2000. Estos modelos parten de varios supuestos:

- i. Las elecciones son individuales. Son modelos de elección discreta, o desagregada, en oposición a los modelos de elecciones agregadas en los que las elecciones son cuestión de zonas o colectivos. Los modelos de elección discreta fueron fuertemente defendidas por McFadden, como reclama en su eslogan «*Zones don't travel; people travel!*» [40]
- ii. Las elecciones son racionales. Los modelos RUM, basados en la maximización de la utilidad, suponen individuos completamente racionales e informados.
- iii. Las decisiones se toman en base a la utilidad. Dentro de las numerosas reglas de decisión que afecta al transporte [12] se reducen todas a la utilidad. Las otras reglas significativas son: Dominancia, Satisfacción, Reglas lexicográficas y Eliminación por aspectos.

Por parte de la psicología se han realizado críticas a los modelos RUM por la irrealidad del supuesto 2, reconociendo que no hay alternativas constructivas desde el campo de las ciencias sociales [41] Como se verá más adelante, desde otros campos de la ciencia social se ha empezado a esbozar un modelo constructivo que completa la visión de la elección modal.

Por otra parte, con respecto al tercer supuesto, sí que hay varias investigaciones en marcha tratando de añadir a los modelos de elección modal otras reglas de elección.

El modelo que McFadden comienza a desarrollar en 1965 y que se generaliza para el estudio de las elecciones discretas y se aplica para la elección modal en el transporte sería el modelo Logit Multinomial (MNL). En él la utilidad se modela de forma que el usuario n se decante por la alternativa j que mayor utilidad tenga asociada. La función de utilidad U_{nj} está compuesta por

dos términos, uno observable V_{nj} y uno desconocido que se trata como un error aleatorio de media cero ε_{nj} .

$$U_{nj} = V_{nj} + \varepsilon_{nj}$$

La parte observable V_{nj} se modela como función de atributos, x_{nj} , observados vinculados tanto a la alternativa j como al individuo n y que se calibra con una serie de coeficientes β .

$$V_{nj} = f(x_{nj}|\beta)$$

La mayoría de los modelos contemplan esta función como combinación lineal, en la que los parámetros β se mantienen constantes para cada individuo, cambiando para cada alternativa. Hay proyectos de investigación que valoran usar modelos no lineales y parámetros cambiantes para conseguir mejores ajustes. [12]

Una vez definidas las utilidades, hay distintos modelos para el cálculo de las probabilidades de elección de cada alternativa. Alfonso Orro [12] los clasifica así:

- Logit (MNL): errores con distribución Gumbel independientes e idénticos. No admite correlación y requiere homoscedasticidad
- Probit (MNP): factores no observados siguen distribución normal. Admite heteroscedasticidad y correlación.
- Modelos de valor extremo generalizado (GEV): entre ellos hay variantes del logit para permitir correlaciones como el Nested Logit (NL)
- Logit mixto: los factores no observados se dividen entre los que tienen correlación y heteroscedasticidad y los que son Gumbel.
- Dogit e IPT: usa transformaciones directas e inversas para modificar las colas de la función de probabilidad logit.

El más simple es el MNL, en el que las probabilidades de elección de cada alternativa p_j se obtienen con la fórmula:

$$p_j = \frac{e^{U_{nj}}}{\sum_i e^{U_{ni}}}$$

El principal problema de este modelo es la Independencia de las alternativas relevantes (IIA) explicada por Ortúzar y Willumsem [42] “Cuando cualquier alternativa tiene la posibilidad no nula de ser elegida, el ratio de probabilidad no se ve afectado por la ausencia o presencia de otras alternativas en el conjunto de la elección”. Esto implica que el MNL sólo da resultados válidos ante un conjunto de alternativas independientes entre sí. Cuando hay correlación, surge el problema denominado bus rojo-bus azul, sobre el que existe abundante bibliografía [28].

Para corregir esto aparecen los modelos que Orro denomina de valor extremo generalizado (GEV), cuyo exponente más sencillo es una variación del MNL llamado Logit Jerárquico (HL) o Nested Logit (NL). En este modelo las opciones correlacionadas se anidan entre sí, creando varios niveles de elección relacionados.

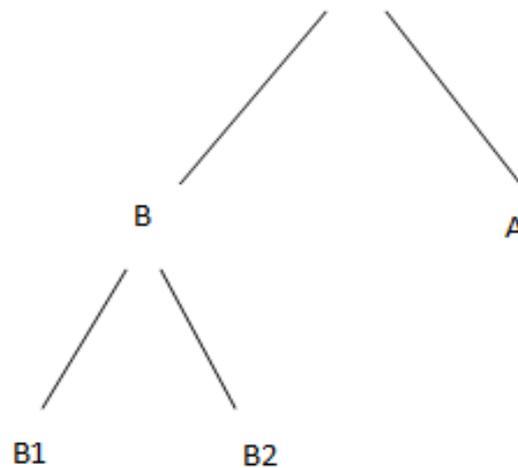


Figura 33 – Estructura de decisión entre alternativas en un modelo NL [11]

En la figura se ha representado un modelo NL para decidir entre los medios A (independiente), B1 y B2 (correlacionados entre sí). En este caso se tendrá que definir una utilidad para B, que se relaciona con la de B1 y B2 con:

$$U_B = \theta \cdot \ln (e^{U_{B1}} + e^{U_{B2}})$$

θ es un parámetro que debe ser estimado. Teóricamente debe de estar comprendido entre 0 y 1.

b. Nuevos enfoques: desvío modal y motilidad

Frente a las limitaciones señaladas de la teoría clásica de la ingeniería del transporte y sus modelos para la elección modal, van a contemplarse aquí algunos de los aportes de las ciencias sociales para la movilidad [43] [11] [35] [36].

i. Desvío modal frente elección modal

Por un lado tenemos la aportación de Marco Diana [43] que propone un método que contemple los cambios de comportamiento de la población más que los cambios de los atributos de cada modo para estudiar las situaciones de desvío modal (“modal diversion” en inglés) relacionadas con los servicios informatizados de transporte. En realidad, el cambio de paradigma se da en que con estas metodologías se estudia los motivos del cambio de modo en vez del cambio de modo en sí. Afirma que en los estudios de desvíos modales se investigan 3 clases de factores más allá de los atributos y utilidades de la ingeniería de transporte tradicional:

- Elementos instrumentales como las características de los medios competidores
- Factores subjetivos como las aptitudes y aspectos de la personalidad
- Variables de situación como los hábitos y la variables socioeconómicas

Las conclusiones del estudio que realiza M. Diana apuntalan sus hipótesis, confirmando que quienes están más habituados a la multimodalidad tienen más facilidad para el desvío modal cuando aparece una nueva opción. De la misma forma añade que factores subjetivos como la satisfacción vinculada al confort y la fiabilidad del medio usado afectan negativamente al desvío modal.

ii. Motilidad y movilidad

Por otro lado, desde el campo de la sociología, V. Kaufmann [35] [36] ha desarrollado el concepto de motilidad, explicado como una fertilización cruzada entre disciplinas. Motilidad es un término biológico que se refiere a la capacidad de movimiento de determinadas células. Kaufmann define motilidad como “la capacidad de las entidades para moverse en el espacio social y geográfico, o la manera en que las entidades acceden y se apropian de la capacidad de movilidad socio-espacial de acuerdo con sus circunstancias” [35]. Por tanto la motilidad es la “movilidad potencial de los actores” [44].

Esta definición viene motivada desde el campo de la sociología por asentar una teoría que conectase la movilidad social con la movilidad espacial, en vista de la relevancia socio-económica que la movilidad ha adquirido en las últimas décadas. Desde su campo, apunta a lo limitado de la visión de la movilidad en los estudios sociológicos sobre la misma por 2 motivos principales:

- Esto es causado porque las cuestiones de movilidad se limitan al mero desplazamiento y no se contemplan como el fruto de la interacción de actores, estructuras y contextos, que son las que motivan y a la vez condicionan dichos desplazamientos.
- Los estudios centrados en el pasado y en el presente no permiten entender los impactos de determinados fenómenos, puesto que no se estudia el potencial de los cambios, las limitaciones a las que pueden enfrentarse y las posibilidades de los actores involucrados.

La motilidad, tal y como ha sido definida, se basa en 3 elementos interrelacionados [35]:

- Acceso: son el conjunto de opciones posibles en torno a la movilidad. Se compone por un lado de opciones, que serían el rango de posibles modos y medios de comunicación y transporte así como de servicios y equipamiento en un momento dado. Por otro lado de condiciones, que serían las características de precios, horarios, localizaciones... asociadas a las opciones.
- Destrezas: son el conjunto de habilidades que pueden afectar directa o indirectamente al acceso o la apropiación. Se compone de habilidades físicas (vista, oído...), habilidades adquiridas (licencias de conducción, idiomas, habilidades tecnológicas...) y habilidades organizacionales (capacidad de hacer planes, de sincronizar tareas...)
- Apropiación: manera en que los agentes interpretan y actúan a partir de sus accesos y destrezas reales o percibidas. La apropiación es un proceso dinámico entre los otros dos factores descritos.

c. Los modelos propuestos

Aunque el objeto de los modelos es estudiar la elección modal, para tal fin hay que construir un marco en el que se represente la evolución de otras variables muy significativas en el estudio sistémico del transporte. Este marco incluye variables y relaciones de un alto grado de complejidad y muy vinculadas a distintas disciplinas que van desde la economía al urbanismo.

Los modelos para estudiar el reparto modal van a basarse en la Dinámica de Sistemas tal y como se ha descrito en capítulos anteriores. Por ello, los modelos no servirán para predecir escenarios, sino para predecir tendencias y comparar alternativas. Son por tanto modelos de gestión, no de predicción. Lo importante en la Dinámica de Sistemas es la estructura de los mismos, cómo son las relaciones entre elementos por encima de las particularidades cuantitativas de cada relación. En este sentido, los modelos propuestos no se adentran demasiado en aventurar hipótesis sobre posibles relaciones entre elementos que afectan al reparto modal aunque en la bibliografía haya referencias que apoyan esas hipótesis.

Se elaboran dos modelos porque como se verá, las hipótesis adoptadas en cada uno son de naturaleza distinta:

- el primero es un modelo en el que las relaciones tiene su fundamento en correlaciones entre fuentes estadísticas, más restringidas,
- el segundo se basa tan sólo en relaciones de causalidad positiva o negativa entre elementos.

Los modelos que se presentan están limitados por 3 elementos, de manera distinta en cada modelo:

- Datos disponibles sobre reparto modal y variables socio-económicas
- Hipótesis de comportamiento del sistema de transporte en automóvil
- Hipótesis de comportamiento del sistema de reparto modal

Para organizar la exposición de las hipótesis hechas primero se va a describir de manera general la estructura general que comparten ambos modelos.

Los modelos tienen una serie de variables externas que afectan a uno o a los dos sub-bloques. Los sub-bloques son subsistemas dentro del sistema general a los que se llamará “sub-bloque de producción de transporte en automóvil” y “sub-bloque de reparto modal”. Cada sub-bloque contiene un modelo que es parte del modelo completo.

Cada modelo completo representa un esbozo del sistema de reparto modal, al que le influyen poderosamente elementos del sistema de transporte en automóvil, por encima de la producción con otros modos. Esto supone una primera hipótesis que se apoya en la posterior explicación del sub-bloque referido al reparto modal. La división de los modelos en dos bloques se explica por la complejidad añadida que supone el sub-bloque de producción de transporte en automóvil.

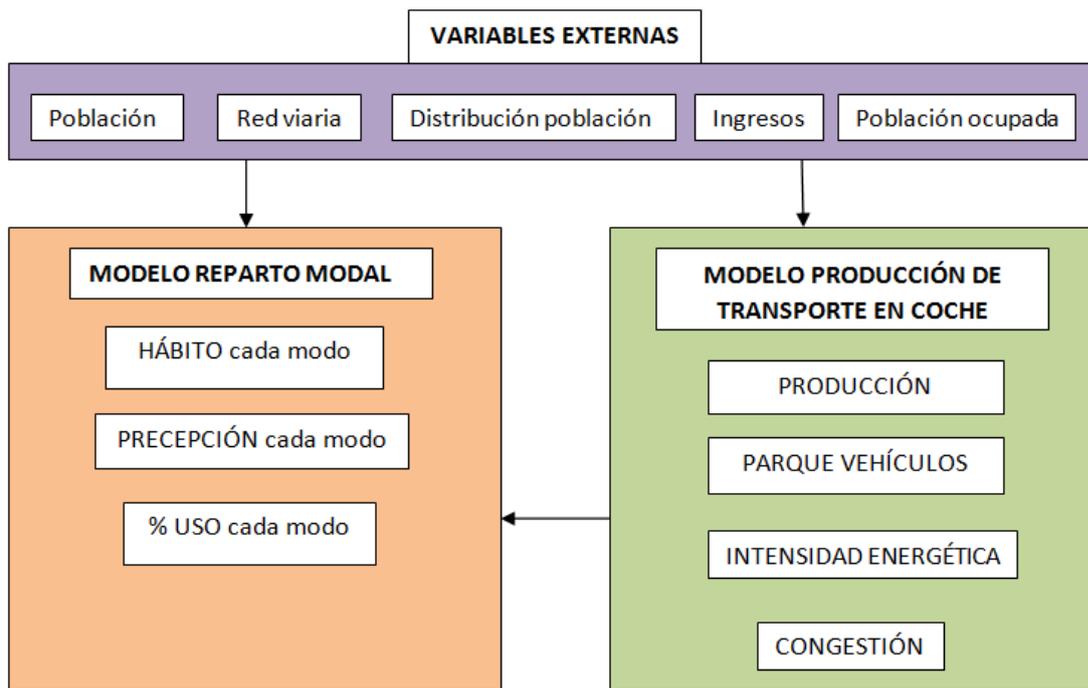


Figura 34 – Esquema conceptual de los modelos de reparto modal en el transporte.

En cuanto a los datos disponibles el principal referente para el modelo de reparto modal ha sido la “Encuesta de hogares y medio ambiente 2008” [45]. En esta encuesta aparecen datos recientes de elección modal cruzados con distintas características socio-económicas de las personas de la muestra. La encuesta refleja la elección modal de personas según su nivel de ingresos, el tamaño de su municipio, estado civil, tipo de hogar, tamaño de la vivienda, tipo de empleo y ocupación entre otros. Esto hace que el primer modelo, basado en correlaciones, se apoye de forma muy decidida en esta fuente.

Es una encuesta de Preferencias Declaradas, con las particularidades que ello supone a la hora de trabajar con datos de PD frente a datos de Preferencias Reveladas (PR) [28], principalmente que no nos basamos en datos históricos recogidos o muestreados, sino a datos sobre las preferencias de la población sobre los distintos modos y medios. Esta situación en parte es apropiada para el modelo dado que incluye aspectos psicológicos y de percepción de los medios de transporte.

Esta ha sido la principal limitación del modelo, dado que algunos de los datos ofrecidos, como la proporción de población según tamaño de municipio o según ingresos, tan sólo se disponen para 2008 con esta metodología de muestreo, teniendo que estimar su evolución mediante otras encuestas del INE para 2008 y otros años.

A parte de lo mencionado, los datos de esta encuesta serán determinantes para 3 características de los resultados del primer modelo:

1. Estos datos no distinguen entre trayectos hechos en ámbito urbano o interurbano.
2. Estos datos ofrecen resultados de trayectos, no de producción y por tanto el reparto se hace sobre los desplazamientos, no sobre la producción de transporte. En los trayectos contabilizados es indiferente la distancia recorrida. En este sentido, lo que el modelo

representa es cómo cubre cada medio y modo las necesidades de movilidad de la población y no cómo cubre cada medio la producción de transporte.

3. Los modos y medios que se estudian en la encuesta y que serán los que se estudien en el modelo son(entre paréntesis el nombre que figura en el modelo)[en corchetes el valor de 2008 del % de cobertura de movilidad]:
 - Autobús (BUS)[14.7%]
 - Otros transportes públicos (taxi, autobús de empresa o institución, Metropolitanos, tranvías...) (OTROPUBLIC)[7%]
 - Automóvil (COCHE)[43.2%]
 - Moto o ciclomotor (MOTO)[2.1%]
 - Bicicleta (BICI)[1.3%]
 - A pie (PIE)[30.3%]

El segundo modelo es más elástico y no se restringe a los datos de esta encuesta, por lo que da como resultados cuotas de reparto modal sobre la producción y no sobre la movilidad. Para poder comparar más fácilmente entre modelos, se adoptan las mismas categorías [entre corchetes el valor en 2007 del reparto modal [5]]:

- Autobús (BUS)[10.7%]
- Otros transportes públicos (tren, Metropolitanos, tranvías...) (OTROPUBLIC)[13.2%]
- Automóvil (COCHE)[69.4%]
- Moto o ciclomotor (MOTO)[2.9%]
- Bicicleta (BICI)[0.2%]
- A pie (PIE)[3.6%]

A partir de ahora se definirán los detalles de cada modelo por separado. Indicar que el segundo modelo comparte el marco teórico, especialmente para el diseño de los determinantes de la elección modal, por lo que las descripciones de ambos modelos están muy relacionadas entre sí.

1- El primer modelo: Correlaciones

i. Modelo de elección modal

Para el modelo de elección modal se tomado como marco teórico el trabajo de A. De Witte [11] en el que se hace un repaso de 76 estudios sobre elección modal para extraer sus principales conclusiones en cuanto a cuáles son los factores más influyentes en el comportamiento de los usuarios del transporte. En el trabajo se separan los distintos factores que influyen en la elección modal en:

- Indicadores socio-demográficos
Son características de la situación individual de los pasajeros. Incluye la edad, el género, la educación, la actividad, los ingresos, el tipo de hogar y de manera más importante la disponibilidad de vehículo.
- Indicadores espaciales
Son características del contexto en el que se da el viaje: densidad de población, diversidad modal y proximidad y acceso a infraestructuras.
- Indicadores del viaje

Son características del viaje en concreto, como el motivo del viaje, la distancia, el tiempo, el coste, el tiempo de espera, la cadena de viajes, el tiempo o la información.

- Indicadores socio-psicológicos

Esta última categoría incluye los determinantes de los actos individuales que han sido influidos todas las características anteriores del viaje y de la persona. Son determinantes que desde la teoría de la motilidad conformarían la Apropriación de los distintos modos, esto es, la manera en que cada sujeto interactúa con las distintas opciones en las distintas situaciones. Por ello este grupo engloba distintos componentes subjetivos como experiencias, familiaridad, estilo de vida, hábitos y percepciones.

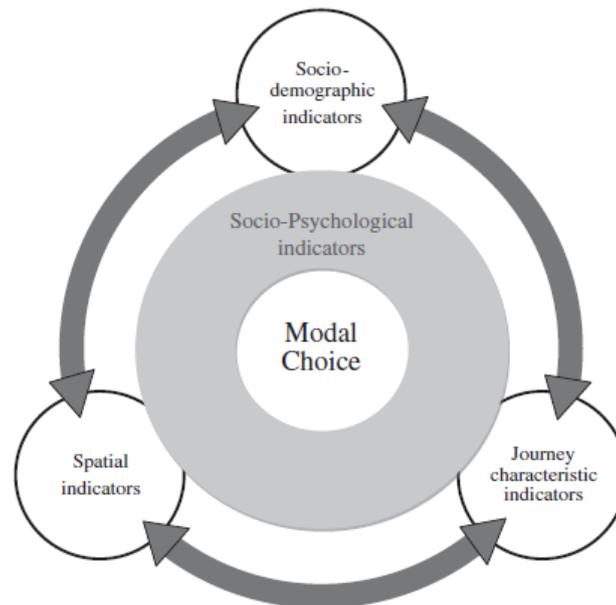


Figura 35 – Esquema para estructurar los determinantes de la elección modal [11]

Las variables escogidas para el modelo han sido las consideradas como más relevantes por A. De Witte.

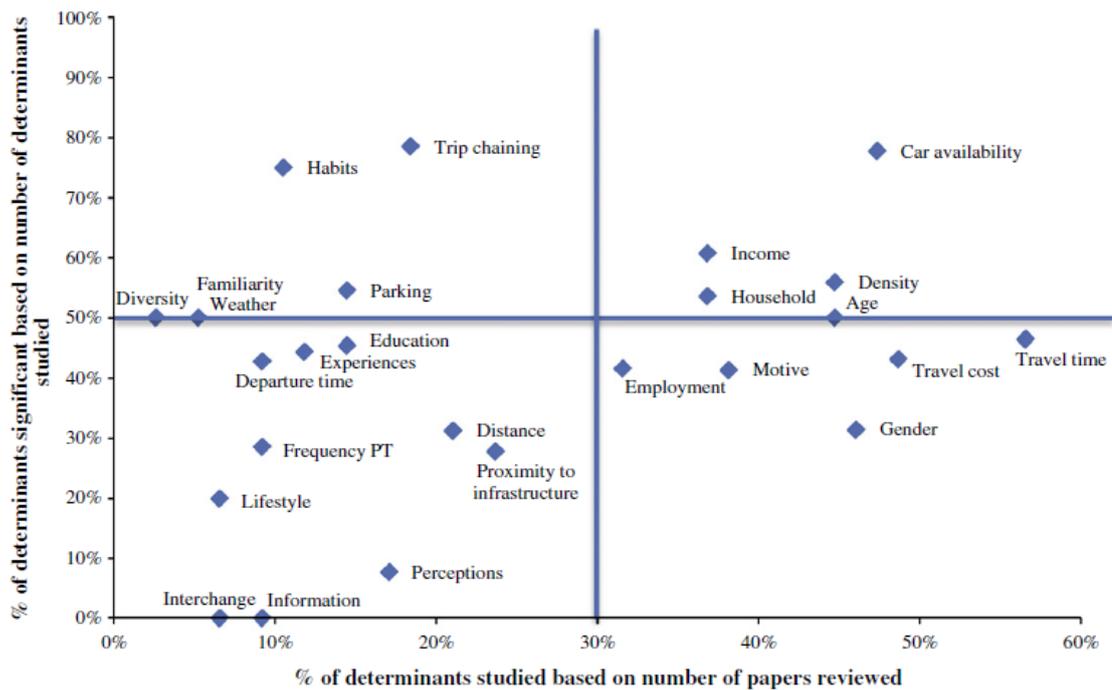


Figura 36 – Clasificación de los determinantes de la elección modal. El eje vertical muestra la importancia de los significantes según los estudios que los recogen y el eje horizontal muestran la frecuencia con la que se estudian los determinantes. [11]

• INDICADORES ELEGIDOS

En el modelo se ha intentado respetar la discriminación entre tipos de indicadores, asimilándolos a las categorías Acceso, Destrezas y Apropiación de la teoría de la Motilidad. De las cuales se han reducido a las siguientes:

- Destrezas: engloba los indicadores socio-demográficos que determinan la elección, puesto que son las aptitudes y condiciones individuales ante la elección modal. De entre los distintos factores se han elegido:
 - Ocupación
 - Ingresos
 - Composición hogar
 - Disponibilidad coche

El nivel educativo se ha excluido del estudio por falta de datos del mismo tipo que del resto, en la encuesta del INE. También se han excluido género y edad, puesto que aunque son variables sobre las que hay documentación, no parecen variables sobre las que se puedan hacer predicciones consistentes ni esbozar modelos de futuro. El motivo del viaje también se ha excluido por una absoluta falta de datos homogéneos con los que trabajar, puesto que el motivo si aparece en las encuestas Movilia 2.006 y 2.007 del ministerio de Fomento. El motivo sí que es una variable que merezca la pena estudiar.

La disponibilidad de coche y su influencia en el reparto modal tampoco es un dato disponible en las encuestas, pero que se ha incluido puesto que aunque no se pueda

representar con todo rigor, dado que es una variable muy relevante -según las referencias- se puede aproximar suponiendo el efecto que tiene sobre las Percepciones de cada modo.

- Acceso: engloba los indicadores del viaje y espaciales, que no tienen relación con la persona que va a viajar. En el modelo se han incluido los siguientes:
 - Densidad de población mediante % de población en cada tipo de zona urbana o rural
 - Tiempo por km según modo
 - Coste por km según modo

Las variables espaciales se han reducido a la distribución de población por zona urbana que habitan (núcleos de menos de 10.000 hab, núcleos de 10.000 a 100.000 hab, y capitales y núcleos de más de 100.000 hab.). Se entiende que los otros indicadores espaciales (accesibilidad infraestructuras, diversidad modal, frecuencias transporte público, disponibilidad aparcamiento...) están insertas o al menos, fuertemente relacionadas con la variable anterior.

Por otro lado, los indicadores del viaje se han reducido al tiempo y al coste. De las variables relevantes, la distancia, la cadena de viajes (para viajes con varias paradas o viajes por varios medios), el clima y sobre todo el motivo, han sido excluidos por falta de datos homogéneos en las encuestas con los que poder trabajar. La eliminación de estas variables puede suponer un verdadero sesgo, dada la importancia que estas variables tienen para algunos medios, como la bicicleta [46].

- Apropiación: engloba los indicadores socio-psicológicas de la elección modal. Estos indicadores se consideran influidos por el resto de variables e indicadores, dado que los atributos socio-psicológicos de cara a la elección de cada individuo y grupo se consideran determinados en gran medida por el resto de variables. Estos indicadores son cruciales puesto que se entiende que son los que finalmente definen la elección modal. Los indicadores se han reducido a:
 - Hábito: es el indicador más relevante de este grupo. Para este modelo se ha interpretado que el hábito además incluye y se ve afectado por las variables no incluidas como estilo de vida, experiencias, familiaridad... Esta suposición de que el hábito engloba los otros indicadores se fundamenta en que en el estudio de referencia si aparecen separados entre sí es por una disparidad y dispersión en el resto de estudios que impedían a los autores clasificarlos en un solo grupo homogéneo sin perder información. Sin embargo, para elaborar el modelo sí es aceptable esa reducción si se entiende Hábito en el sentido de “rutina”.

Se entiende entonces la variable Hábito como una variable agregada que representa la inercia del conjunto social ante la elección modal. En esta variable es donde afectan todas las variables relativas a los individuos o al contexto de los mismos, a excepción de la posesión de vehículo, que si bien se puede considerar como una variable que afecta a la generación de hábitos y modos de vida aquí se va a interpretar como que la posesión de vehículo lo que provoca es un cambio en la Percepción del viaje, al despertar una expectativa de “comodidad” en el viaje que deben atribuirse a

la Percepción y no al Hábito. En realidad, entender que la posesión de vehículo modifica la Percepción del viaje y no el Hábito del viajero supone asumir la hipótesis de que la posesión de vehículo no es un hecho estructural sino que es una elección racional que se confirma día a día.

- Percepción: es un indicador de poca relevancia en el estudio de referencia, pero que sirve para representar los posibles cambios de opinión entre usuarios ante cambios en el acceso. Que la percepción tenga una baja relevancia en los estudios, sobretodo comparada con el Hábito y otras variables relacionadas, lo que apunta es a la rigidez existente entre la población para realizar cambios en la elección modal.

- APARATO MATEMÁTICO

En el modelo **el % de uso de cada modo** (% USO MODO) se calculan siguiendo la metodología del modelo MNL (Multinomial Logit), sustituyendo la utilidad por el Hábito y la Percepción. De esta forma, la utilidad se reduce a:

$$V_{nj} = H_j + P_j$$

H representa al indicador Hábito y P a Percepción.

Se está omitiendo del estudio el error asociado a estos cálculos. Esta es una decisión importante, sobre todo teniendo en cuenta que la mayoría de las discusiones sobre los modelos MNL versan sobre la naturaleza del error asociado a esta distribución.

Se ha optado por utilizar este método por el ajuste automático que produce entre modos, en el que unos modos suben y otros modos bajan. Es por ello que todos los Hábitos y Percepciones afectan a todos los % de uso de todos los modos.

La hipótesis más arriesgada de esta elección es considerar que Hábito y Percepción tienen el mismo peso en la “utilidad” y que no hay un factor 80% Hábito-20% Percepción, como podría parecer en base a la bibliografía.

Como anotación, señalar que el Hábito y la Percepción al ser equivalentes de una “utilidad” serán numéricamente el logaritmo natural de % de uso del modo al que correspondan.

En el modelo, el **Hábito** se configura como una correlación entre las distintas variables socio-demográficas cuyos datos se han extraído de la encuesta del INE y cuyo resultado es el logaritmo natural del % de uso de cada modo expresado en una escala de 0 a 100. Los resultados son los siguientes, y los distintos Hábitos en el modelo están recogidos en el ANEXO 2:

Variable	descripción	coeficiente	Error estándar
Constante		-0.019143	0
% pob. Urbana	% de población en capitales y núcleos de más de 100.000	-0.5409324	0
% pob. rural	% de población en núcleos de menso de 10.000	-0.6665379	0
TH: hogar unipersonal	% de población en hogares unipersonales	0.20264327	0
TH: pareja sola	% de población en hogares con sólo una pareja	0.2540589	0
OCU	% población ocupada	0.5737426	0
I<1000	% población en hogares con ingresos menores a 1.000 €/mes	0.3103938	0
R ²	Coeficiente de determinación	1	

Tabla 13 – Coeficientes de la variable Hábito.

Los signos son en principio consistentes si tenemos en cuenta el reparto modal que se toma como referencia, en el que los modos dominantes son el coche con un 43% y a pie con un 30%, por lo que los coeficientes positivos significan que estas variables favorecen la movilidad de estos modos y los negativos que la limitan.

Consecuentemente y al ser estas variables iguales para todos los modos, dado que son variables que afectan a los usuarios, el hábito resulta ser igual para todos los modos.

La **Percepción** se ha modelado de otra forma. Los datos de Costes/km y tiempo/km por cada modo han sido extraídos de distintas fuentes y algunos son de elaboración propia. En ningún caso se ha podido extraer una correlación consistente, en la que la Percepción de un modo empeorase al subir el tiempo o el coste y mejorase cuando estos disminuyeran. Esto se debe a la distorsión por otras causas presentes en la elección modal y que no se estaban teniendo en cuenta para definir este indicador, dado que están en otros indicadores. Por otro lado, al no haber datos homogéneos sobre la influencia de la disponibilidad de vehículo en la elección modal, para incluirlo no se ha podido

recurrir a correlaciones. Por ambos motivos, la Percepción se ha modelado como un parámetro de referencia (el logaritmo natural de % de uso de cada modo) multiplicado por la tasa de variación por un lado del Coste y el Tiempo y por otro de la cantidad de vehículos por adulto, haciendo que el Coste y el Tiempo fuesen inversamente proporcionales a la Percepción y la cantidad de vehículos fuera proporcional a la Percepción de automóviles y motos e inversa en el resto de modos.

La percepción lleva un delay1 para evitar cambios bruscos irreales en el comportamiento real de la población.

Esta sería la expresión de la Percepción para un medio en el que el aumento del número de vehículos disminuya la percepción, esto es, cualquiera menos el automóvil.

Percepción

$$= \text{delay1} (\ln(\%USO \text{ MODO}) \cdot \frac{(-\text{tiempo inicial} - \text{coste inicial})}{(-\text{tiempo} - \text{coste})} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{\text{Vehículos}}{\text{adultos}}\right)})$$

Los costes y tiempos asignados a cada modo y las suposiciones hechas se explicitan en el ANEXO 1.

En el **Uso del Coche** intervienen variables del modelo de producción, como la **intensidad energética** y la **congestión**. Estas variables intervienen una en el **coste** y otra en el **tiempo**.

El **coste del vehículo** se ve afectado por **i**, el coste del capital, una tasa estimada en 0,05. El **coste del combustible por kilómetro** se ve afectado por la **intensidad energética**, la inversa de la eficiencia energética. Por otro lado, el **tiempo** se ve afectado por la **congestión**. La **congestión** en el modelo se estudia como las horas de media que cada persona pierde al año por la congestión. Sin embargo, el tiempo que estamos representando aquí es el tiempo medio para hacer un kilómetro en h/km, la inversa de la velocidad media. Por tanto, para hacer la congestión un parámetro con el que trabajar hay que transformarla al tiempo perdido de media en cada trayecto, para lo que se supondrán 500 viajes al año (230 días laborales, 2 viajes al día mínimo y para ajustar, dado que tan solo los viajes por motivos laborales son los menos, redondear a 500).

A continuación se muestran los diagramas de Forrester de esta parte del modelo. En grande el modelo de coche y en pequeño el resto:

Todas las variables representadas en estos diagramas vienen definidas en el ANEXO 2.

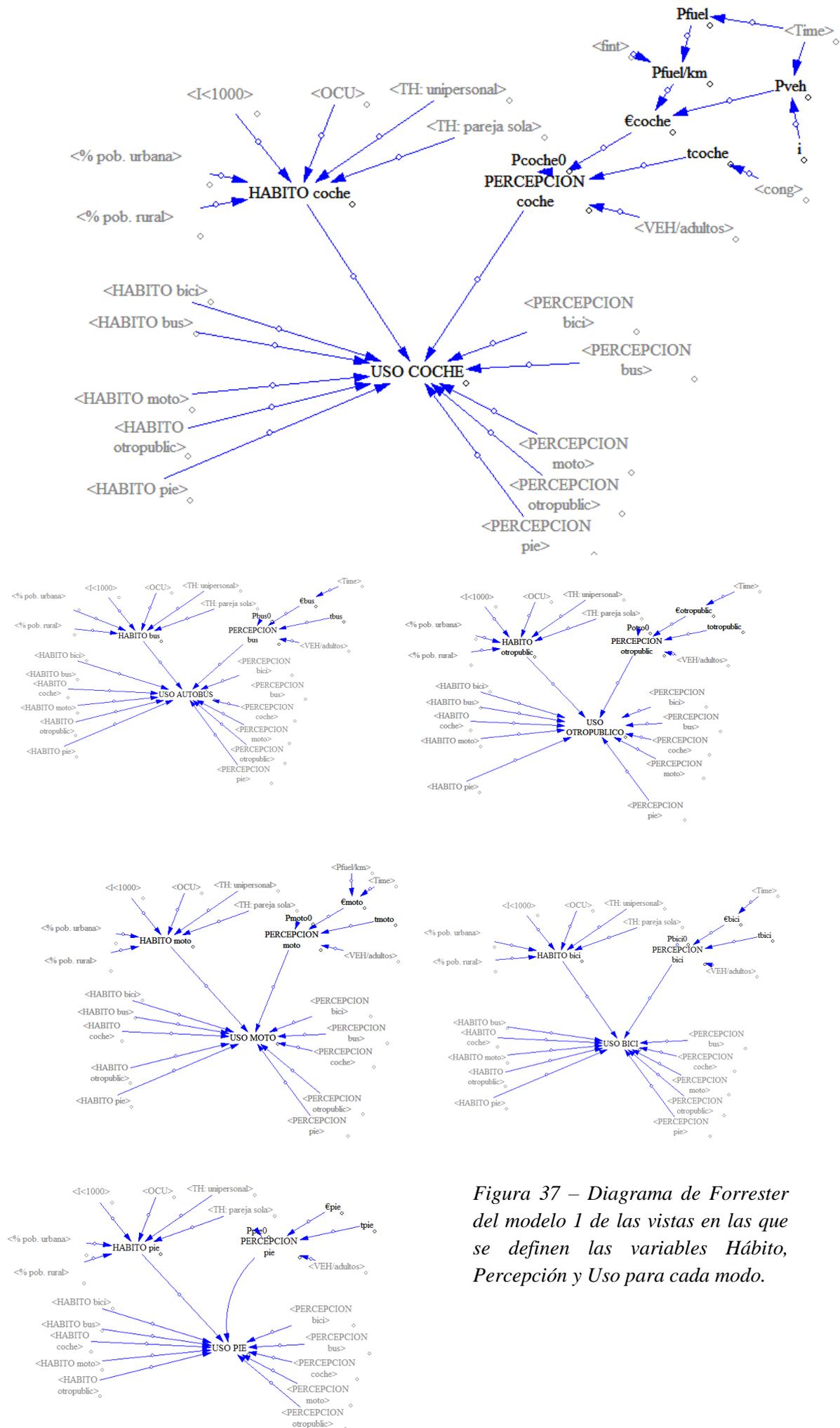


Figura 37 – Diagrama de Forrester del modelo 1 de las vistas en las que se definen las variables Hábito, Percepción y Uso para cada modo.

ii. Modelo de producción de transporte en automóvil

Para este sub-bloque el modelo se ha basado en el trabajo de K. M. Hymel, K. A. Small y K. Van Dender [25]. Este trabajo estaba dedicado al estudio de las interrelaciones entre la congestión, la eficiencia energética y los fenómenos demanda inducida y efecto rebote.

- **Demanda inducida:** demanda de transporte que se produce por la disponibilidad de mayores instalaciones de transporte y que sin esas instalaciones no se produciría. La demanda inducida representa la producción de transporte que se hace derivada no tanto de una necesidad real de usar un determinado modo de transporte o incluso de usar un transporte como de la posibilidad de usarlo.
- **Efecto rebote:** el efecto rebote es el fenómeno que explica el aumento de la producción que se produce por una reducción de los costes del transporte debidos a un aumento en la eficiencia. Es un indicador importante porque revela que las políticas de eficiencia, por sí mismas, no consiguen una reducción del consumo de determinado bien o servicio sino que a veces consiguen lo contrario al producir un mayor consumo al bajar el precio.

Se sirven de un modelo econométrico con el que despejan las distintas elasticidades entre unas variables y otras. De ese modelo se asimilarán las principales variables y relaciones, por ser un modelo sencillo pero que incluye las principales variables significativas en el estudio del transporte en presencia de congestión, que se ha considerado como una variable influyente en el uso de algunos medios.

En este modelo se van a asumir las principales hipótesis de este modelo y su modelo del mismo modo en que ha sido publicado, de forma que aunque el modelo econométrico no sea extrapolable entre escenarios de transporte distintos, las tendencias y las relaciones que muestra sí lo son. Por ello es previsible que haya desajustes cuantitativos en los resultados de salida del modelo de producción.

El modelo de producción de transporte se ha basado en el ya citado trabajo de K. M. Hymel, K. A. Small y K. Van Dender [25]. En él se declaran 4 niveles que aquí se asumen de esta forma: **la producción VKA/adultos** (en miles de vehículos-km/población adulta), el **parque de vehículos VEH/adultos** (en número de vehículos/población adulta), la **intensidad energética fint** (en l/km) y la **congestión cong** (en horas perdidas al año por persona).

$VKA/adulto =$

$$VKA/adulto \left(\frac{VEH}{adulto}, cong, \frac{Pfuel}{km}, \frac{kmred}{superficie}, \frac{Población}{adultos}, Imedios, \%pob.urbana \right)$$

$$VEH/adulto = VEH/adulto \left(\frac{VKA}{adulto}, Pveh, \frac{Pfuel}{km}, i, \frac{licencias}{adulto}, \%pob.urbana, Imedios \right)$$

$$fint = fint \left(\frac{VKA}{adulto}, Pfuel, REGULACIÓN, \frac{población}{adultos}, Imedios, \%pob.urbana \right)$$

$$cong = cong \left(\frac{VKA}{adulto}, km\ red \frac{urbana}{adulto}, DENS, \%camiones, \%pob.urbana \right)$$

Variable	Descripción	Unidades
I medios	Ingresos medios de la población	Miles de euros al año
cong	Horas al año perdidas por la congestión por adulto	horas
VKA/adulto	Producción del transporte en automóvil por adulto	miles de veh-km/adulto
VEH/adulto	Parque de vehículos turismos por adulto	turismos/adulto
fint	Intensidad energética: litros de combustible necesarios para recorrer 1 km	l/km
Pfuel/km	Coste monetario del combustible para recorrer 1 km	€(2006)/km
Pfuel	Coste monetario del litro de combustible	€(2006)/l
población/adulto	Población por adulto	-
%pob. Urbana	fracción de población en capitales y núcleos de más de 100000 hab	%
km red/superficie	Km de red viaria en una superficie dada	1/km
licencias/adulto	número de permisos de conducción por adulto	permisos/adulto
Pveh	Coste monetario de amortización del vehículo por km	€/km
i	interés	-
regulación	Medida de la fuerza regulatoria, del 1 al 10	-
dens	Densidad de población	pob/km ²
% camiones	% de vehículos del parque total que son camiones	%
red urbana/adulto	kilómetros de red urbana por adulto	km/adulto

Tabla 14 – Definición de las variables en el sub-bloque de producción de transporte del modelo 1.

Todos los parámetros en el modelo están normalizados, así que los resultados se dan como Logaritmo natural, como se toman en el modelo del estudio original.

Los coeficientes se han tomado del trabajo original siguiendo las hipótesis antes señaladas.

Las variables en el modelo tienen un retraso modelado como DELAY1 con tiempo 1 para representar los cambios en los datos de salida con más realismo, dado que unas variables agregadas de este tipo responden ante los estímulos de forma suave normalmente.

VKA/adulto	
Variable	Coeficientes
Constante	1.8472
I medios	0.1031
cong	-0.0092
cong*I medios	-0.0244
cong*Pfuel/km	-0.0124
VKA/adulto(t-1)	0.7947
VEH/adulto	0.034
Pfuel/km	-0.0474
Pfuel/km*Pfuel/km	-0.0251
Pfuel/km*I medios	0.0635
pop/adult	0.2663
% pob. Urbana	-0.1626
km red/sup	0.0186

VEH/adulto	
Variable	Coeficiente
Constante	-0.4355
pv	0.0211
i	0.0028
I medios	0.0215
% pob. Urbana	-0.1072
licencias/adult	0.0625
VEH/adulto t-1	0.8697
VKA/adulto	0.0452
Pfuel/km	-0.001

fint	
Variables	Coeficientes
Constante	-0.1619
VKA/adulto+Pfuel	-0.0304
I medios	-0.0078
fint t-1	0.8465
% pob. Urbana	-0.0108
pop/adult	-0.0249
regulacion	-0.091

Cong	
Variables	Coeficientes
Constante	-8.4146
red urbana/adult	-1.416
VKA/adulto+% pob.urbana	0.46
dens	1.1647
% camiones	0.4636

Tabla 14, 15, 16, 17 – Coeficientes de las variables VKA/adulto, VEH/adulto, fint y cong

Hay que señalar de este modelo que todas las variables son resultados agregados, por lo que no representan variables concretas perfectamente homogéneas.

- La producción se engloba trayectos muy diversos, con distintos tipos de coches y en distintas situaciones.

- El parque de vehículos incluye distintos tipos de turismos: diesel, gasolina e híbridos.
- La congestión es una medida media para un conjunto de población muy heterogéneo.
- La intensidad energética no es una medida de una tecnología concreta sino una medida del consumo entre la producción total para un conjunto que incluye tecnologías heterogéneas y que se usa en situaciones diversas.

El diagrama de Forrester representa esta parte del modelo de esta forma:

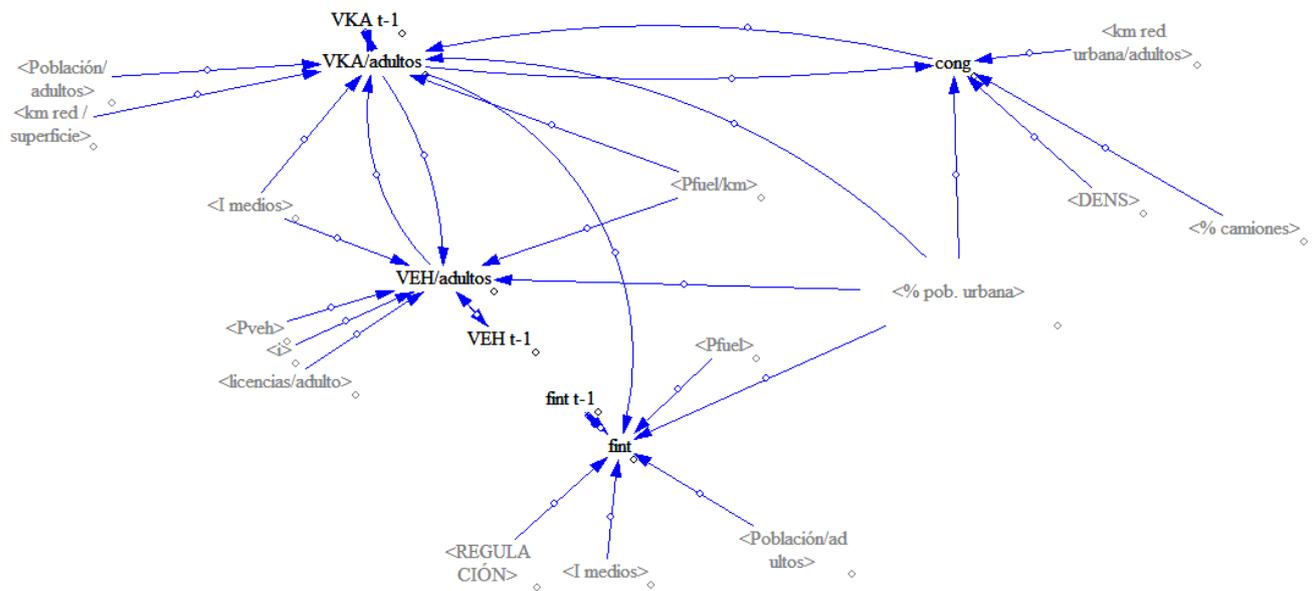


Figura 38 – Diagrama de Forrester del sub-bloque de producción del transporte del modelo 1

El diagrama causal del modelo completo se divide entonces en estos bloques (no se representa todo el sub-bloque de reparto modal con todos los medios):

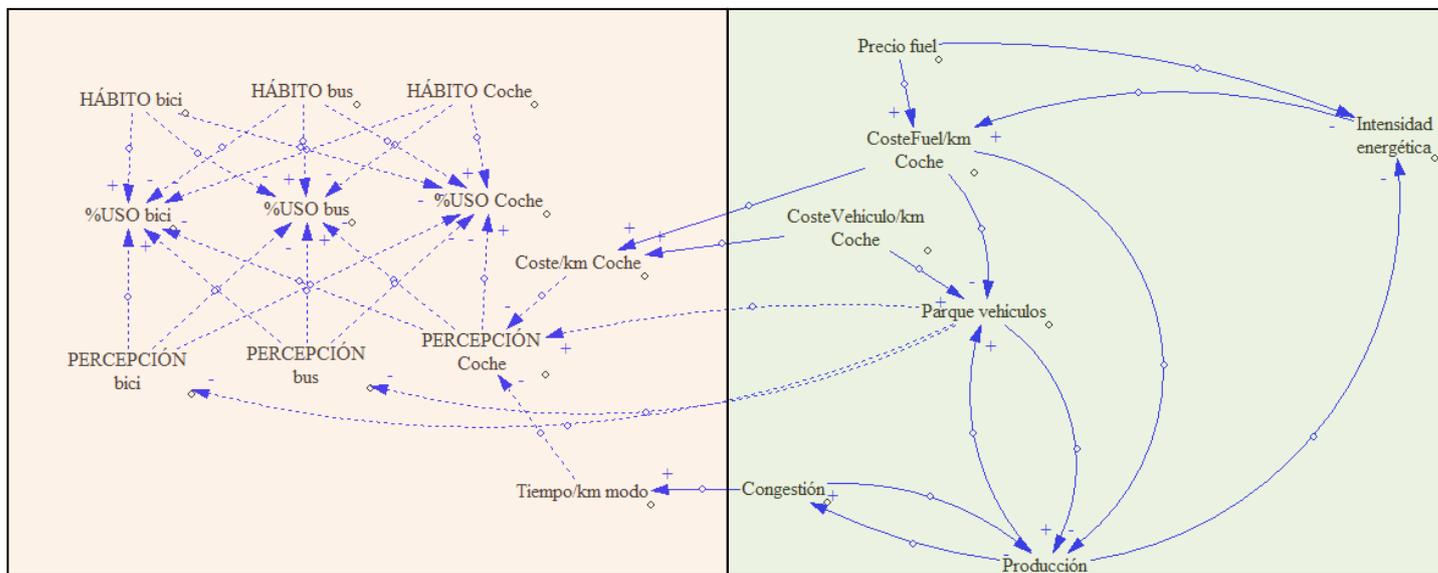


Figura 39 – Diagrama causal del modelo 1. No aparece el Sub-bloque de reparto modal completo.

2- El segundo modelo: causalidad

Este segundo modelo está basado en las relaciones causales entre distintos factores del “sub-bloque” de producción del transporte y también en la configuración de la variable Hábito. Además, los resultados del modelo de “reparto modal” serán resultados de % de cuota de cada modo con respecto a la producción de transporte y no con respecto a la movilidad, como era en el modelo anterior. Esto se debe a las características del nuevo modelo, en el que es necesario contemplar este aspecto para poder cuantificar las variables que intervienen en el “sub-bloque” de producción.

i. Cambios en la forma de modelar el Hábito.

Dado que el hábito se había modelado con los resultados de una correlación entre los determinantes considerados influyentes del reparto modal que representan las Destrezas de la población para Apropiarse de los distintos modos y con este nuevo modelo se quieren evitar las correlaciones, se ha replanteado la formulación de esta variable para que tan solo represente la influencia positiva o negativa de los distintos determinantes para cada modo o medio.

Dado que no se va a correlacionar, se pueden incluir variables de las que antes no había datos con suficiente consistencia o redefinir las variables que intervienen. Las variables que definirán el Hábito serán:

- Ocupación (OCU): el porcentaje de población ocupada.
- Ingresos medios (I): los ingresos medios de la población total.
- Hogares con niños (TH): el porcentaje del total de hogares en los que hay niños. Se escoge esta variable por ser la que según las referencias [11] es el elemento más

significativo por el que merece la pena incluir el tipo de hogar como determinante de la elección modal.

- Población metrópolis (%pob. Metro): el porcentaje de población en áreas metropolitanas o ciudades de más de 500.000 personas. Variable muy relacionada con los aspectos del Acceso relacionados con el urbanismo (accesibilidad infraestructuras, aparcamiento, disponibilidad transporte colectivo...)
- Población ciudades (%pob. Ciud): el porcentaje de población en municipios entre 10.000 y 500.000 habitantes que no son área metropolitana. De esta forma queda fuera de las influencias los municipios rurales, dado que se va a tomar como hipótesis para los escenarios que los cambios en la estructura de la población en el territorio se va a dar principalmente por una polarización entre áreas rurales y municipios pequeños y grandes áreas metropolitanas, reduciendo el tamaño de las ciudades intermedias.
- Género (GEN): el porcentaje de población femenina y que está vinculada principalmente a tareas de “cuidados” y a la reproducción social, en sentido económico. Por ello este indicador no es exactamente el % de mujeres en la población, sino el % de personas que viven acorde al rol tradicionalmente asignado al género femenino y que tienen un fuerte impacto en la elección modal.

El Hábito se definirá entonces en base a un valor de referencia vinculado al reparto modal del momento de referencia de la simulación combinado con el producto de las variaciones porcentuales de estas variables a lo largo del tiempo. Todo ello con un retraso de 3 meses de tercer orden que represente la rigidez que por definición tiene asociada la variable Hábito. Al ser una variable de información, este retraso se modelará mediante SMOOTH en el software utilizado.

$$Hábito = SMOOTH3I\left(\frac{OCU}{OCU_{ref}} \cdot \frac{I}{I_{ref}} \cdot \frac{\%pob.metro}{\%pob.metro_{ref}} \cdot \frac{\%pob.ciud}{\%pob.ciud_{ref}} \cdot \frac{TH}{TH_{ref}} \cdot \frac{GEN}{GEN_{ref}}, 3, referencia\right)$$

La relación de estas variables, si son positivas o negativas para cada modo se ha asignado consultado los datos de las encuestas Movilia 2006 del Ministerio de Fomento y de la Encuesta de Hogares y Medio Ambiente de 2008 del INE. En ellas se compara la cuota de uso de cada modo media con la cuota vinculada a la variable en cuestión y si la cuota de la variable es menor se atribuye una relación negativa y viceversa. Todas las relaciones dan resultados consistentes. Las que parecen contra-intuitivas se comentan en su tabla.

Hábito BUS	OCU	+	
	I	-	
	TH	-	Aunque para los hogares de mayores de 50 años con niños es mucho más común en bus y otros transportes públicos, este tipo de hogares son minoría frente a los de parejas jóvenes con vehículo propio.
	%pob. Metro	+	

	% pob. Ciud	-	
	GEN	+	

Hábito OTROPUBLIC	OCU	+	
	I	+	En este medio se incluye el tren, lo que explicaría que un aumento de ingresos fuera asociado a un aumento del uso, especialmente en grandes ciudades.
	TH	-	
	% pob. Metro	+	
	% pob. Ciud	-	
	GEN	+	

Hábito COCHE	OCU	+	
	I	+	
	TH	+	
	% pob. Metro	-	
	% pob. Ciud	+	
	GEN	-	

Hábito MOTO	OCU	+	
	I	+	
	TH	-	Parece intuitivo que en los hogares con niños el uso de motos y ciclomotores caiga.
	% pob. Metro	+	Este dato está agregado al de vehículos y no permite ver en las encuestas si en grandes ciudades hay más uso de moto, lo que parece lógico debido a la mayor congestión y menor aparcamiento.
	% pob. Ciud	+	
	GEN	-	

Hábito BICI	OCU	-	
	I	+	
	TH	-	

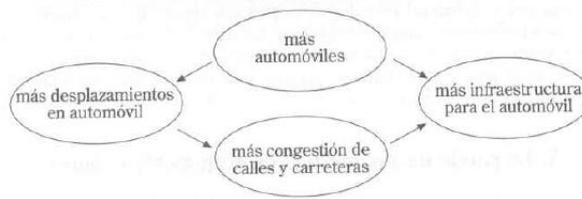


Figura 41 – “La rueda de la infraestructura del transporte” [4]



Figura 42 – “La rueda del espacio del transporte”. [4]

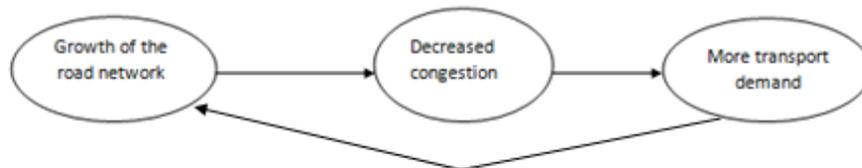


Figura 43 – Relación que provoca la demanda inducida. Elaboración propia basada en referencias. [57]

De forma resumida muestran algunas de las relaciones que van a servir como hipótesis para el modelo. Las relaciones se enumeran y explican a continuación, así como también se explica cómo se reflejará la relación en el modelo.

Diagrama 1 (Figura 40):

1: Vehículos \longrightarrow + Producción

Más vehículos provocan más producción de transporte en automóvil

Esta relación está entre las hipótesis del modelo apoyada en las conclusiones de los estudios de V. Kaufmann [58]. Kaufmann realiza un estudio entre Berna, Génova, Lausana y Grenoble, 4 ciudades de tamaño similar (300.000-400.000 habitantes) con distintas tradiciones culturales y composiciones sociales. La relación entre disponibilidad de vehículo y producción de transporte en automóvil se hace por exclusión, dado que la disponibilidad de vehículo hace que los cambios en otros medios o modos sean más indiferentes: “L’amélioration de l’offre de transports publics qui a été consentie est sans impact sur l’usage de ce moyen de transport parmi les personnes qui disposent d’une automobile”.

En el modelo la producción de transporte en automóvil es una función del % de uso de coche y de la demanda total de transporte, donde el % de uso de coche será una de las variables del modelo y la demanda total del transporte será un “input” sobre el que se lanzarán distintas hipótesis.

Dado que el parque de vehículos ya afecta a la percepción de los modos y por tanto, a la cuota de producción que se hace en coche, así es como se establece la relación entre Vehículos y Producción en el modelo.

2: Producción \longrightarrow - Percepción BICI y PIE

Más desplazamientos en automóvil son más dificultades para bicicletas y peatones y por tanto, peor percepción.

Esta relación no se había contemplado anteriormente y se consideraba incluida en las características de Densidad de población y cantidad de población urbana, esto es, relacionada a aspectos de urbanismo. Sin embargo, esta forma de englobar el efecto que un urbanismo condicionado por la circulación motorizada oculta algunos efectos inmediatos vinculados a la percepción de seguridad que tienen peatones y especialmente ciclistas, colectivo especialmente susceptible a este aspecto según referencias [46].

Esta relación se incluirá en el modelo haciendo que la producción de transporte en automóvil afecte de la misma forma a la percepción de BICI y PIE que el parque de vehículos.

3: Producción \longrightarrow + congestión

Más desplazamientos en automóvil producen mayor congestión.

Esta relación que parece intuitiva y que está apoyada en referencias, hace que haya que replantear la forma de modelar la congestión.

La congestión se estudia como la duración real de los trayectos menos la duración libre teórica. [59]

$$\text{cong} = \text{duración real} - \text{duración libre teórica}$$

La duración de estos trayectos se calcula como la división de la producción entre las velocidades medias reales y las velocidades libres teóricas. Las velocidades reales se obtienen del anexo metodológico de las Cuentas Ecológicas del Transporte [5] y como velocidades libres se asignan 50 km/h en ciudad y 100 km/h en interurbano, por lo que hay que separar para este cálculo la producción en cada ámbito según los datos de la misma fuente. De esta forma se obtiene un valor agregado de horas perdidas en todos los desplazamientos en automóvil.

4: Congestión \longrightarrow + tiempo COCHE y BUS

Más congestión supone más tiempo en los viajes para automóviles y autobuses.

Esta relación, obvia, implica que ese agregado de horas perdidas por todos los desplazamientos por la congestión se traduzca a un tiempo medio perdido por kilómetro recorrido. Para ello se divide el valor de la congestión (cong) por la producción (VKA) obteniendo así un valor orientativo.

Por otro lado, la congestión no afecta igual a coches que a autobuses. Según un estudio del RACC, en Madrid en 2.009, la congestión afectaba de tal forma que las horas perdidas se repartían en: 32% horas perdidas por usuarios de transporte público, 68% automóvil. Se usará esta referencia.

5: USO BICI, PIE, BUS \longrightarrow - Vehículos

Mayor movilidad ciclista, peatonal y en bus implica un menor número de vehículos.

O lo que es lo mismo: USO COCHE \longrightarrow + Vehículos

Mayor movilidad en automóvil implica mayor número de vehículos.

Según esta relación, un mayor uso de otros modos hace que haya menos vehículos, lo que se puede traducir (por la relación complementaria entre el uso de cada modo) que un aumento del uso del automóvil se traduce en un aumento de los vehículos. Esta afirmación casa bastante bien con la realidad comercial actual, en la que se incentiva la compra de vehículos justificándola en un aumento de su uso a nivel general.

Esta relación significa un cierto grado de retraso, porque esta relación no es inmediata, sino que se manifiesta en tendencias temporales que aquí se van a aproximar como semestrales.

Diagrama 2 (Figura 41):

1: Vehículos \longrightarrow + KM RED

Más número de vehículos hace que haya que construir más red de carreteras.

Esta afirmación, que podría parecer intuitiva, se desmonta con la experiencia y con la expectativa creada, tal y como se ha repasado al ver la legislación. Como el contexto en el que este estudio se desarrolla está bastante acotado, esta afirmación de carácter general no se va a aplicar por la realidad actual en la que las inversiones en infraestructuras de transportes están motivadas por muchos motivos ajenos al sector del transporte y a las necesidades movilidad y que por tanto se escapan del alcance de este modelo.

2: Congestión \longrightarrow + KM RED

La congestión hace que se tengan que invertir más en construir y ampliar infraestructuras.

Como se ha indicado con la relación anterior, los motivos que guían la política de infraestructuras se escapan del alcance de este modelo. Sin embargo, sí parece razonable que si por circunstancias del modelo se disparase la congestión, hubiese una ampliación de la red. En la realidad esto parece realista dado que en el caso de congestiones imprevistas y persistentes sí que puede darse el caso de que se produzcan desdoblamientos de vías en periodos de tiempo de mínimo un año.

Por lo tanto, en la evolución de los kilómetros de red se incluirá la posibilidad de aumentar un % en el caso de que la congestión por persona supere un límite de y que actuará con un retraso de un año.

Diagrama 3 (Figura 42):

1: Vehículos \longrightarrow - Densidad de población

Más cantidad de vehículos permiten y provocan una menor densidad de población.

La relación entre urbanismo y transporte es tan reconocida como reconocida es su complejidad. Es muy complejo establecer causalidades o procesos claros universalizables entre el desarrollo del transporte y el desarrollo urbano, puesto que estos desarrollos están absolutamente vinculados con la realidad local y regional en la que se desarrollan. Sin embargo es un lugar común en el urbanismo moderno el hecho de que la disponibilidad de vehículos es lo que ha desarrollado determinadas formas de ciudad sólo posibles con esta tecnología. [23] Pero de la misma medida en que no hay reglas claras que delimiten el comportamiento del desarrollo de infraestructuras, no las hay para el desarrollo urbanístico.

En el modelo, para incluir esta realidad, se va a hacer una aproximación burda pero que refleje este hecho. En la variable DENS se va a incluir el efecto del crecimiento o decrecimiento del parque de vehículos de forma que los cambios en él afecten a la densidad de población. Todo esto irá acompañado de un retraso de tercer orden de 10 años (120 meses), que es el tiempo que

se adopta como hipótesis en el que se notan los cambios urbanísticos. Así, la expresión de DENS es:

$$DENS = Delay3I\left(\frac{Población}{Superficie} \cdot \frac{VEH inicial}{VEH}, 120, \frac{Población}{Superficie}\right)$$

2: Densidad de población \longrightarrow + USO BUS, BICI, PIE

Una mayor densidad de población implica un mayor uso de los modos Bus, bicicleta y peatonal.

Esta afirmación, en sintonía con la anterior, ya queda contemplada en el modelo desde el momento en que la cantidad de población que vive en según qué tipo de área urbana afecta al reparto modal. Pero esta relación incluye el efecto que tienen los cambios en la densidad de población sobre el reparto de la población en tipo de municipios. Se va a suponer como hipótesis, que un aumento en la densidad de población implica un aumento en el porcentaje de población en áreas metropolitanas en detrimento de las ciudades intermedias, suponiendo el medio rural como ajeno a las dinámicas de emigración-inmigración. Este impacto se traduce en cambios en el Acceso a estos modos y por tanto, en el Hábito.

Por lo tanto la densidad de población tendrá un impacto inmediato positivo respecto a la población que vive en metrópolis y negativo respecto a la gente que vive en ciudades medias. Todo con el tope de dejar las ciudades medias a 0 y que todo su porcentaje pasara a ser de las áreas metropolitanas, caso en que dejarían de crecer.

3: Densidad de población \longrightarrow +Vehículos

Una mayor densidad de población implica un crecimiento del parque de vehículos.

Esta segunda relación es el espejo de la primera de este bloque de relaciones. Un urbanismo disperso implica dificultades para los otros modos y eso provoca una necesidad de usar el automóvil y por tanto, un estímulo para la compra de nuevos vehículos.

Esta realidad en el modelo se va a representar indirectamente, dado que el aumento de densidad de población, por las otras relaciones vistas hace aumentar la cuota de producción mediante automóvil, esta cuota será lo que afecte al aumento del parque de vehículos.

El parque de vehículos se modelará como un nivel, vinculado a los flujos de compra de vehículos y desecho de los mismos. Para ello intervienen varias variables:

- Vida útil de los vehículos: 13 años según las cuentas ecológicas [5]. En meses son 156 meses. Sin embargo, con esta vida útil, en 2.006, con el parque de vehículos de 21 millones de vehículos, las bajas serían de 134.950 vehículos, cuando según los datos de DGT fueron 910.000 en ese año, unos 75.800 al mes. Esta diferencia, muy significativa, apunta hacia que posiblemente el ciclo de vida de los vehículos sea mayor. Para que las bajas en 2.006 fueran en el modelo las 75.000 el mes, la vida útil serían 277 meses, 23 años. Lo cierto es que 23 años de vida media de un vehículo es bastante elevado, aunque se comprende dado que este dato muestra el tiempo medio en que los vehículos están matriculados, aunque no estén en uso cotidiano. Por ello, se va

a fijar como vida útil un punto intermedio entre los 13 y los 23 años: 216 meses, 18 años de vida media para un vehículo.

Se considera que los ingresos medio influyen en la vida útil de los vehículos, alargándola o acortándola. Por ello la vida útil estará relacionada con los ingresos de forma que el impacto no sea muy alto pero sí que se deje notar la tendencia general vinculada al nivel económico de la población.

- Precio de los vehículos/Ingresos medios: el precio de los vehículos entre la renta media es un parámetro que sirve para representar el encarecimiento o abaratamiento relativo a la renta para comprar un coche nuevo. Al ser este el parámetro que previsiblemente tenga más influencia sobre el comportamiento de la población a la hora de comprar o no vehículos, especialmente por el lado de la renta, se hace que tenga un efecto cuadrático sobre la compra de vehículos.
- Uso coche: los cambios en la cuota de producción de transporte que cubre el automóvil son un estímulo para la compra de nuevos vehículos, como se ha visto en la relación 5 del primer diagrama.
- Tope de vehículos/persona: en la realidad el crecimiento del parque de vehículos no es ilimitado, dado que en el marco de la movilidad no tiene sentido que haya más de un coche por persona, excluyendo los minoritarios usos del automóvil como símbolo de ostentación. Se fijará ese tope de 1 vehículo por persona como el máximo que saturaría el mercado. Se tiene en cuenta que gran parte de la población es menor de edad o no está capacitada para tener y conducir un automóvil, pero esta realidad se compensa con la parte del parque para usos laborales o públicos.

Diagrama 4 (Figura 43):

1: KM RED \longrightarrow -Congestión

Más kilómetros de red implican menor congestión.

Esta relación es intuitiva y obviando el efecto rebote que puede provocar que una red con mayor capacidad pueda volver a saturarse por el abaratamiento que supone acabar con la congestión inicial, es válida.

La forma de incluir esta relación es afectando a las velocidades medias que a su vez definen la congestión. Se supondrá que las velocidades medias están afectadas por los cambios en la extensión de la red, por un lado para la red urbana y por otro para la interurbana.

2: Congestión \longrightarrow - Producción

Más congestión implica menor producción de transporte.

Esta relación está ya recogida en la relación 4 del primer diagrama, puesto que al aumentar la congestión el tiempo de transporte la Percepción del modo cae.

Este nuevo modelo tiene un diagrama causal que es como sigue (no se incluyen todas las variables, a la izquierda aparecerían el resto de modos):

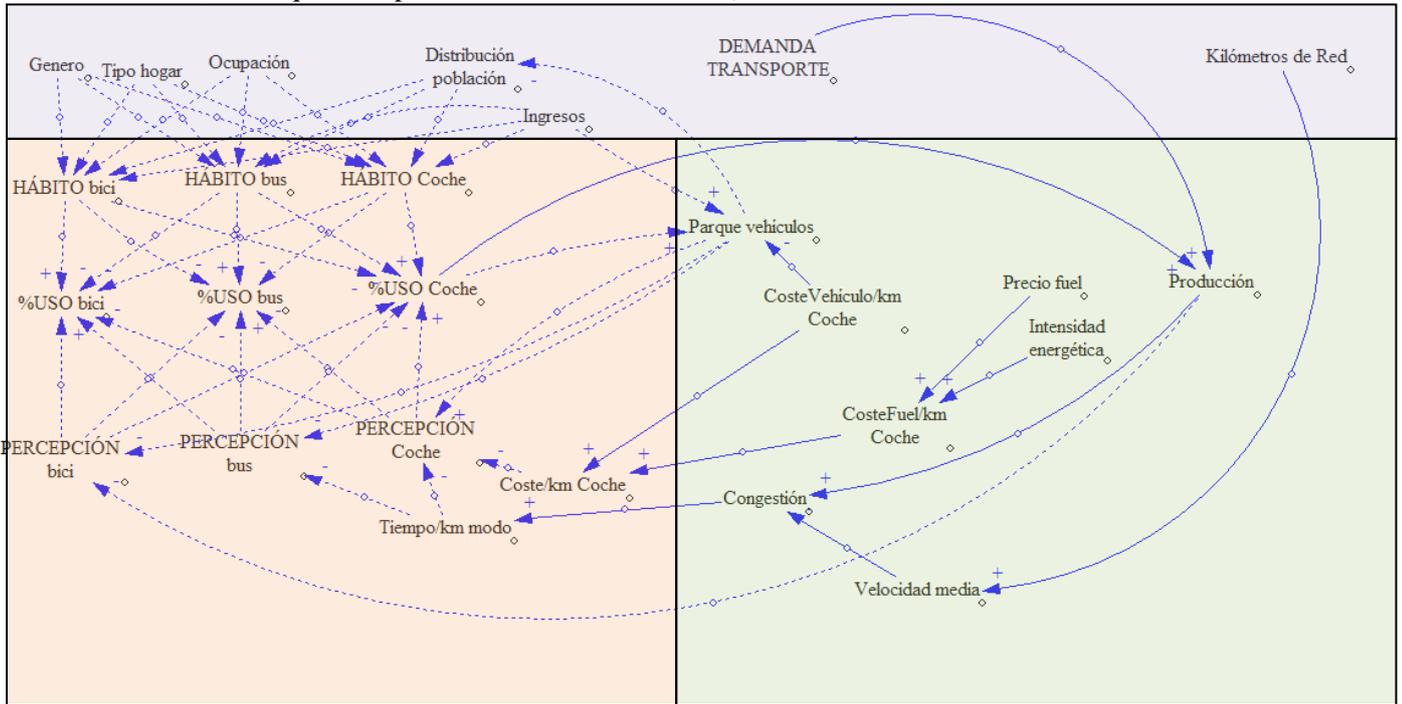


Figura 44 – Diagrama causal del modelo 2.

Y el diagrama de Forrester del sub-bloque de producción de transporte queda:

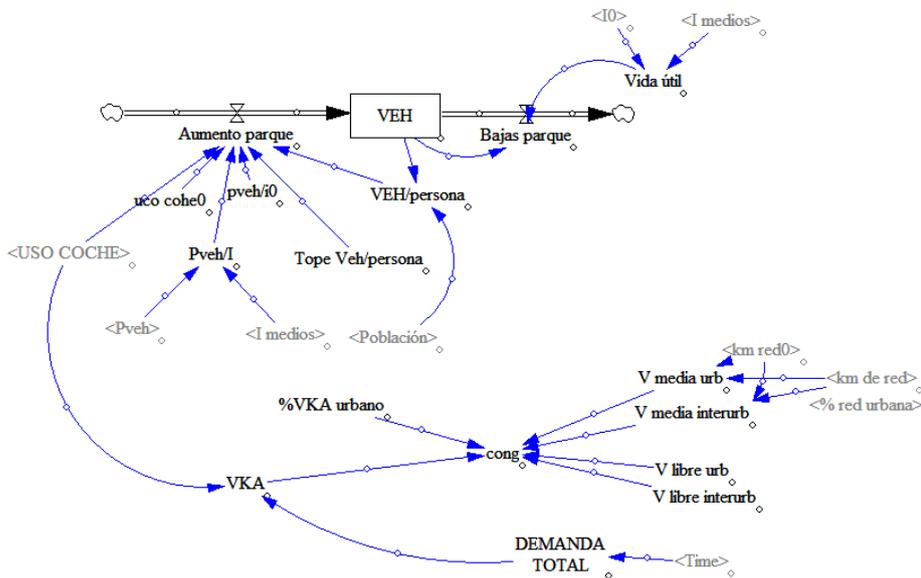
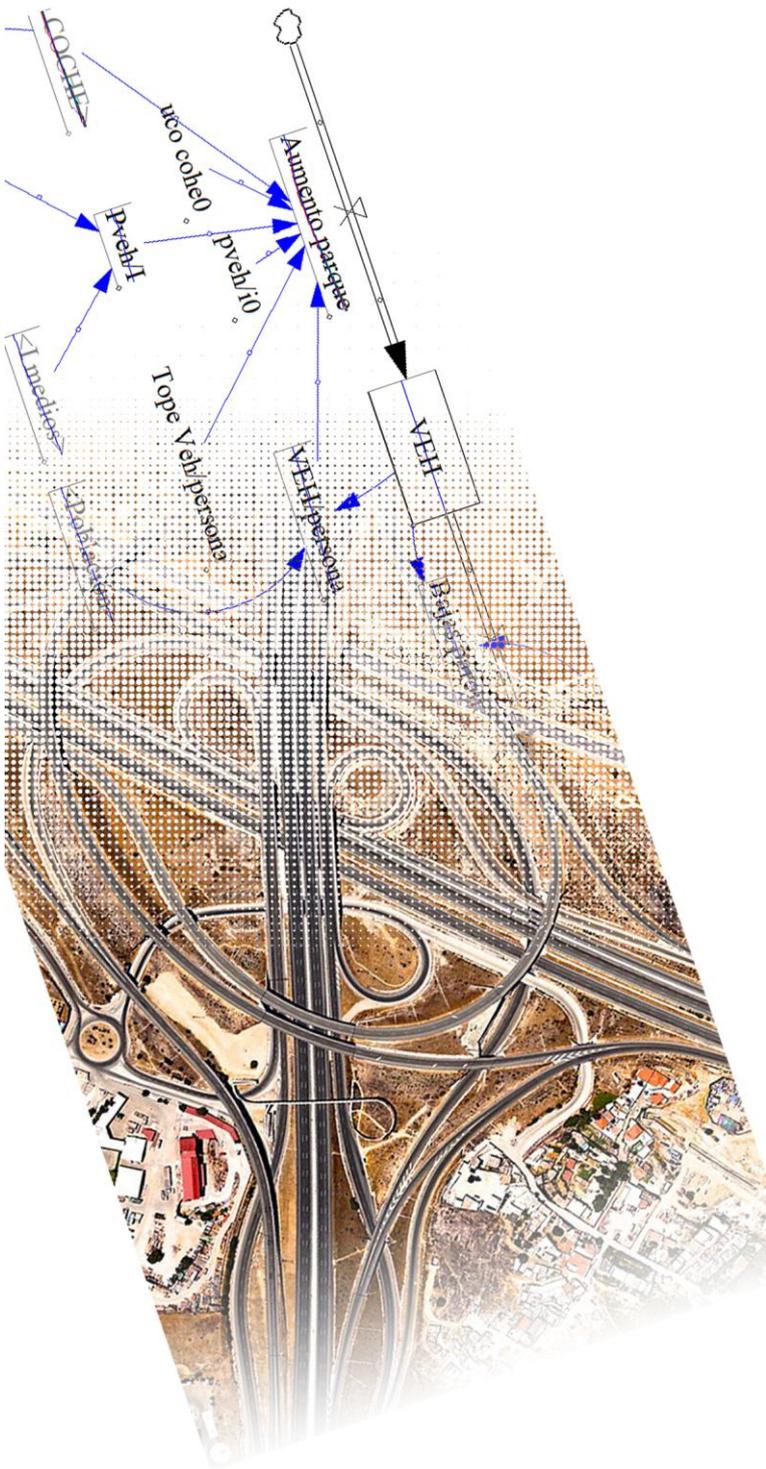


Figura 45 – Diagrama de Forrester del sub-bloque de producción del transporte en el modelo 2.

La relación de todas las variables de este modelo queda recogida en el ANEXO3.

CAPÍTULO 7

SIMULACIÓN Y RESULTADOS



a. Primer modelo

1. Resultados obtenidos en la simulación

En al siguiente simulación se ha partido de los datos reales del INE para las variables de entrada, de las cuales hay datos para todas para el año 2006. Las que están más limitadas son las variables población urbana y población rural, sacadas de la encuesta “*Movilia 2006*” [47] y sin encontrar datos equiparables que sirvan para trazar una serie histórica. Las variables I<1000 y las de Tipo de hogar (TH) también están limitadas entre 2005 y 2.011. A partir de ahí se mantienen constantes.

En todo caso estos datos se toman como punto de partida para estudiar los escenarios posibles hasta 2030.

Se van a estudiar 3 escenarios:

	Escenario 1: BAU	Escenario 2: BAU+CE	Escenario 3: BAU+CE+Peak oil
Descripción	Escenario con un crecimiento económico como el de 2007.	Escenario con un crecimiento económico como el de 2007 e implementando las medidas de la CE de aumentar la eficiencia energética.	Escenario con un crecimiento como el 2007, implementando las medidas de la CE y en un escenario post-peak oil
Implicación en las variables a partir de 2013: crecimientos anuales	Km red: 321.600 km/año	Km red: 321.600 km/año	Km red: 321.600 km/año
	población: 744.000 personas al año	población: 744.000 personas al año	población: 744.000 personas al año
	adultos: 617.000 adultos/año	adultos: 617.000 adultos/año	adultos: 617.000 adultos/año
	tamaño ciudades: 2,2% al año	tamaño ciudades: 2,2% al año	tamaño ciudades: 2,2% al año
	Licencias: 653.459 licencias al año	Licencias: 653459 licencias al año	Licencias: 653.459 licencias al año
	Ingresos medios: 1	Ingresos medios: 1	Ingresos medios: 1
	Pfuel: 3,6% anual	Pfuel: 6% anual	Pfuel: 10% anual
	Otros costes: 2,7% anual	Regulación: 0,33 anual	Regulación: 0,33 anual
	Potros: 2,7% anual	Potros: 2,7% anual	

Tabla 24 – Escenarios y variación anual de cada variable en cada escenario para el modelo 1.

ESCENARIO1: BAU (Bussines As Usual)

Se considera que a partir de 2013 se vuelve a un escenario de crecimiento económico similar al de 2007. Esta suposición es obviamente irreal puesto que ya se aprecia a las puertas de 2015 que esta tendencia no ha vuelto ni a nivel global ni a nivel regional. Sin embargo se toma como referencia para estudiar la viabilidad de determinado modelo de crecimiento económico y sus implicaciones asociadas (crecimiento de población, concentración urbana, aumento de ingresos y precios, aumento de infraestructuras...).

Para este escenario se ha supuesto un desarrollo económico, político y social similar al de la época 2006-2007:

- **construcción de carreteras:** se toma como la media anual de crecimiento en la década 1997-2007. Se toma una década porque la construcción de carreteras es un proceso

largo en el tiempo y tomar un solo año puede ser engañoso, por lo que se toma esa década como ejemplo de periodo de expansión económica. Se toman los datos de Anuario Estadístico del M° de Fomento del año 2012, tabla 7.1, para la red de carreteras no municipales, que son las que crecen, dado que como se explicó en el repaso de situación, las carreteras municipales en la mayoría de los casos ahn llegado a su máximo desarrollo. Por tanto tenemos que entre 1997 (162.795 Kkm) y 2007 (166.011 Kkm) ha habido un crecimiento anual promedio de: 321.600 km/año.

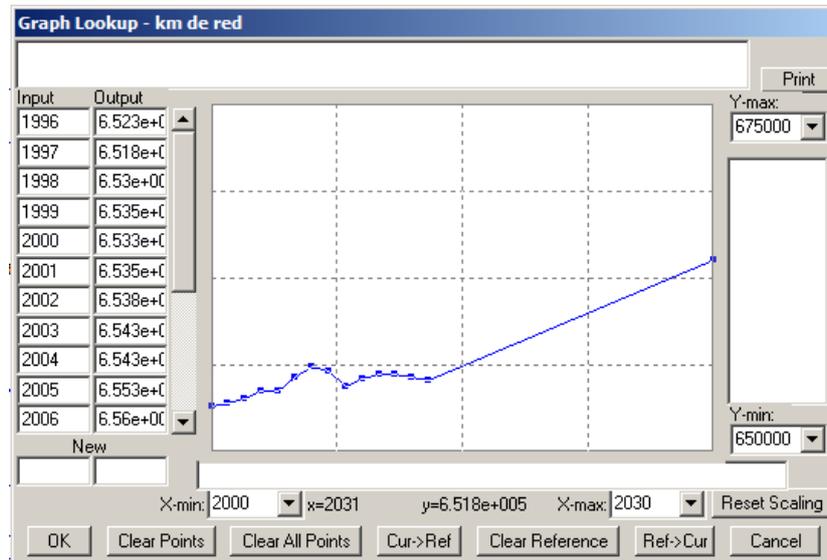


Figura 46 – Evolución de la red de carreteras en las simulaciones del modelo 1

- **aumento de población:** se coge la diferencia entre la población de 2006 (44.009.971) y la de 2007(44.784.666), datos a 1 de enero según Eurostat, que es 744.000 personas/año. De este indicador se modela el crecimiento de un solo año por ser el crecimiento de población una variable exponencial y que aquí se va a modelar como lineal, por lo que se toma el valor de un año de crecimiento elevado para simular un crecimiento que previsiblemente sea mayor.

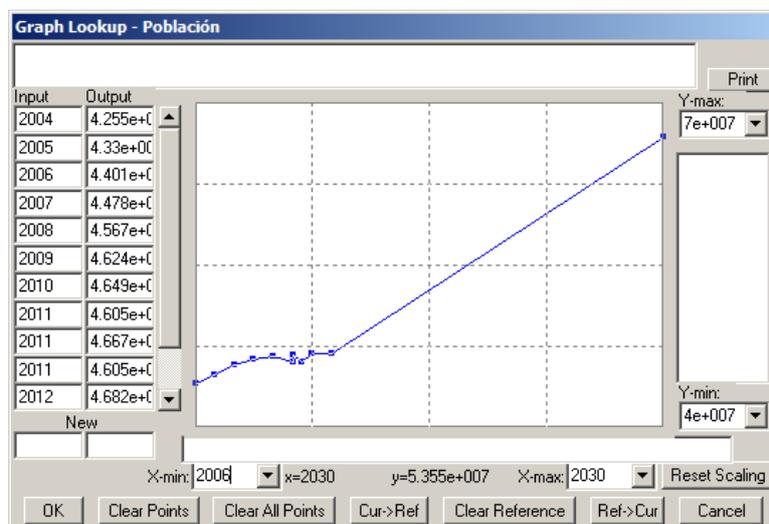


Figura 47 – Evolución de la población en las simulaciones del modelo 1

- **aumento de población adulta:** siguiendo la misma lógica que con la población, se toma la diferencia entre la población mayor de 15 años (tomada como adulta para este modelo) y su diferencia entre 2006 y 2007 dan los 617.000 adultos nuevos al año.

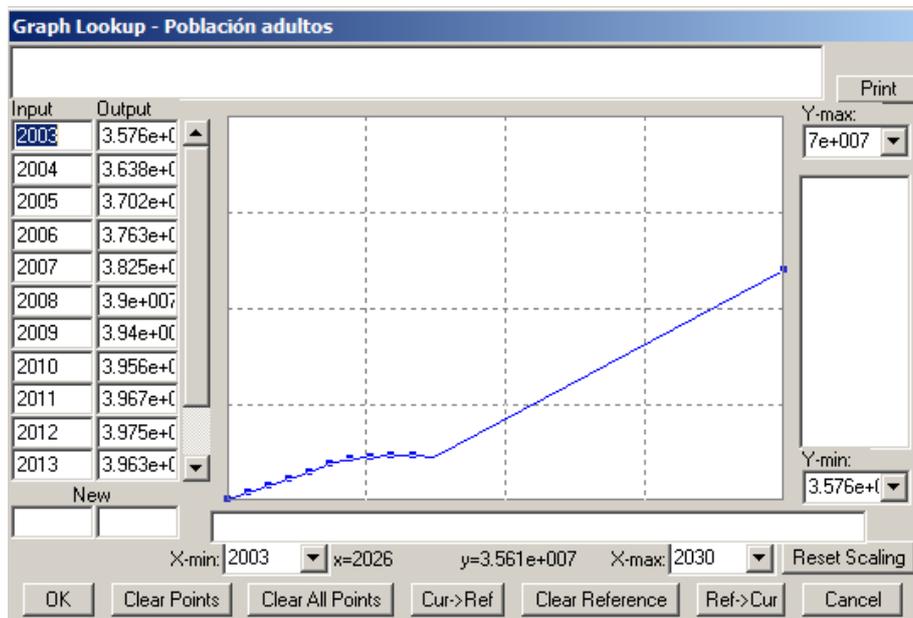


Figura 48 – Evolución de la población adulta en las simulaciones del modelo 1

- **aumento de los permisos de conducción:** también, con la misma explicación que el aumento de población, se toma el aumento de licencias de conducción expedidas entre 2006 y 2007: 653.459 licencias nuevas al año.

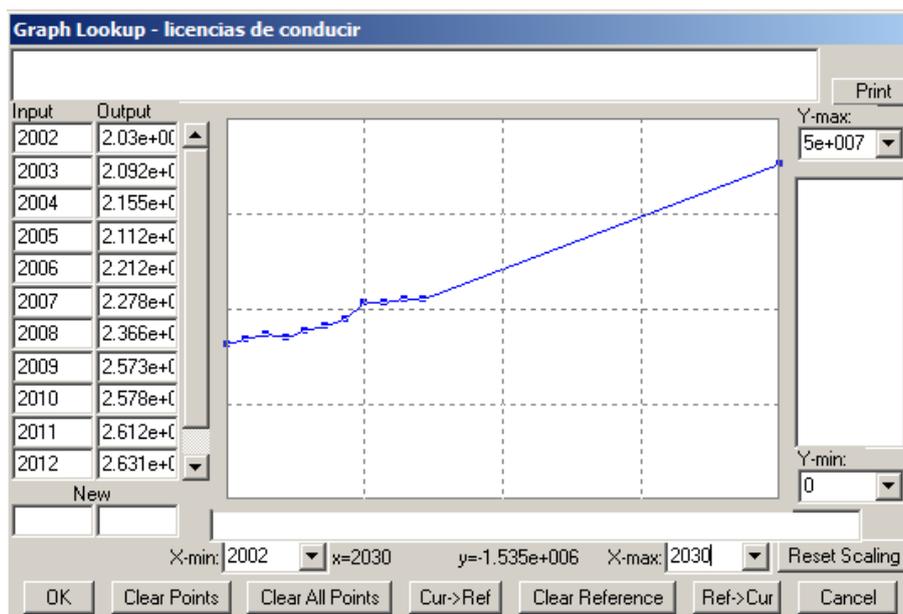


Figura 49 – Evolución del número de permisos de conducción las simulaciones del modelo 1

- **aumento de los ingresos medios:** este indicador puede ser el más directamente influido por el PIB. Se ha tomado la misma referencia que para otros parámetros, la diferencia

entre 2006 y 2007 en la renta media que es 977 € mensuales de diferencia, que se redondea a 1.000 € de diferencia al mes.

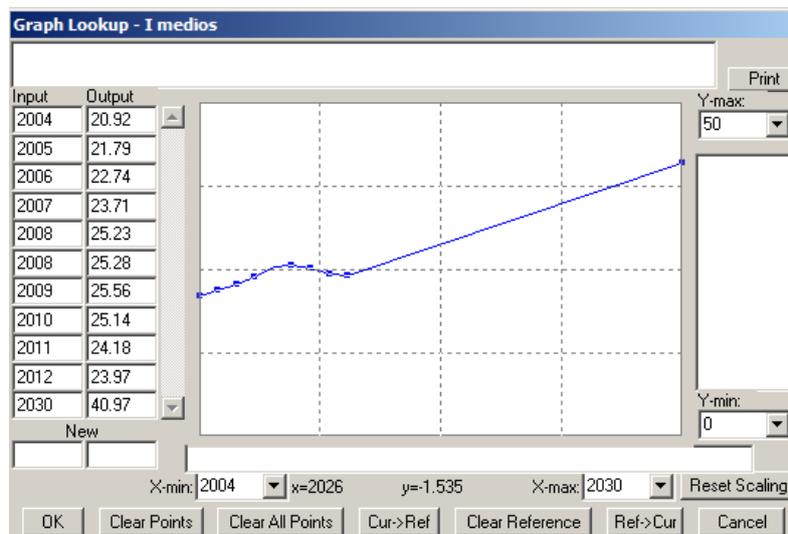


Figura 50 – Evolución de los ingresos medio en las simulaciones del modelo 1

- **aumento de la proporción de población que vive en ciudad:** este parámetro se ha estimado con la misma lógica de tomar de referencia el escenario de 2007 y con los datos de aumento de población mundial urbana de ese año del Banco Mundial [50]. Ese aumento en 2007 fue del 2,2% de la población que ya vivía en ciudad, por lo que se toma ese dato, a falta del dato de aumento de la población urbana en el ámbito del estudio.
- **subida del precio de los combustibles:** similar a la subida entre el año 2006 y 2007 (de 118,5 a 122,8 c€/l) [48] lo que supone una subida del 3,6% anual sobre el precio no del barril de petróleo sino del percibido por quién consume, incluyendo impuestos y tasas de ganancia.
- **otros costes:** para modelar el coste de otros consumos (precio de vehículos, precios de abonos...) se ha tomado el aumento del IPC de 2007 como referencia, con datos del INE, que se situó en un 2,7%.
- **regulación en materia de eficiencia energética** constante, esto es, estancada en las medidas de la primera década del 2000.

ESCENARIO 2: BAU+CE

En este escenario se modela un desarrollo económico, político y social igual al del anterior escenario: basado en las tendencias previas a 2007 y por tanto, “sin crisis”. Sin embargo se añaden 2 cambios: la regulación para 2050 se considera que está en su máximo grado de exigencia y que desde 2014 a 2050 se aplica gradualmente e igualmente repartida en el tiempo. Esto se representa haciendo que la variable REGULACIÓN en 2030 tenga su máximo valor, 10. Por otro lado, como medida más simplemente representable es el aumento impositivo sobre los carburantes, por lo que la subida del precio del combustible se hace unos puntos por encima de lo modelado en el modelo BAU, pasamos de 3,6% anual al 6%.

ESCENARIO 3: BAU+CE+Peak oil

En este escenario se quiere representar la hipótesis de la escasez de recursos energéticos [49] combinada con un modelo económico y social similar al del primer escenario y suponiendo que esta escasez sólo se manifiesta en el coste de los productos petrolíferos, cuando toda la bibliografía indica que los efectos serían mucho más complejos y amplios. Para ello, la única modificación que se añade es una subida más notable del precio del combustible, con subidas del 10% anuales, lo cual no es exagerado en los últimos 5 años, dado que es la subida que se dio entre 2007 (122,8 c€/l) y de 2008 (136,2 c€/l). Por lo tanto, según la previsión de determinados escenarios de la bibliografía de referencia, es un dato moderado y por lo tanto “optimista”.

Los **resultados** obtenidos se muestran a continuación. En ellos se representarán las principales variables estudiadas en el modelo: el reparto modal por un lado y la producción de transporte en automóvil, el parque de automóviles, la congestión y la intensidad energética por otro.

Los resultados se muestran a continuación, para una simulación entre 2006 y 2030 mes a mes (a intervalos de 0.08 años):

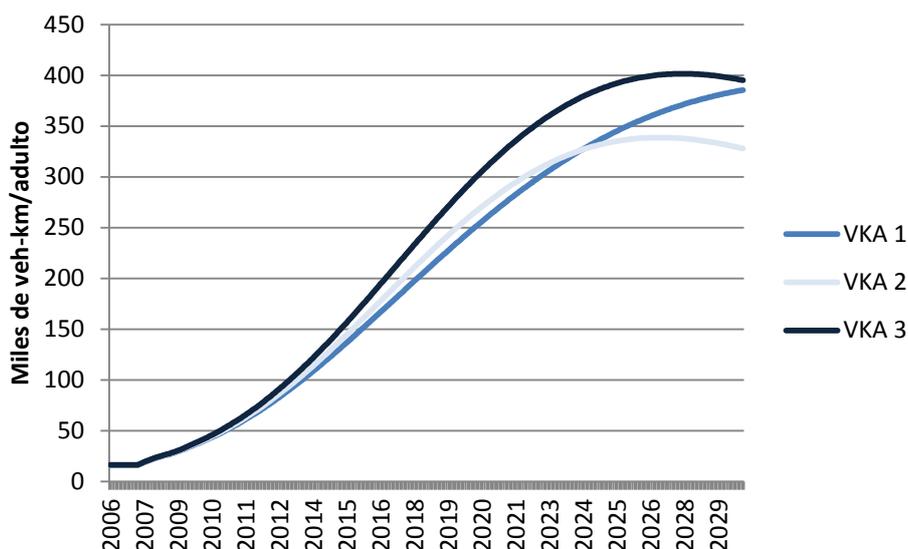


Figura 51 – Evolución de la producción de transporte en automóvil por adulto según el modelo

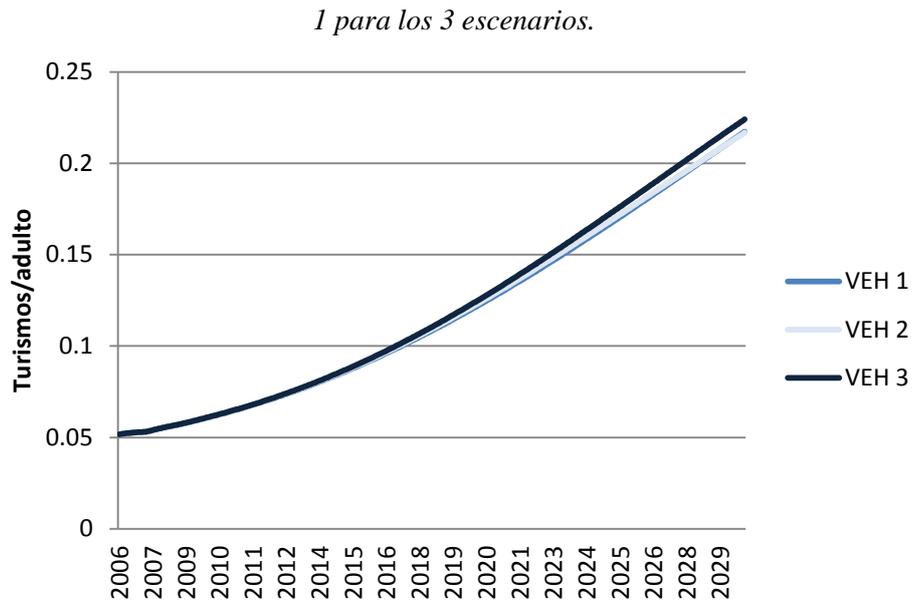


Figura 52 – Evolución del parque de turismos por adulto según el modelo 1 para los 3 escenarios.

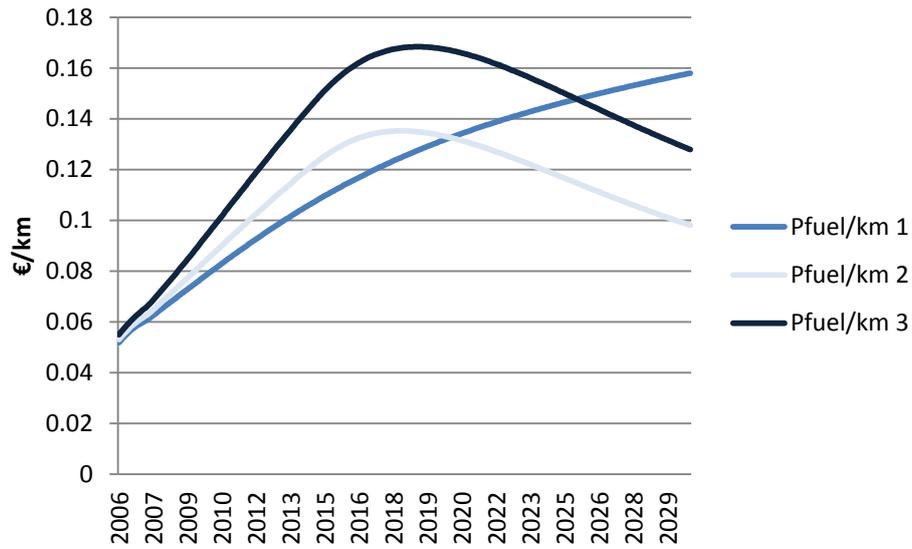


Figura 53 – Evolución del precio específico del combustible según el modelo 1 para los 3 escenarios.

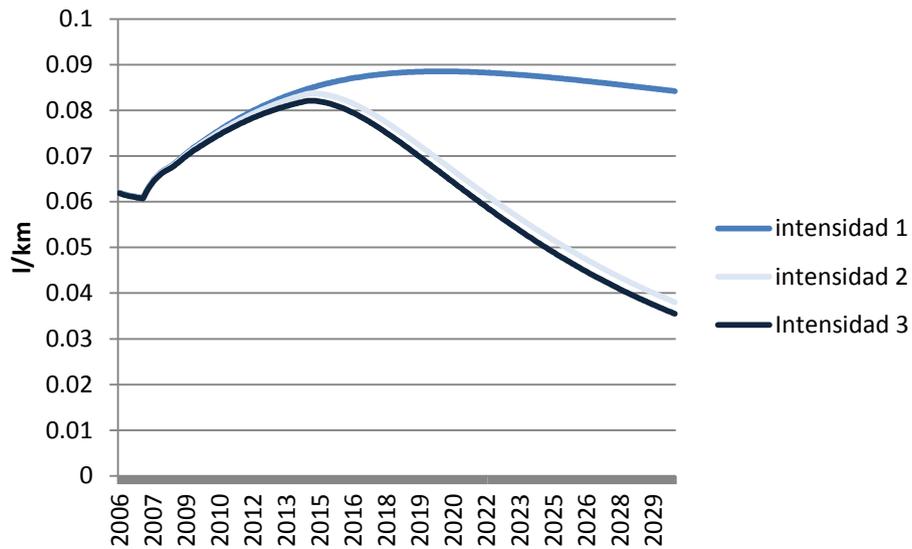


Figura 54 – Evolución de la intensidad energética total según el modelo 1 para los 3 escenarios.

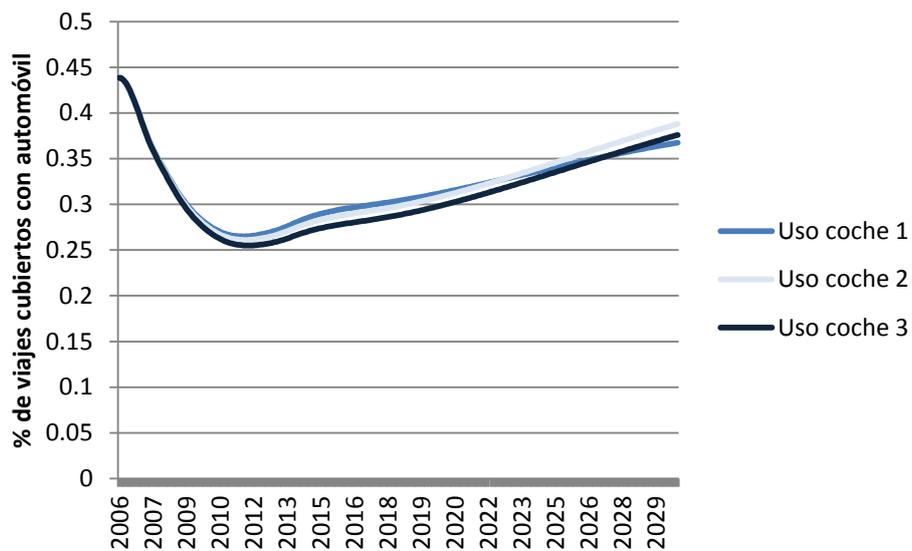


Figura 55 – Evolución de la cuota de movilidad cubierta con automóvil según el modelo 1 para los 3 escenarios.

Las principales conclusiones que se puede extraer tan sólo del análisis de estas gráficas de tendencias son:

- La importancia del efecto rebote: en los escenarios 2 y 3, al aumentar la eficiencia energética, el precio tiene una evolución que hace que haya un consumo mayor.
- El parque de vehículos no se ve afectado por las políticas de eficiencia energética, sino por las otras variables.
- El modelo de producción no muestra los efectos de la contracción económica del primer tramo de simulación, lo que significa que tienen mucho más peso las variables endógenas del modelo.

- La intensidad energética tiene una evolución positiva entre 2006 y 2014 y luego cambia su tendencia en los modelos con regulación. La realidad es distinta. Si se toma la intensidad energética como la cantidad de gasóleo A y gasolina dividida entre la producción del transporte en veh-km, se obtiene un parámetro equivalente en cuanto a evolución con el del modelo, si bien es cierto que no todo el gasóleo A se consume para el transporte de turismos, pero la fracción es desconocida en los datos que aporta en “*Anuario Estadístico de Fomento*” [24]. La evolución que se obtiene con esa aproximación se muestra a continuación:

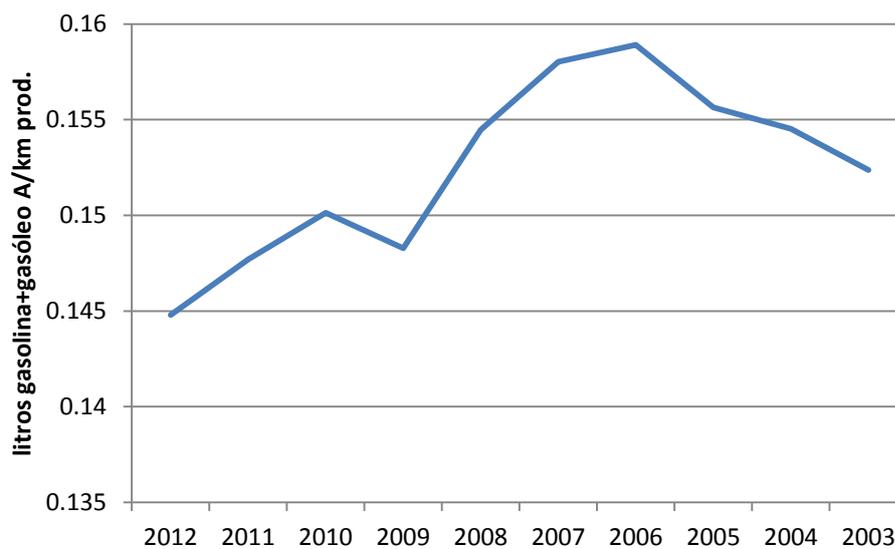


Figura 56 – Evolución histórica de la intensidad energética en España entre 2003 y 2012.
Elaboración propia.

Para empezar, las magnitudes son notablemente mayores con esta aproximación. Para 2006 habría 0.1589 l/km frente a los 0.061 l/km del modelo. Pero teniendo en cuenta que se están incluyendo una fracción importante de gasóleos en el cómputo de la aproximación que no entran en el modelo se puede explicar esta desviación. Más relevante es la tendencia, que cambia en 2006, lo que significaría a ojos del modelo que la variable regulación empieza a actuar desde 2006 y no desde 2014 como se ha modelado.

Sin embargo, con respecto a 1992, los textos de referencia [5] apuntan a que ha habido un descenso constante de la intensidad energética, aunque no entran en detalle de la evolución anual.

Estos son los resultados sobre la **evolución del reparto modal** para los distintos escenarios:

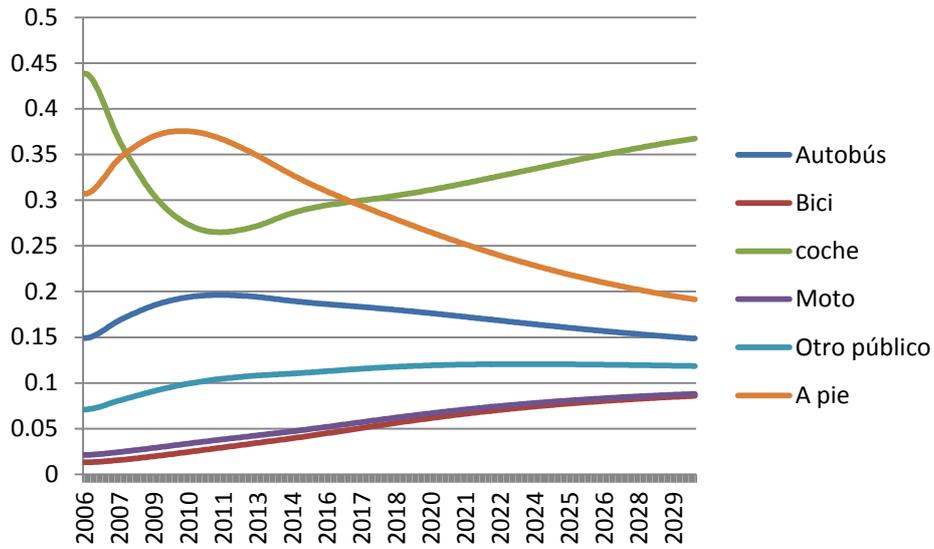


Figura 57 – Evolución del reparto modal según el modelo 1 para el escenario BAU.

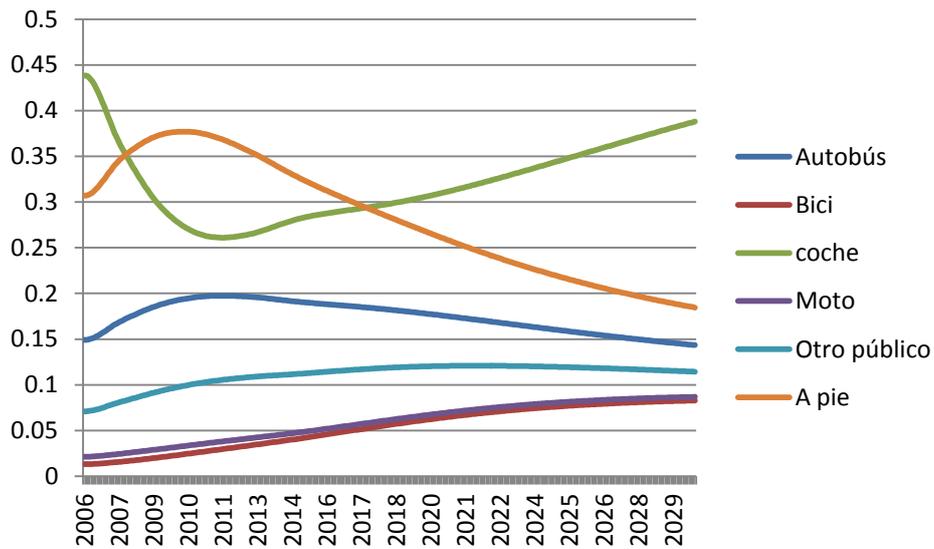


Figura 58 – Evolución del reparto modal según el modelo 1 para el escenario BAU+CE.

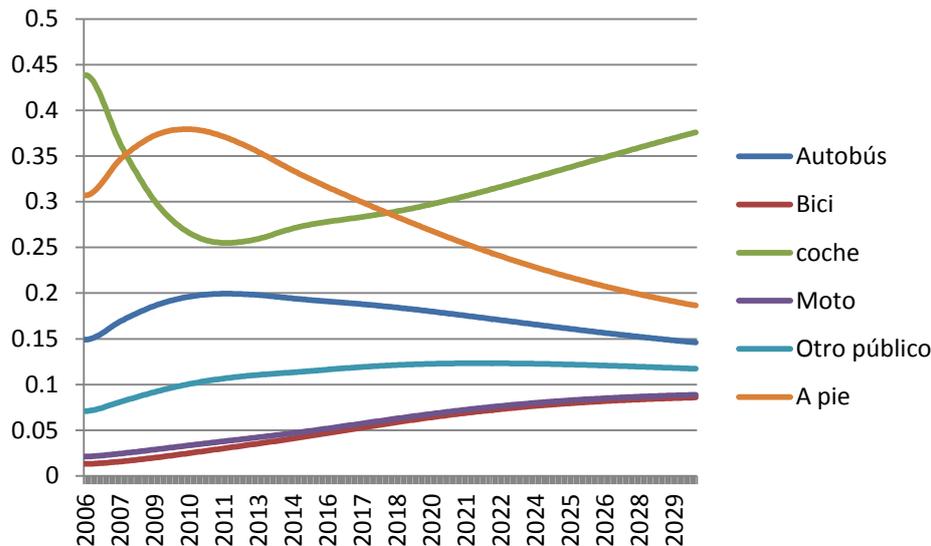


Figura 59 – Evolución del reparto modal según el modelo 1 para el escenario BAU+CE+peak.

Los comentarios que resultan de estos resultados son:

- **El uso del coche:** se mantiene con una previsión al alza fuerte, mientras que el resto de modos tiende hacia un mismo valor. Esto es principalmente por la disponibilidad de vehículos. Eso es coherente con el análisis de los factores que más influyen en la elección modal, se ve que es al constante aumento del parque de vehículos lo que hace que la parte del transporte que se cubre mediante ellos es cada vez mayor, aún en el caso de aumentos constantes del precio.
- **Magnitudes irreales:** El modelo de reparto modal muestra magnitudes irreales y se muestra rígido ante los diferentes escenarios. Sin embargo, sí que representa el efecto rebote a medio plazo, puesto que los escenarios 2 y 3 acaban con una tendencia mayor en el uso de coche. También se aprecia la caída en el uso de coche frente a otros modos de los años de contracción económica, siendo la tendencia posterior la previsible para el escenario BAU supuesto. Sin embargo, la caída en el uso de coche de estos años no ha sido tan pronunciada, lo que significa que en el modelo la Percepción tiene una influencia demasiado pesada frente al Hábito y su comportamiento real.
- **Influencia variables socioeconómicas:** Otro elemento a señalar es la influencia de las variables socioeconómicas, que hacen que la previsión de caída de uso del coche entre 2006 y 2014 sea tan acusada, debido a la contracción económica, y que esta sea sustituida por el medio más barato que es el peatonal. Estas variables son principalmente las que configuran el Hábito, por lo que parece que efectivamente el Hábito tiene un peso mayor en el reparto que la Percepción.
- **La sustitución entre modos:** dentro de la evolución que parece realista, lo que indica el modelo es una caída constante de la movilidad peatonal sustituida principalmente por la bicicleta, la moto y los medios públicos que no son el autobús. Aunque no se puede saber qué flujo de usuarios cambiará de un transporte a otro, se pueden estimar por las franjas de transporte del libro de Khisty y Lall [29]. Parece lógico que las transferencias de usuarios se hagan entre medios contiguos en el cuadro, por lo que la caída del uso peatonal iría al aumento de la bici y del transporte público que no es bus, mientras que la caída del coche sería lo que hace aumentar la movilidad en moto.

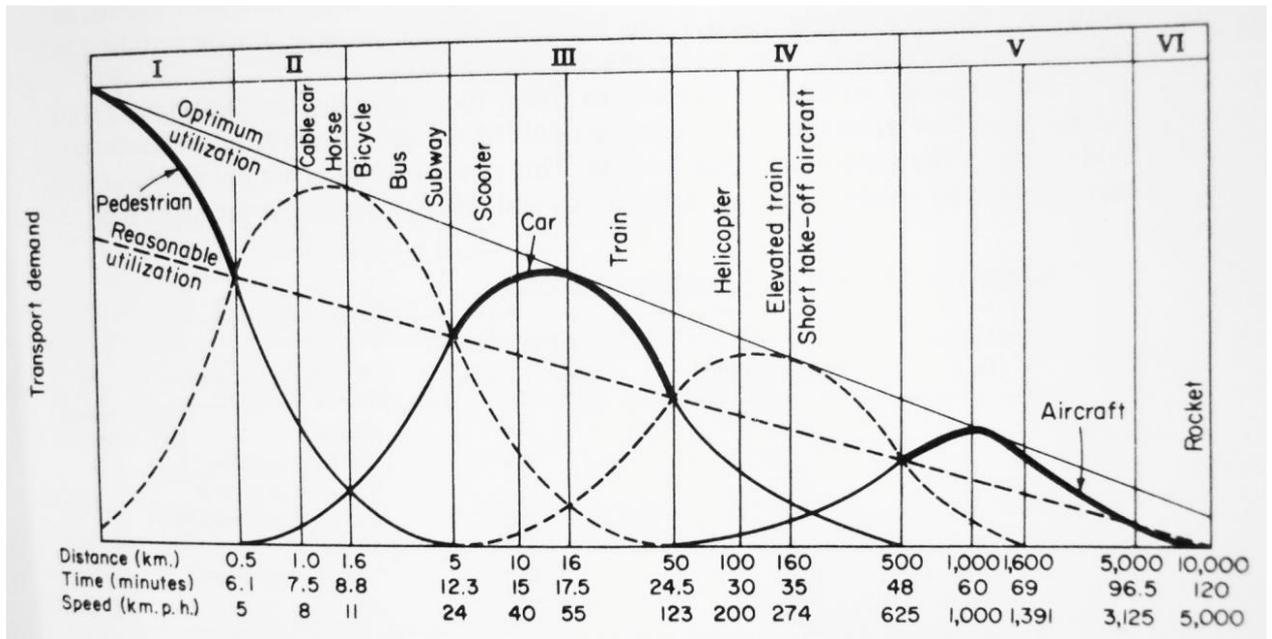


Figura 60 – Nichos de los modos de transporte. [29]

Por resumir, los datos que ofrece la simulación y teniendo en cuenta la similitud entre los escenarios en los resultados del reparto modal, se representan aquí los datos del reparto para 2015 y 2030 en el escenario BAU:

2015

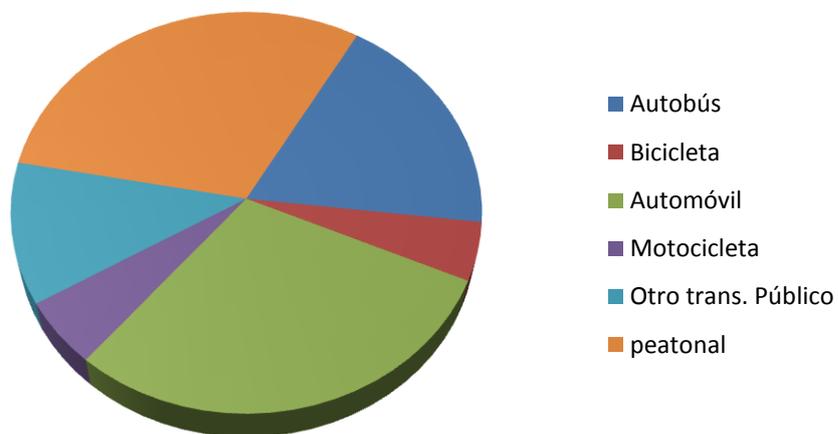


Figura 61 – Reparto modal de la movilidad en el año 2015 según el modelo 1.

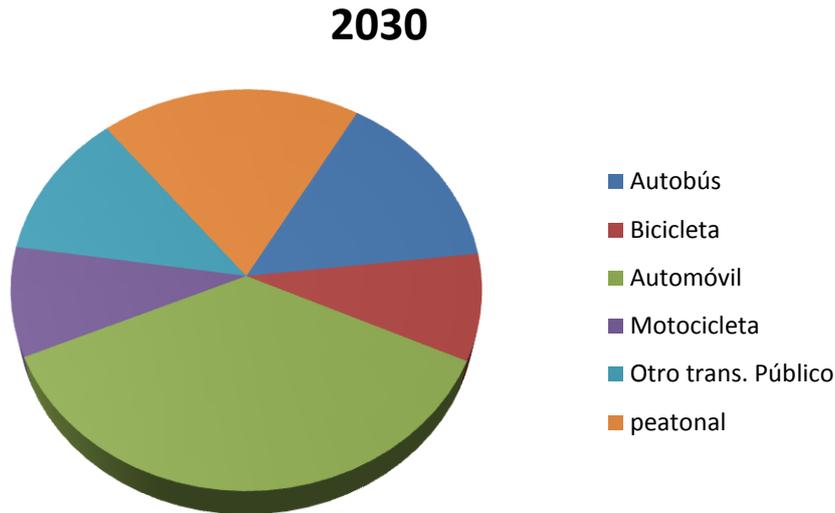


Figura 62 – Reparto modal de la movilidad en el año 2030 según el modelo 1.

2. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es una herramienta para estudiar el efecto de los cambios de las variables sobre el conjunto del modelo. Este análisis revela si las variables y los resultados son coyunturales o estructurales y de qué variables depende el comportamiento del modelo.

Normalmente el análisis de sensibilidad se hace mediante variaciones del 5% y 10% sobre el valor de la variable y estudiando sus efectos.

La sensibilidad se define entonces como:

$$Sensibilidad_{para_un_parámetro} = \frac{\% _ cambio _ Salida}{\% _ cambio _ Parámetro} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

Para el análisis de sensibilidad se van a estudiar dos bloques de variables:

1. Las variables del sub-bloque de producción del transporte en automóvil

Estas variables son las que afectan a todo el modelo dado que el sub-bloque de producción tiene efectos en el de reparto modal. Las variables estudiadas como parámetros que cambian son:

- Ingresos
- REGULACIÓN
- Pob. Urbana
- Población
- Población adulta
- Licencias
- Km de red

- % de red urbana

Para todos los casos y como la mayoría de las variables son variables temporales se va a modificar el **valor final**, el asignado a 2030, aplicando los porcentajes de variación antes citados. Eso significa que habrá cambios a partir de 2014 en el modelo, dado que para el periodo 2014-2030 es para el que estas variables operan según suposiciones.

Todos los casos se han estudiado en el escenario 1: BAU, de los descritos en la simulación.

El efecto de estas variables se ha medido sobre 3 variables de salida:

- VEH/adultos: se toma esta variable por tener mucha relación con la producción y sobre todo, porque tiene influencia sobre el reparto modal.
- Pfuel/km: se toma esta variable porque incluye los efectos de la intensidad energética y es uno de los resultados del modelo más relevantes.
- %USO COCHE: para estudiar el impacto sobre el reparto modal se representa la evolución del uso de coche que se hace, como variable más representativa de los resultados de ese sub-bloque.

Los resultados para cada variable se muestran a continuación, con un cuadro como el siguiente para cada variable:

Variable	NOMBRE VARIABLE				
	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor final variable	A	A _{-0.1}	A _{-0.05}	A _{+0.05}	A _{+0.1}
VEH/adultos	B	B _{-0.1}	B _{-0.05}	B _{+0.05}	B _{+0.1}
Pfuel/km	C	C _{-0.1}	C _{-0.05}	C _{+0.05}	C _{+0.1}
% USO Coche	D	D _{-0.1}	D _{-0.05}	D _{+0.05}	D _{+0.1}
Sensibilidad VEH/adultos		$(B_{-0.1}-B)/B/-0.1$	$(B_{-0.05}-B)/B/-0.05$	$(B_{+0.05}-B)/B/0.05$	$(B_{+0.1}-B)/B/0.1$
Sensibilidad Pfuel		$(C_{-0.1}-C)/C/-0.1$	$(C_{-0.05}-C)/C/-0.05$	$(C_{+0.05}-C)/C/0.05$	$(C_{+0.1}-C)/C/0.1$
Sensibilidad %Uso coche		$(D_{-0.1}-D)/D/-0.1$	$(D_{-0.05}-D)/D/-0.05$	$(D_{+0.05}-D)/D/0.05$	$(D_{+0.1}-D)/D/0.1$

Tabla 25 – Modelo de las tablas de análisis de sensibilidad de las variables del modelo 1.

Elaboración propia.

También se muestran las gráficas de los datos de salida, con los valores normalizados.

Variable	Ingresos				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	40.95950	36.86350	38.91150	43.00700	45.05500
VEH/adultos	-1.52652	-1.52687	-1.52669	-1.52638	-1.52626
Pfuel/km	-1.84538	-1.84734	-1.84635	-1.84440	-1.84353
% USO Coche	0.36760	0.36004	0.36389	0.37125	0.37478
Sensibilidad VEH/adultos		-0.00229	-0.00223	-0.00183	-0.00170
Sensibilidad Pfuel		0.00003	0.00001	-0.00001	-0.00002
Sensibilidad %Uso coche		0.20566	0.20201	0.19875	0.19540

Tabla 26 – Sensibilidades ante los ingresos en el modelo 1

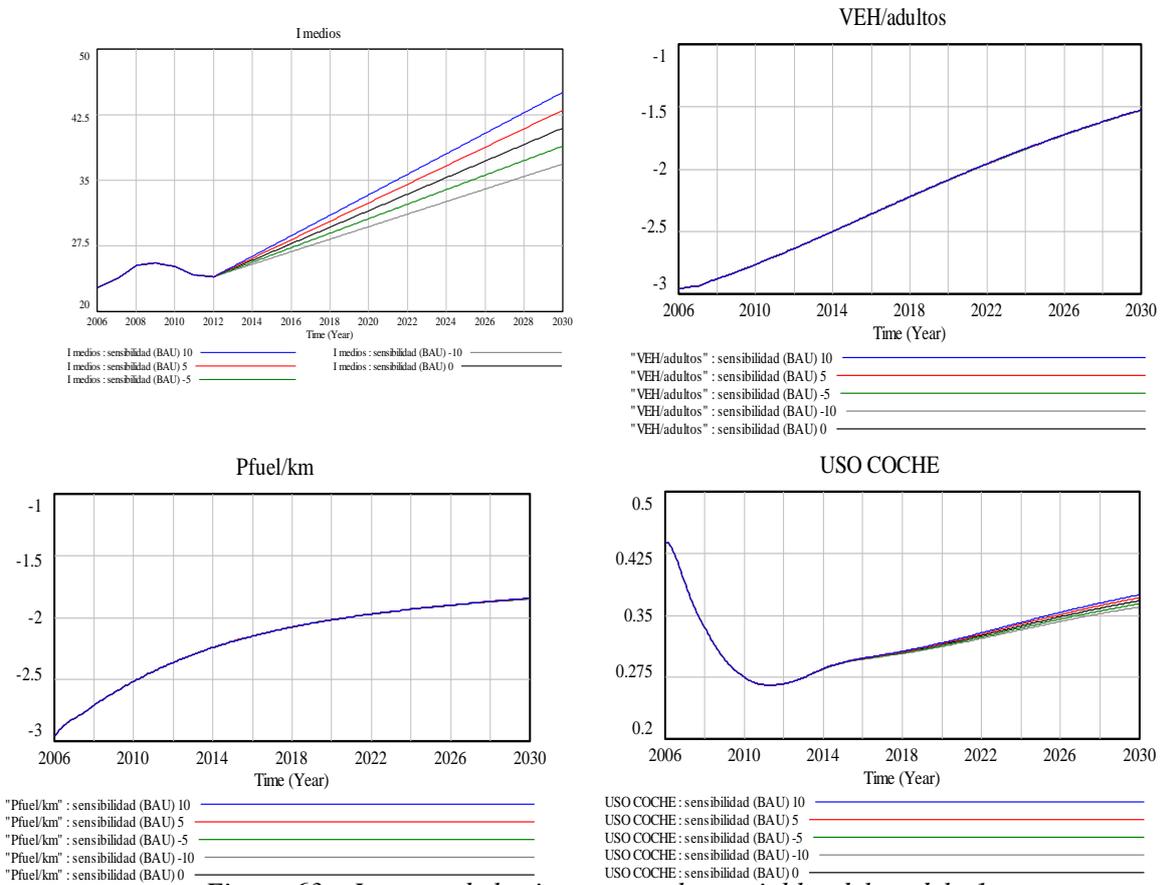


Figura 63 – Impacto de los ingresos en las variables del modelo 1.

Variable	REGULACION				
% cambio	0.00000	-0.10000	-0.05000	0.05000	0.10000
Valor final variable	1.00000	0.90000	0.95000	1.05000	1.10000
VEH/adultos	-1.52652	-1.52579	-1.52616	-1.52688	-1.52723
Pfuel/km	-1.84530	-1.82109	-1.83340	-1.85689	-1.86803
% USO Coche	0.36765	0.36674	0.36719	0.36800	0.36846
Sensibilidad VEH/adultos		0.00478	0.00472	0.00472	0.00465
Sensibilidad Pfuel		0.13120	0.12898	0.12562	0.12318
Sensibilidad %Uso coche		0.02467	0.02492	0.01926	0.02220

Tabla 27 – Sensibilidades ante la REGULACIÓN en el modelo 1

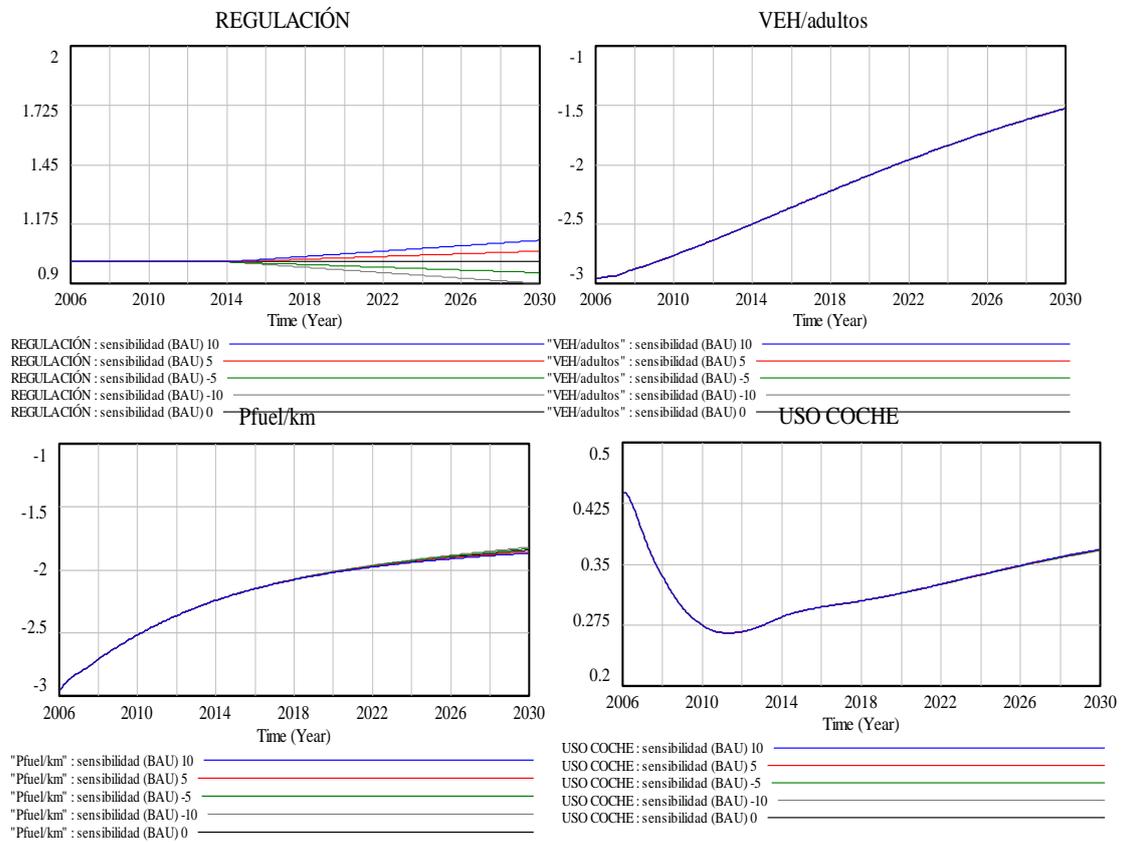


Figura 64 – Impacto de la REGULACIÓN en las variables del modelo 1.

Variable	Pob. Urbana				
	0.00000	-0.10000	-0.05000	0.05000	0.10000
Valor final variable	0.77473	0.69720	0.73599	0.81340	0.85220
VEH/adultos	-1.52650	-1.44484	-1.48678	-1.56420	-1.60035
Pfuel/km	-1.84538	-1.84990	-1.84759	-1.84759	-1.84128
% USO Coche	0.36765	0.40860	0.38710	0.34990	0.33369
Sensibilidad VEH/adultos		0.53495	0.52041	0.49394	0.48379
Sensibilidad Pfuel		0.15978	0.07190	-0.05934	-0.10838
Sensibilidad %Uso coche		-1.11395	-1.05830	-0.96539	-0.92361

Tabla 28 – Sensibilidades ante la población urbana en el modelo 1

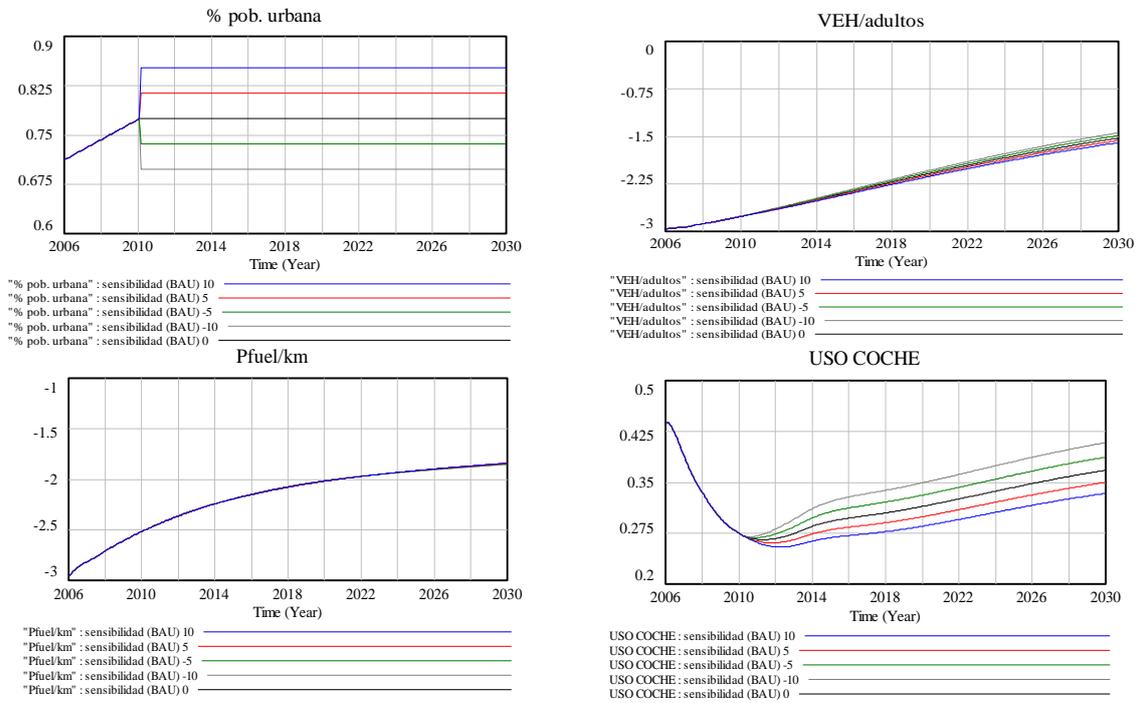


Figura 65 – Impacto de la población urbana en las variables del modelo 1.

Variable	Población				
% cambio	0.000	-0.100	-0.050	0.050	0.100
Valor final variable	66815900	60134310	63475105	70156695	73497490
VEH/adultos	-1.527	-1.533	-1.530	-1.523	-1.520
Pfuel/km	-1.845	-1.834	-1.840	-1.851	-1.856
% USO Coche	0.368	0.409	0.387	0.350	0.335
Sensibilidad VEH/adultos		-0.043	-0.042	-0.041	-0.040
Sensibilidad Pfuel		0.063	0.062	0.059	0.059
Sensibilidad %Uso coche		-1.114	-1.051	-0.934	-0.885

Tabla 29 – Sensibilidades ante la población en el modelo 1

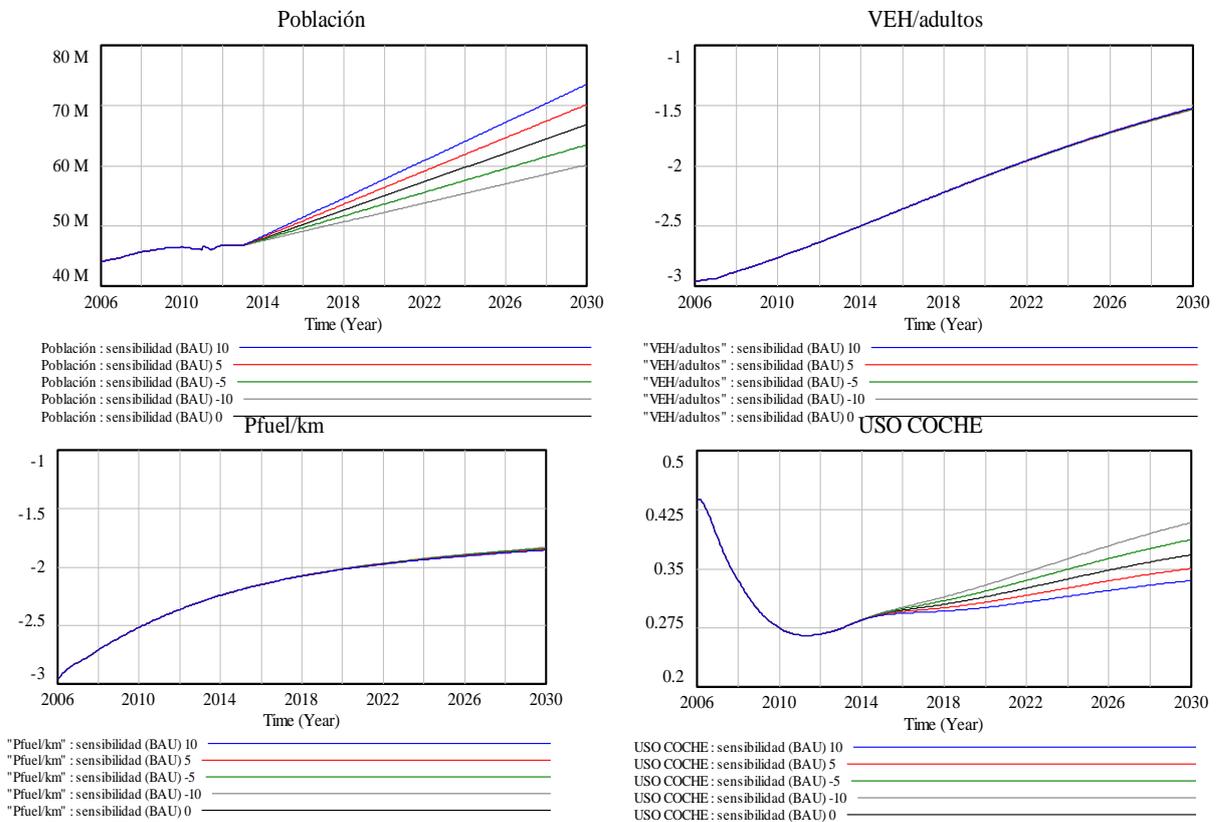


Figura 66 – Impacto de la población en las variables del modelo 1.

Variable	Población adulta				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	56289000	50660100	53474550	59103450	61917900
VEH/adultos	-1.52652	-1.49151	-1.50935	-1.54309	-1.55909
Pfuel/km	-1.84538	-1.86030	-1.85271	-1.83829	-1.83144
% USO Coche	0.36760	0.41560	0.39021	0.34758	0.32967
Sensibilidad VEH/adultos		0.22935	0.22496	0.21710	0.21336
Sensibilidad Pfuel		-0.08085	-0.07944	-0.07684	-0.07554
Sensibilidad %Uso coche		-1.30577	-1.23014	-1.08939	-1.03183

Tabla 30 – Sensibilidades ante la población adulta en el modelo 1

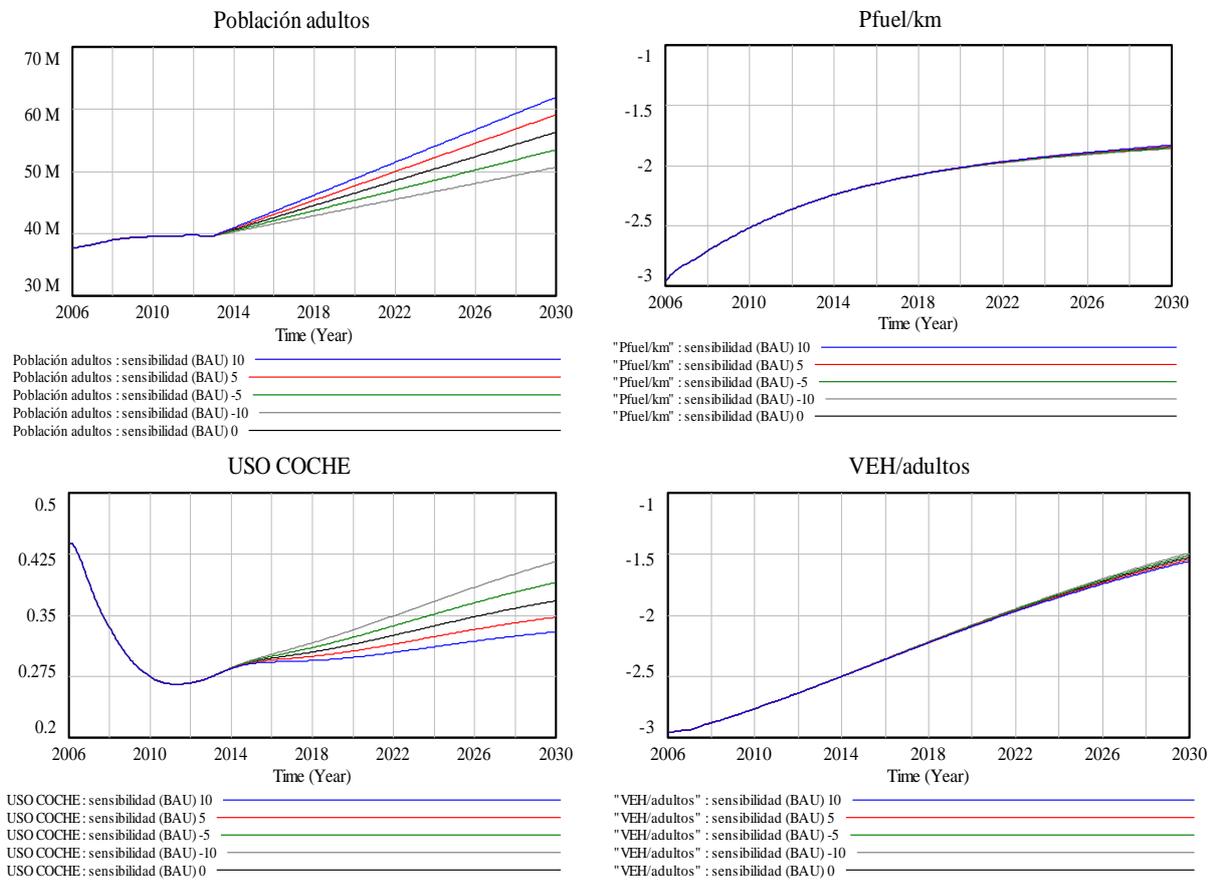


Figura 67 – Impacto de la población adulta en las variables del modelo 1.

Variable	Licencias				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	43952600	39557340	41754970	46150230	48347860
VEH/adultos	-1.52652	-1.55095	-1.53848	-1.51502	-1.50395
Pfuel/km	-1.84530	-1.84526	-1.84532	-1.84543	-1.84548
% USO Coche	0.36765	0.35769	0.36274	0.37242	0.37706
Sensibilidad VEH/adultos		-0.16004	-0.15670	-0.15067	-0.14785
Sensibilidad Pfuel		0.00022	-0.00022	0.00141	0.00098
Sensibilidad %Uso coche		0.27080	0.26678	0.25954	0.25614

Tabla 31 – Sensibilidades ante las licencias en el modelo 1

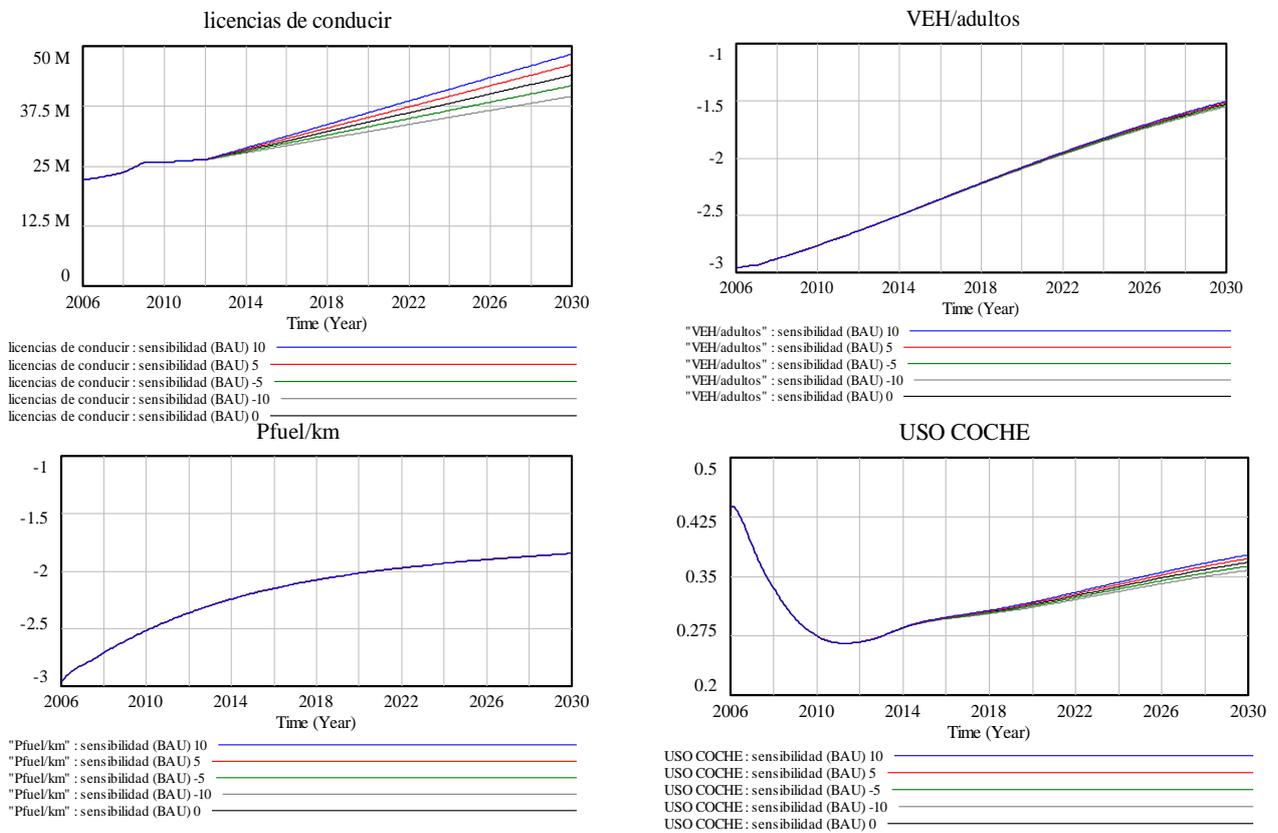


Figura 68 – Impacto de las licencias en las variables del modelo 1.

Variable	km de red				
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	663742.0	597367.8	630554.9	696929.1	730116.2
VEH/adultos	-1.52650	-1.52986	-1.52817	-1.52492	-1.52337
Pfuel/km	-1.84538	-1.84351	-1.84440	-1.84627	-1.84715
% USO Coche	0.36765	0.33165	0.34941	0.38631	0.40535
Sensibilidad VEH/adultos		-0.02201	-0.02188	-0.02070	-0.02050
Sensibilidad Pfuel		0.01013	0.01062	0.00965	0.00959
Sensibilidad %Uso coche		0.97909	0.99204	1.01532	1.02558

Tabla 32 – Sensibilidades ante la extensión de la red en el modelo 1

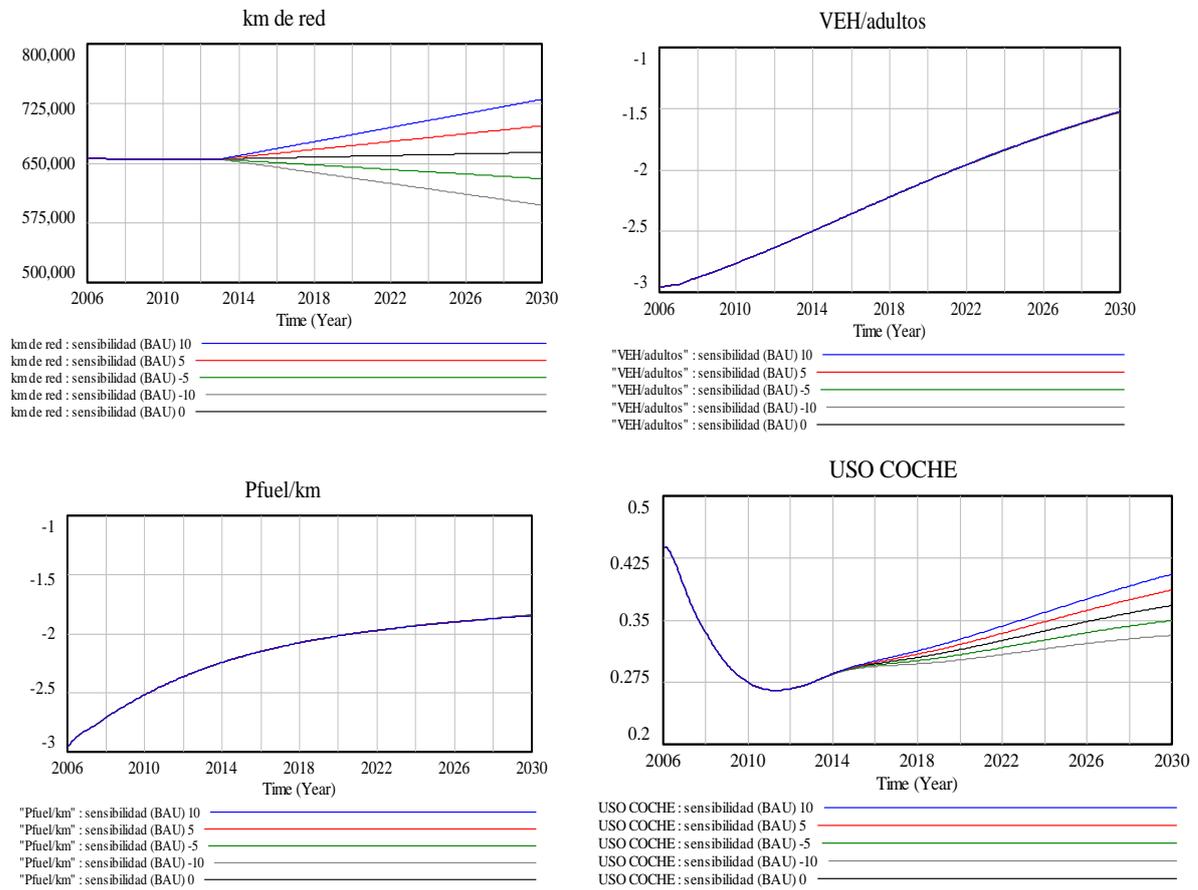


Figura 69 – Impacto de la extensión de la red en las variables del modelo 1.

Variable	% red urbana				
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	0.19630	0.17667	0.18649	0.20612	0.21593
VEH/adultos	-1.52652	-1.53561	-1.53095	-1.52232	-1.51831
Pfuel/km	-1.84538	-1.83996	-1.84274	-1.84788	-1.85027
% USO Coche	0.36760	0.35203	0.35976	0.37568	0.38386
Sensibilidad VEH/adultos		-0.05955	-0.05804	-0.05503	-0.05378
Sensibilidad Pfuel		0.02937	0.02861	0.02709	0.02650
Sensibilidad %Uso coche		0.42356	0.42655	0.43977	0.44227

Tabla 33 – Sensibilidades ante el tamaño de la red viaria urbana en el modelo 1

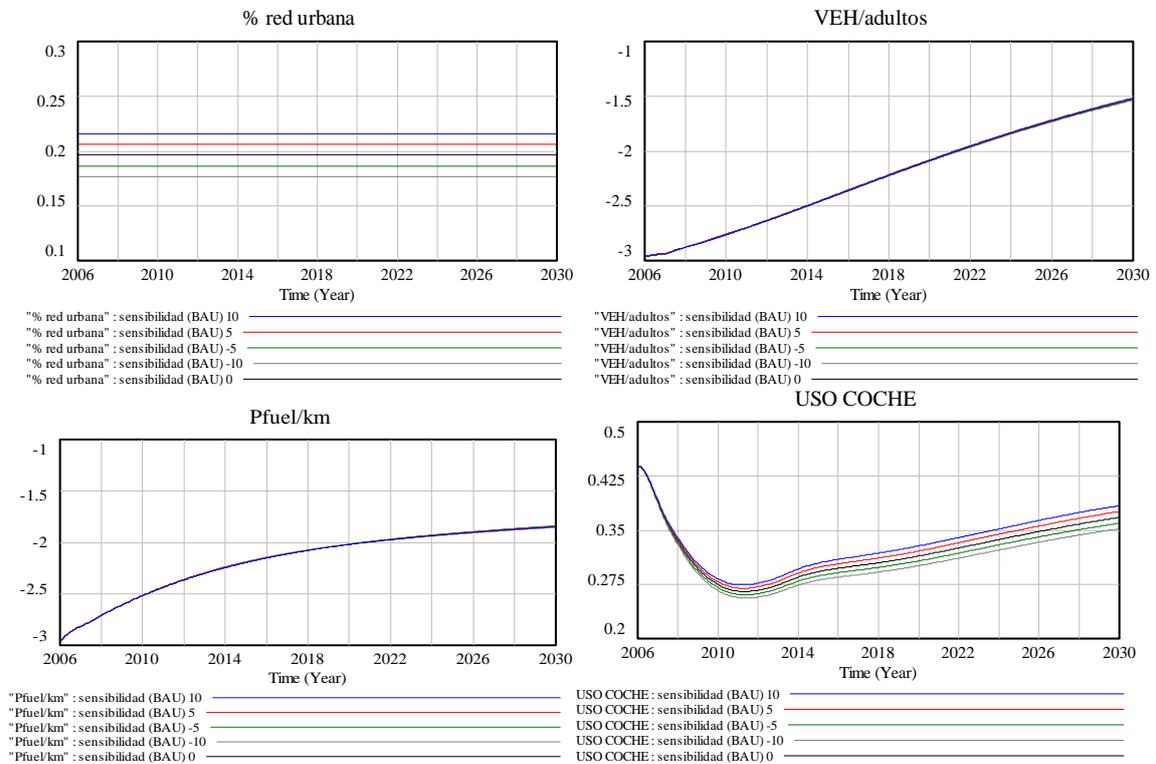


Figura 70 – Impacto del tamaño de la red viaria urbana en las variables del modelo 1.

En todos los análisis se aprecia que el sub-bloque de producción de transporte es muy robusto frente a todas las variables aunque la población urbana, la población, las licencias de conducción y la población adulta son las que más impacto tienen bien en el número de vehículos, bien en el coste del combustible.

La variable REGULACIÓN, que es una variable conflictiva por lo abstracto de lo que representa, afecta principalmente al precio del fuel, aunque con poca incidencia, por lo que se puede afirmar que las hipótesis y la forma de representar la regulación relativa a la eficiencia energética son adecuadas para el modelo.

Sin embargo en el reparto modal el impacto es bastante mayor de todas las variables excepto la REGULACION y los ingresos. Este impacto se explica principalmente porque en el modelo de reparto modelo, los cambios en el número de vehículos provocan bastantes cambios en el reparto modal.

Es interesante observar como los aumentos de población, de población urbana y de población adulta provocan caídas en el uso de coche. Por otro lado, un aumento en los kilómetros de red provoca un aumento del uso de coche y también un aumento de la red urbana. Este último resultado llama la atención, dado que un aumento en la proporción de red urbana no parece fomentar el uso del coche, pues este parámetro en el modelo afecta principalmente a la congestión, aumentando las horas anuales de congestión. Este no es el único resultado llamativo. Con los aumentos de población, población urbana y población adulta el número de vehículos aumenta y sin embargo el % de uso de coche cae, cuando según los supuestos del modelo un aumento en el número de coches produce un aumento del uso del coche. Esto se explica por un efecto menor de la acción que produce el aumento de vehículos por adulto frente a otros efectos sobre la congestión o el coste por kilómetro.

La consecuencia más relevante que se puede sacar de estos resultados es que tiene más impacto sobre el % de movilidad que se da en coche un aumento de la infraestructura viaria que cambios en los ingresos, lo que es un resultado consistente con la realidad si vemos la evolución de los últimos años de contracción económica, en los que la red viaria ha aumentado y los ingresos medios han disminuido, sin que la estructura del reparto modal haya cambiado significativamente. Por otro lado, los cambios en la distribución y en el tamaño de la población se perfilan como el principal factor que determina un mayor o menor uso del coche. Este resultado además refuerza la teoría de la existencia de una demanda inducida por la creación de infraestructuras.

2. Las variables del sub-bloque de reparto modal

Las variables que se ha modelado que afectan en el sub-bloque de reparto modal y sólo a este son las relativas al coste y el tiempo de los distintos modos y como cambios en estos afectan al reparto modal.

Las variables utilizadas para el análisis son los valores iniciales de:

- € bus
- T bus
- € Otro público
- T otro público
- T coche
- Pveh (precio vehículo)
- T moto
- Precio moto (variable incluida como en € moto junto al coste del fuel)
- T bici
- € bici
- T a pie

La variable en la que se van a estudiar los efectos es el % USO COCHE, del mismo modo que en el anterior bloque de análisis.

Los resultados para cada variable se muestran a continuación, con un cuadro como el siguiente para cada variable:

Variable	NOMBRE VARIABLE				
	0	-10%	-5%	5%	10%
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor final variable	A	A _{-0.1}	A _{-0.05}	A _{+0.05}	A _{+0.1}
% USO Coche	B	B _{-0.1}	B _{-0.05}	B ^{+0.05}	B _{+0.1}
Sensibilidad %Uso coche		$(B_{-0.1}-B)/-0.1$	$(B_{-0.05}-B)/-0.05$	$(B_{+0.05}-B)/0.05$	$(B_{+0.1}-B)/0.1$

Tabla 34 – Segundo modelo de las tablas de análisis de sensibilidad de las variables del modelo
1. Elaboración propia.

Variable	€ bus				
	0	-10%	-5%	5%	10%
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.07	0.063	0.0665	0.0735	0.077
% USO Coche	0.3676	0.3673	0.3674	0.3678	0.3679
Sensibilidad %Uso coche		0.00816104	0.01088139	0.01088139	0.00816104

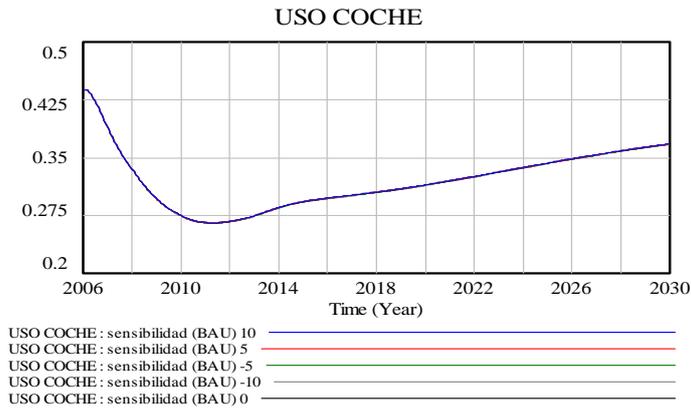


Tabla 35 – Sensibilidad ante el coste del autobús en el modelo 1

Figura 71 – Impacto del coste del autobús en las variables del modelo 1.

Variable	T bus				
	0	-10%	-5%	5%	10%
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.0833	0.07497	0.079135	0.087465	0.09163
% USO Coche	0.367646	0.36798	0.367808	0.367491	0.367342
Sensibilidad %Uso coche		-	-	-	-
		0.00908483	0.00881283	0.00843202	0.00826882

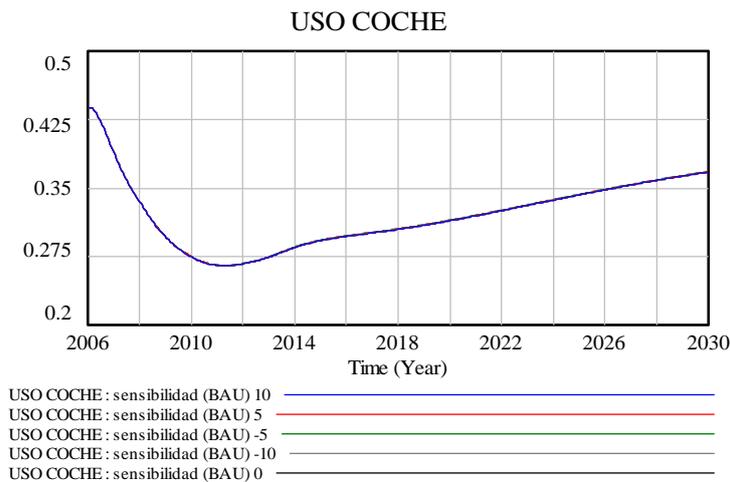


Tabla 36 – Sensibilidad ante el tiempo del autobús en el modelo 1

Figura 72 – Impacto del tiempo del autobús en las variables del modelo 1.

Variable	T OTRO PUBLICO				
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.0362319	0.03260871	0.03442031	0.0380435	0.03985509
% USO Coche	0.367646	0.367846	0.367744	0.36755	0.367461
Sensibilidad %Uso coche		- 0.00544002	- 0.00533122	- 0.00522242	- 0.00503201

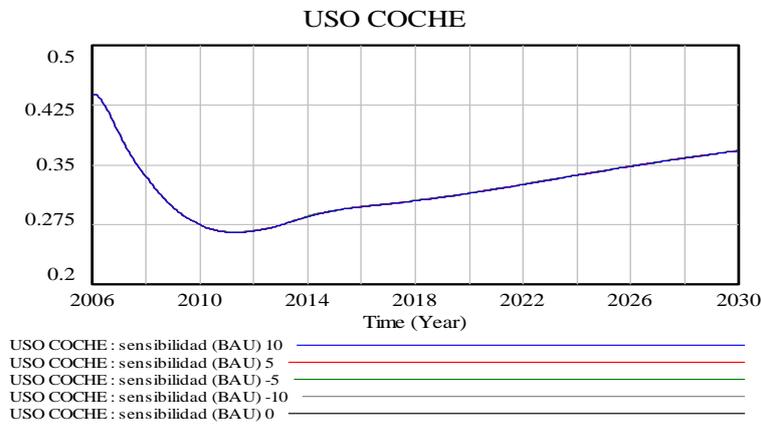


Tabla 37 – Sensibilidad ante el tiempo de los otros públicos en el modelo 1

Figura 73 – Impacto del tiempo de los otros públicos en las variables del modelo 1.

Variable	€ OTRO PUBLICO				
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.035	0.0315	0.03325	0.03675	0.0385
% USO Coche	0.3676	0.36744	0.36754	0.36773	0.36782
Sensibilidad %Uso coche		0.00435256	0.00326442	0.00707291	0.00598477

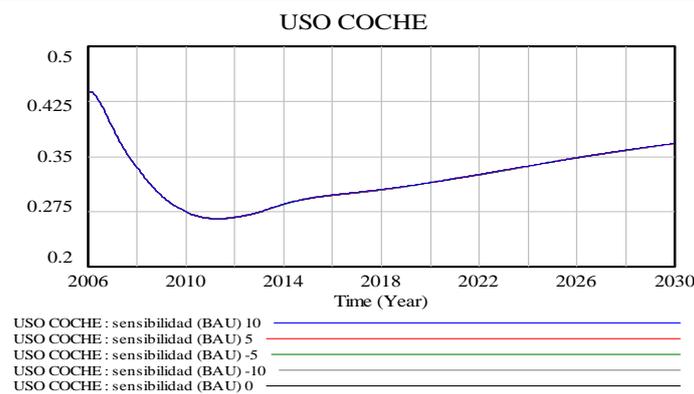


Tabla 38 – Sensibilidad ante el coste de los otros público en el modelo 1

Figura 74 – Impacto del coste de los otros públicos en las variables del modelo 1.

Variable	T COCHE				
	0	-10%	-5%	5%	10%
% cambio					
Valor INICIAL variable	0.03968	0.035712	0.037696	0.041664	0.043648
% USO Coche	0.3676	0.364738	0.366099	0.368824	0.370188
Sensibilidad %Uso coche		0.07785637	0.08166485	0.06659412	0.07040261

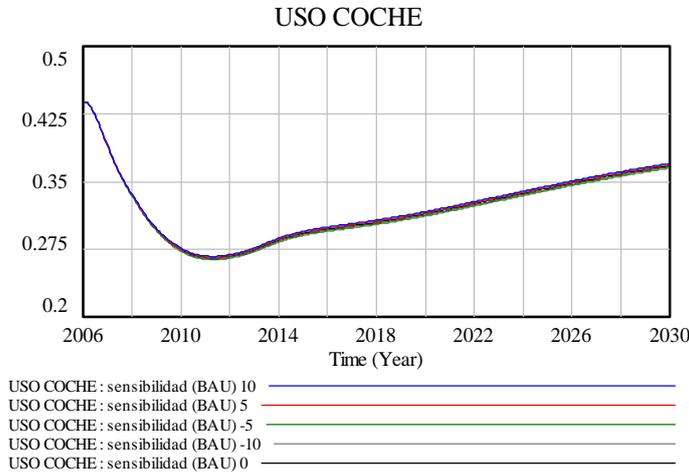


Tabla 39 – Sensibilidad ante el tiempo del automóvil en el modelo 1

Figura 75 – Impacto del tiempo del automóvil en las variables del modelo 1.

Variable	Pveh				
	0	-10%	-5%	5%	10%
% cambio					
Valor INICIAL variable	0.08182	0.073638	0.077729	0.085911	0.090002
% USO Coche	0.3676	0.35744	0.362495	0.37235	0.377172
Sensibilidad %Uso coche		0.27638738	0.27774755	0.25843308	0.26039173

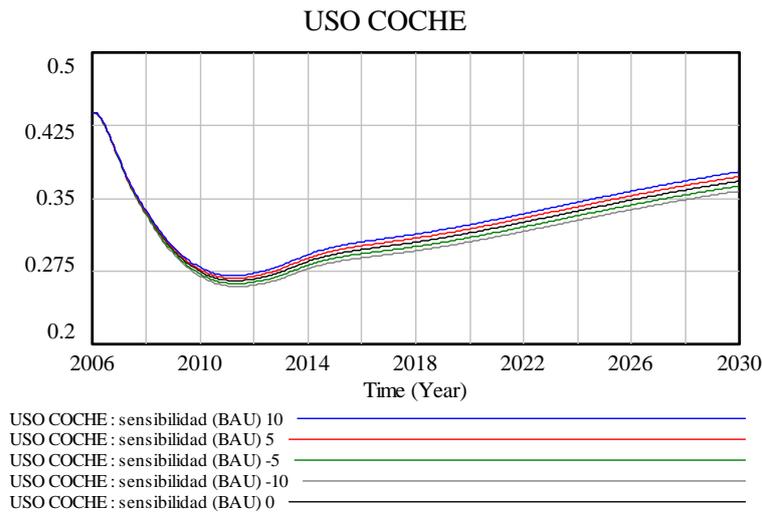


Tabla 40 – Sensibilidad ante el coste de los turismos en el modelo 1

Figura 76 – Impacto del coste de los turismos en las variables del modelo 1.

Variable	t moto				
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.0375	0.03375	0.035625	0.039375	0.04125
% USO Coche	0.3676	0.367491	0.36747	0.367429	0.367409
Sensibilidad %Uso coche		0.00296518	0.00707291	-0.00930359	-0.00519587

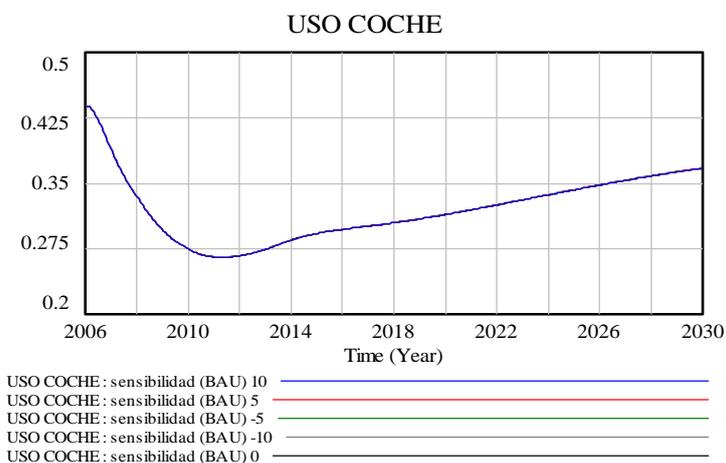


Tabla 41 – Sensibilidad ante el tiempo en moto en el modelo 1

Figura 77 – Impacto del tiempo en moto en las variables del modelo 1.

Variable	Precio moto				
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.0178	0.01602	0.01691	0.01869	0.01958
% USO Coche	0.3676	0.367472	0.367467	0.367454	0.36745
Sensibilidad %Uso coche		0.00348205	0.00723613	-0.00794342	-0.00408052

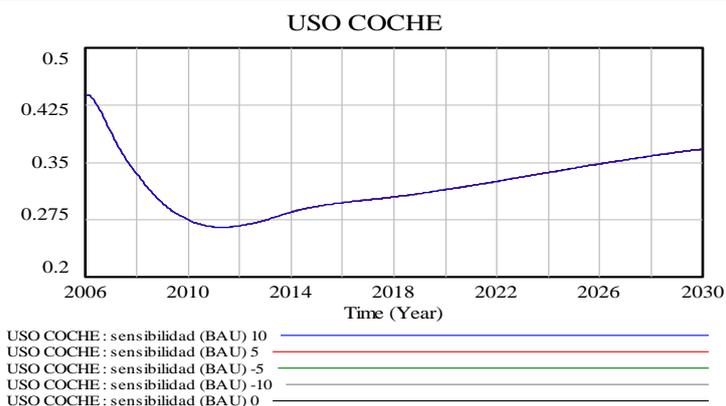


Tabla 42 – Sensibilidad ante el coste en moto en el modelo 1

Figura 78 – Impacto del coste en moto en las variables del modelo 1.

Variable	t bici				
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.05	0.045	0.0475	0.0525	0.055
% USO Coche	0.3676	0.36747	0.36746	0.36746	0.367431
Sensibilidad %Uso coche		0.00353645	0.00761697	-0.00761697	-0.00459739

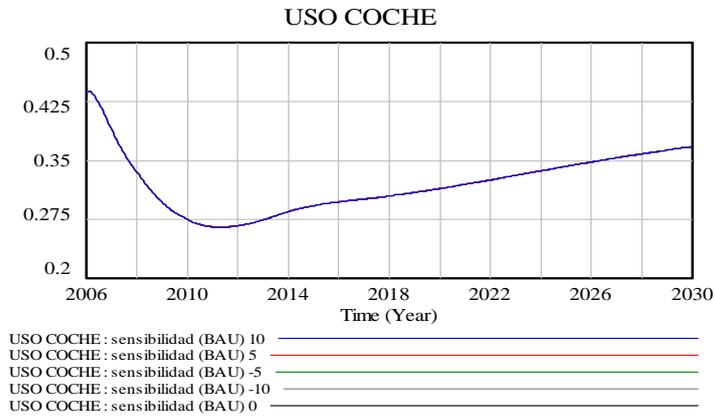


Tabla 43 – Sensibilidad ante el tiempo en bici en el modelo 1

Figura 79 – Impacto del tiempo en bici en las variables del modelo 1.

Variable	€ bici				
% cambio	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.03555	0.031995	0.0337725	0.0373275	0.039105
% USO Coche	0.3676	0.367429	0.367439	0.367459	0.367468
Sensibilidad %Uso coche		0.0046518	0.00875952	-0.00767138	-0.00359086

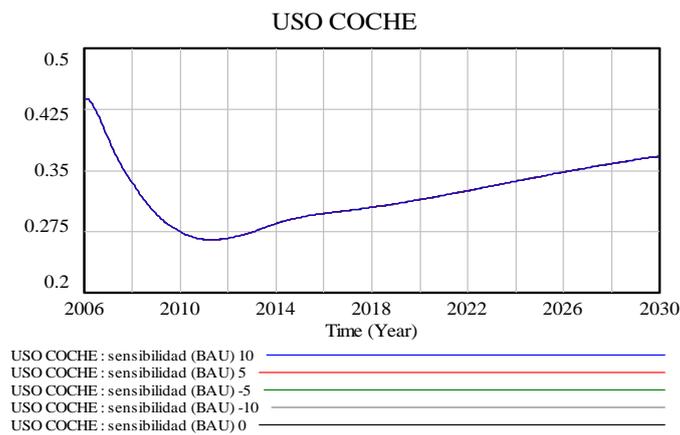


Tabla 44– Sensibilidad ante el coste en bici en el modelo 1

Figura 80 – Impacto del coste en bici en las variables del modelo 1.

Variable	t a pie				
	0	-10%	-5%	5%	10%
Valor INICIAL variable	0.1709	0.15381	0.162355	0.179445	0.18799
% USO Coche	0.3676	0.36745	0.36745	0.36745	0.36745
Sensibilidad %Uso coche		0.00408052	0.00816104	-0.00816104	-0.00408052

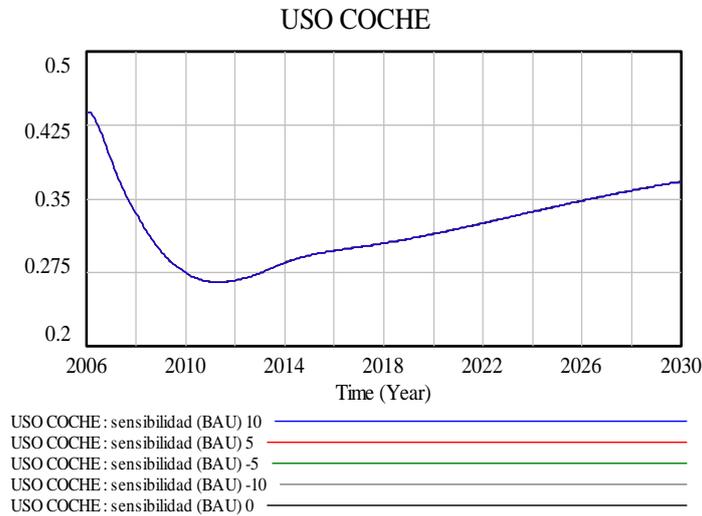


Tabla 45 – Sensibilidad ante el tiempo a pie en el modelo 1

Figura 81 – Impacto del tiempo a pie en las variables del modelo 1.

Ante estos resultados, la primera conclusión es el poco efecto que tienen casi todas las variables excepto las relativas al coche, sobre todo el precio del vehículo.

La principal conclusión que se puede sacar de estos datos es que el coche es un modo robusto frente a cambios en el resto de modos, dado que los cambios en los parámetros de cada medio sí que afectan al % de uso de ese medio. Sin embargo, en todo este análisis, la variable que más afecta es el Precio del Vehículo. Y lo es porque afecta también al parque de vehículos y de esa manera al uso de coche, de forma dominante sobre el precio del vehículo. La explicación de por qué un aumento de precio de los vehículos provoca un aumento en la compra de vehículos y por tanto un aumento en el uso del coche hay que buscarla en la formulación de VEH/adulto, en la que el coeficiente asociado al precio del vehículo es positivo, según resultados de bibliografía. [25]

Por otro lado, los signos y las magnitudes de las sensibilidades revelan que cada parámetro tiene un efecto distinto sobre el resto, lo que es ciertamente realista.

b. Segundo modelo

1. Resultados obtenidos en la simulación

Los escenarios con los que se va a simular este segundo modelo parten de los mismos supuestos y la misma filosofía que para el primer modelo: 3 escenarios suponiendo una dinámica económica y social análoga y constante a la vivida entre 2006 y 2007 a partir de 2014, dado que entre 2007 y 2014 hay datos históricos que se incluyen.

	Escenario 1: BAU	Escenario 2: BAU+CE	Escenario 3: BAU+CE+Peak oil
Descripción	Escenario con un crecimiento económico como el de 2007.	Escenario con un crecimiento económico como el de 2007 e implementando las medidas de la CE de aumentar la eficiencia energética.	Escenario con un crecimiento como el 2007, implementando las medidas de la CE y en un escenario post-peak oil
Implicación en las variables: crecimientos anuales	Km red: 321.600km/año	Km red:321.600km/año	Km red:321.600 km/año
	población: 744000 personas al año	población: 744000 personas al año	población: 744.000 personas al año
	Demanda de transporte: 21.384,4 al año	Demanda de transporte: 21.384,4 al año	Demanda de transporte: 21.384,4 al año
	Hogares con niños: 0,5% al año	Hogares con niños: 0,5% al año	Hogares con niños: 0,5% al año
	Género: 40% en 2030	Género: 40% en 2030	Género: 40% en 2030
	Ocupación: 0,65% anual	Ocupación: 0,65% anual	Ocupación: 0,65% anual
	Ingresos medios: 1	Ingresos medios: 1	Ingresos medios: 1
	Pfuel: 3,6% anual	Pfuel: 6% anual	Pfuel: 10% anual
	Intensidad: constante	Intensidad: 0,05 en 2030	Intensidad: 0,05 en 2030
Potros: 2,7% anual	Potros: 2,7% anual	Potros: 2,7% anual	

Tabla 46 – Escenarios y variación anual de cada variable en cada escenario para el modelo 2.

Los kilómetros de red, la población, el precio del fuel, los precios (Potros) y los ingresos medios se modelan de la misma forma que se han modelado para los escenarios del primer modelo. Las novedades son:

- **Demanda de transporte:** dado que para este modelo es necesario incluir una variable agregada de demanda de transporte total esta es aproximada, con el dato de 1992 [4], los de 2007 y 2012 [5] y para 2030 se fija tal que el crecimiento anual sea el mismo que el que se dio entre 1992 y 2007 cada año.

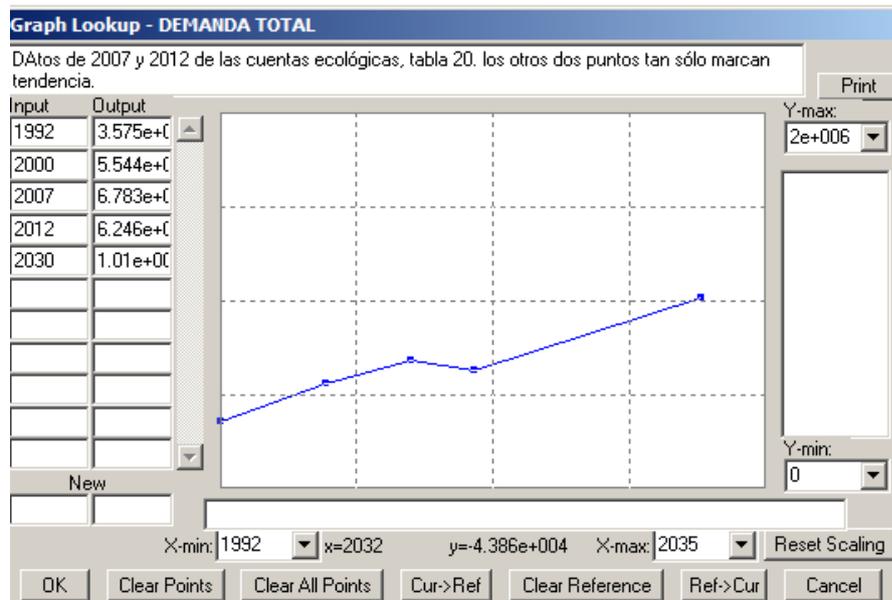


Figura 82 – Evolución de la demanda total de transporte en las simulaciones del modelo 2. Millones de personas-km/año.

- Hogares con niños:** en vista de la pirámide poblacional del reino, ya sin forma de pirámide, es previsible que los hogares con menores bajen si se mantiene la tendencia reciente tal y como suponen los escenarios. Como no es realista pensar que pueda haber una caída por debajo del 40% de los hogares con menores en este tipo de escenarios, sin anomalías, se fija este valor como horizonte para 2030, en un intento de reflejar esa tendencia al envejecimiento de la población.

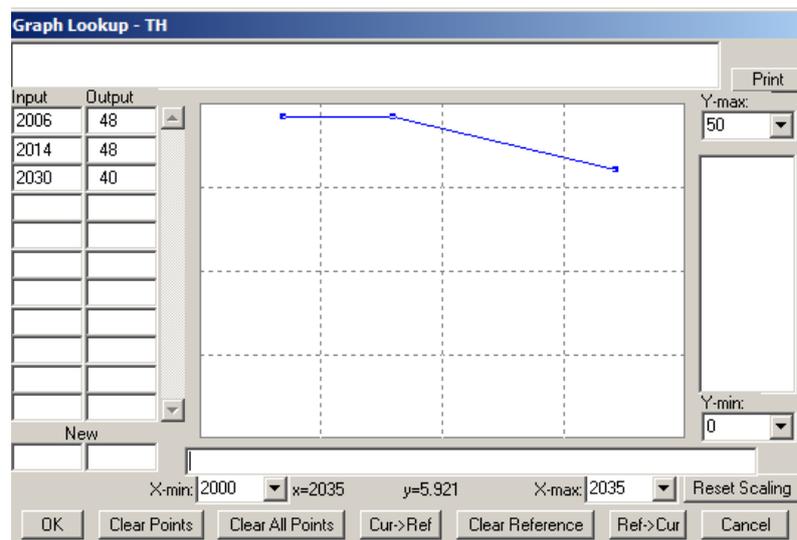


Figura 83 – Evolución de la cantidad de hogares con niños en las simulaciones del modelo 2.

- Ocupación:** se toma el crecimiento de la ocupación entre 2006 y 2007, como se ha hecho en otras variables. Este crecimiento es de un 0,65% y es bastante moderado comparado con el crecimiento de años anteriores (2005-2006: 1,84%, 2004-2005:

3,8%...) Sin embargo, hay un tope de población activa que en 2007 era el 59% de la población, así que poner este crecimiento anual en parte asegura un cierto realismo de que no se va a superar ese techo.

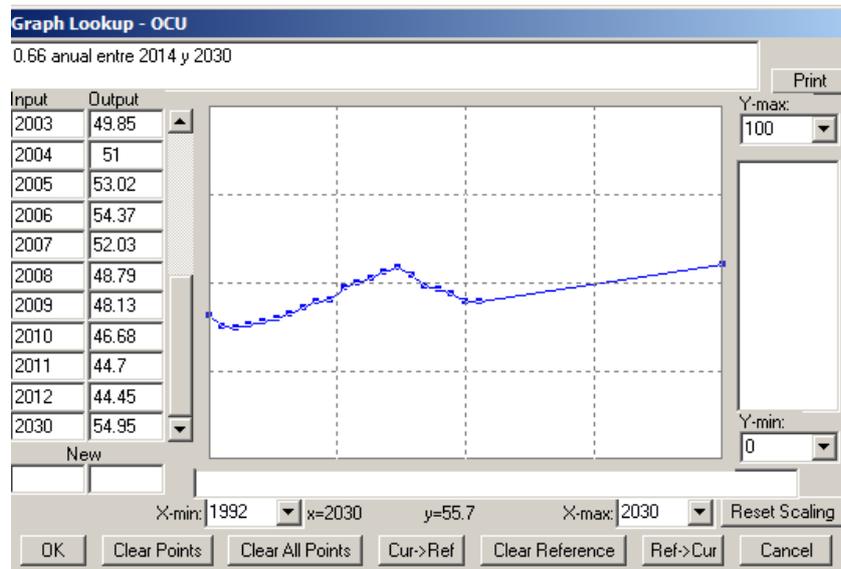


Figura 84 – Evolución de población ocupada en las simulaciones del modelo 2.

- **Género:** esta variable refleja el desequilibrio en el reparto de roles y, por tanto, de tareas que históricamente se ha dado en nuestras sociedades. La tendencia reciente es compleja de simplificar, pero para esta simulación asumimos que hay un aumento de la presencia pública de las personas que tradicionalmente han estado relegadas a actividades más vinculadas al ámbito privado, principalmente mujeres. Eso se traduce en una disminución del indicador de género de forma que en 2030 se considere que hay un 60% de la población con un comportamiento frente a la elección modal propia de la socialización tradicionalmente masculina.

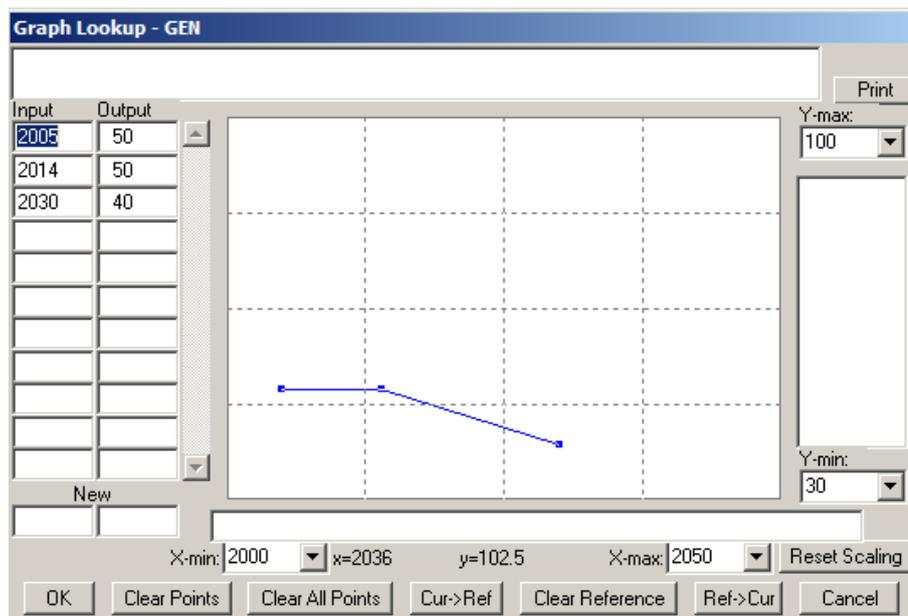


Figura 85 – Evolución de distribución de rol de género en las simulaciones del modelo 2.

- Regulación:** en este modelo también se incluye la intensidad energética como un indicador variable que actúa sobre la Intensidad energética. En este caso, se va a suponer directamente una mejora gradual hasta 2030 que haga que en 2030 la eficiencia energética agregada sea de 0,05 l/km, lo que hoy en día es el consumo de un vehículo en condiciones de circulación óptimas, por lo que no es un escenario inverosímil.

Los resultados de las simulaciones se recogen a continuación mediante gráficas y algunos comentarios:

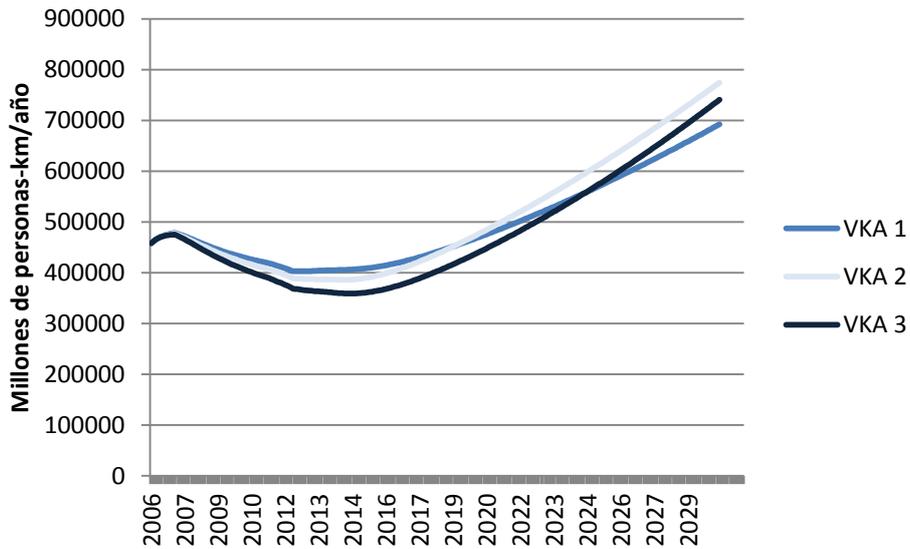


Figura 86 – Evolución de la producción de transporte en automóvil según el modelo2 para los 3 escenarios.

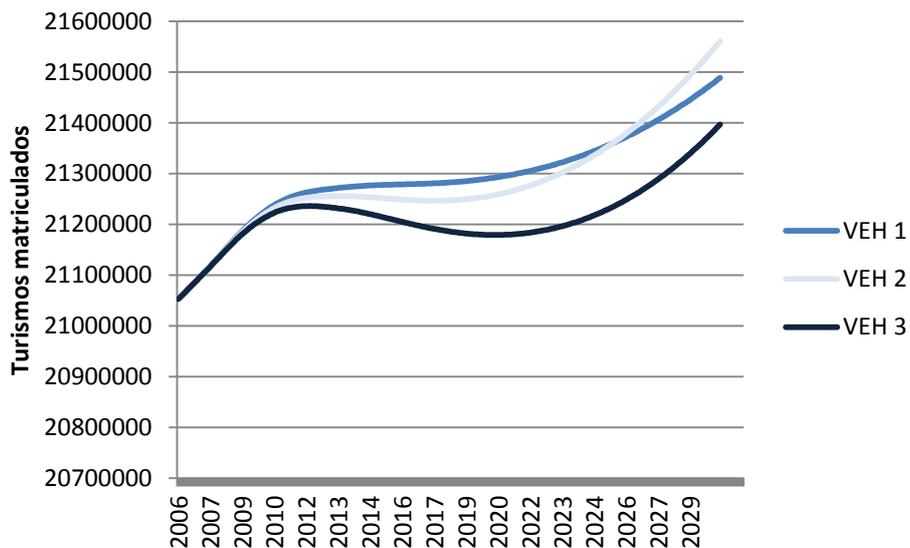


Figura 87 – Evolución de la producción de transporte en automóvil según el modelo2 para los 3 escenarios.

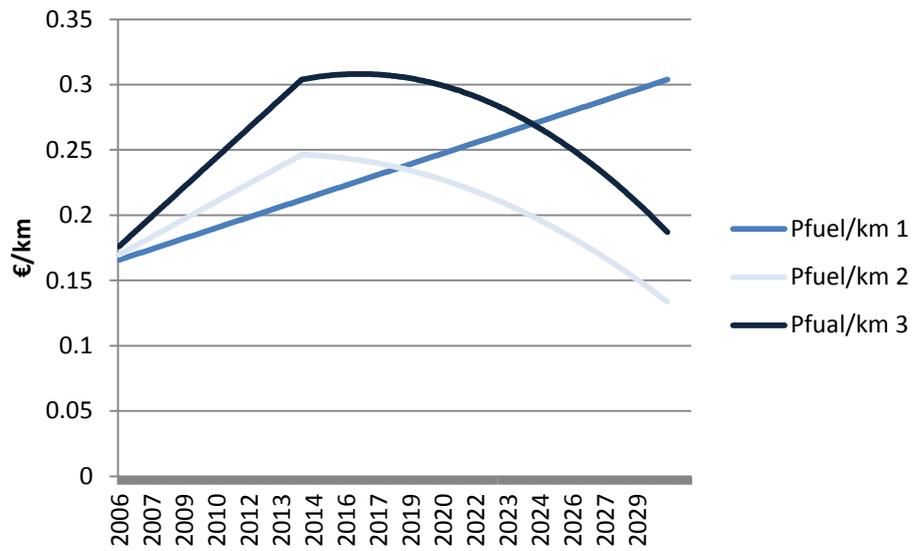


Figura 88 – Evolución del precio específico del combustible según el modelo2 para los 3 escenarios.

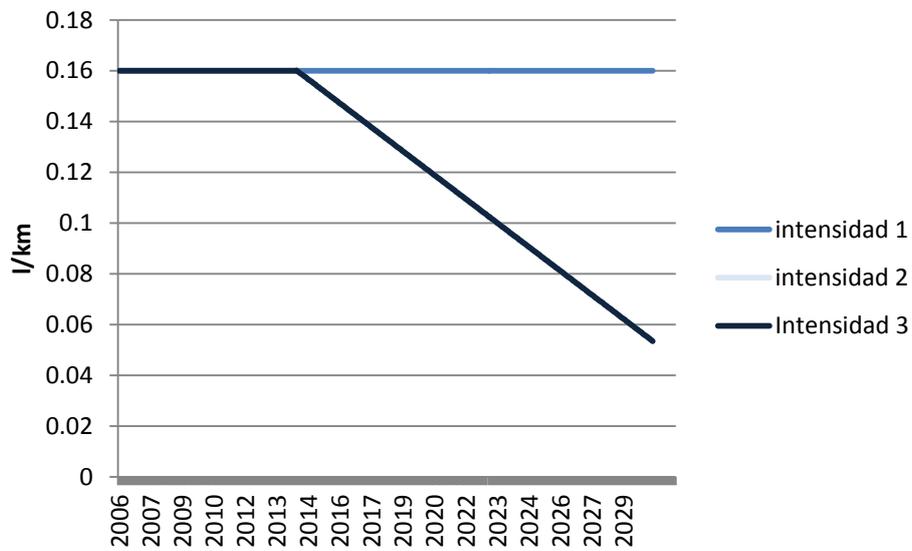


Figura 89 – Evolución de la intensidad energética según el modelo2 para los 3 escenarios.

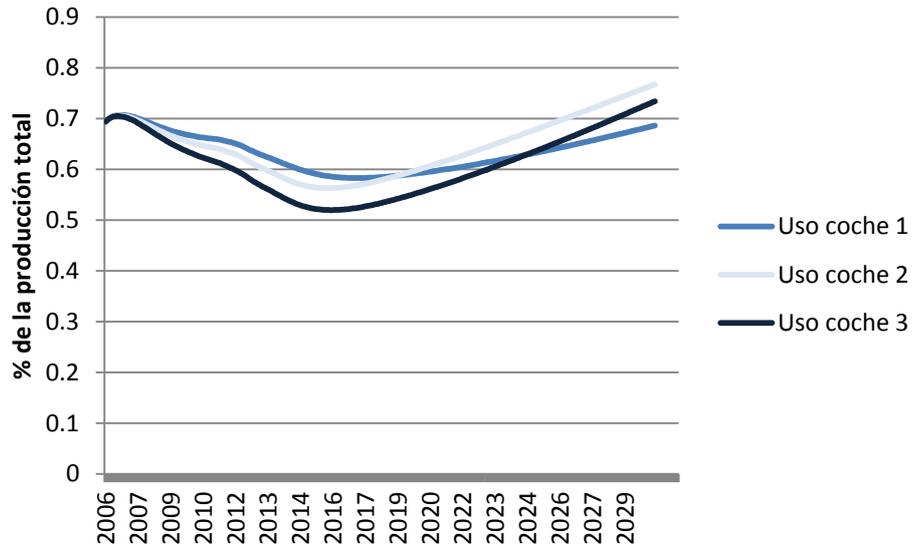


Figura 90 – Evolución de la cuota de producción de transporte cubierta con automóvil según el modelo2 para los 3 escenarios.

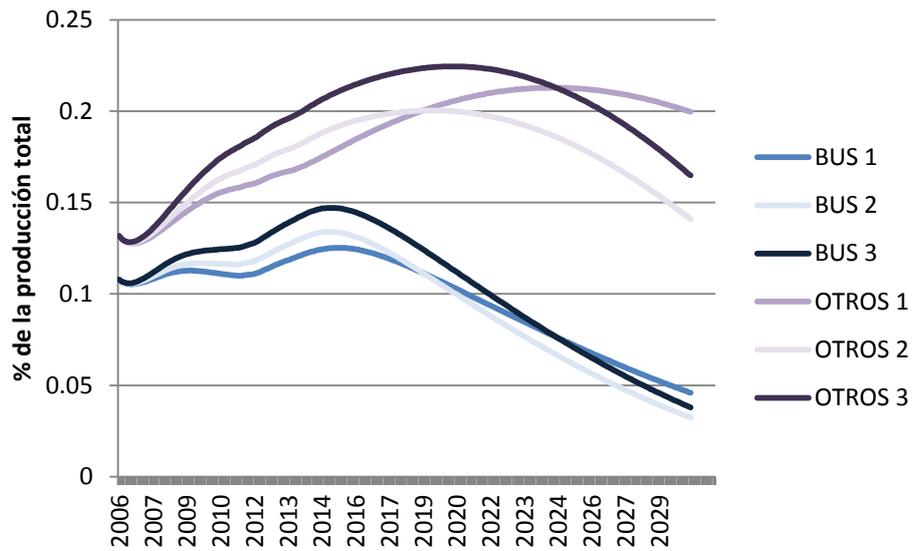


Figura 91 – Evolución de la cuota de producción de transporte cubierta con transporte público (autobús y otros) según el modelo2 para los 3 escenarios.

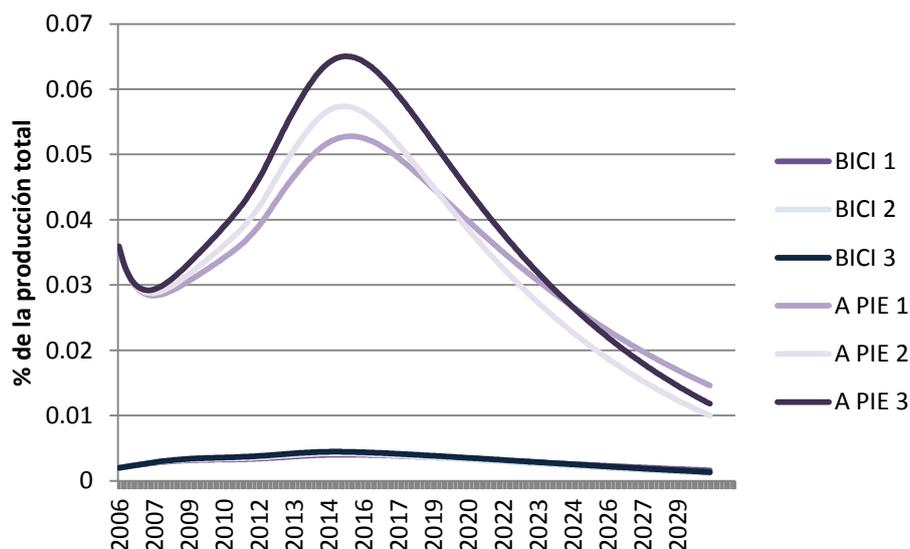


Figura 92 – Evolución de la cuota de producción de transporte cubierta con modos no motorizados (bicicleta y peatonal) según el modelo2 para los 3 escenarios.

A primera vista, parecen unos resultados más coherentes que los obtenidos con el primer modelo. Puede ser irreal que lo ganado en eficiencia energética haga que el precio del combustible baje y a su vez ello provoque un aumento de la producción en automóvil para los escenarios con combustible más caro, pero al menos en este caso los resultados son coherentes e intuitivos.

Se han añadido en este caso también, dos gráficas a mayores en las que salen los modos “adyacentes” 2 a 2: autobús y otros públicos y bici con peatonal. En el otro modelo estas gráficas son confusas y no aportan prácticamente ninguna información puesto que entre escenarios no hay apenas divergencia. Sin embargo, en este sí que se aprecia el crecimiento de los otros modos de transporte públicos frente al autobús, afectado por la subida de combustibles y por la congestión, si bien es cierto que el acusado efecto rebote hace que a partir de 2024 el resto de transporte públicos también entre en decline a favor del automóvil. La otra gráfica indica la poca relevancia de la bicicleta como alternativa a un nivel agregado y para la producción frente a la elasticidad del modo peatonal, que según condiciones dobla su participación en el reparto modal.

A continuación se muestran las gráficas con la evolución del reparto modal para los 3 escenarios:

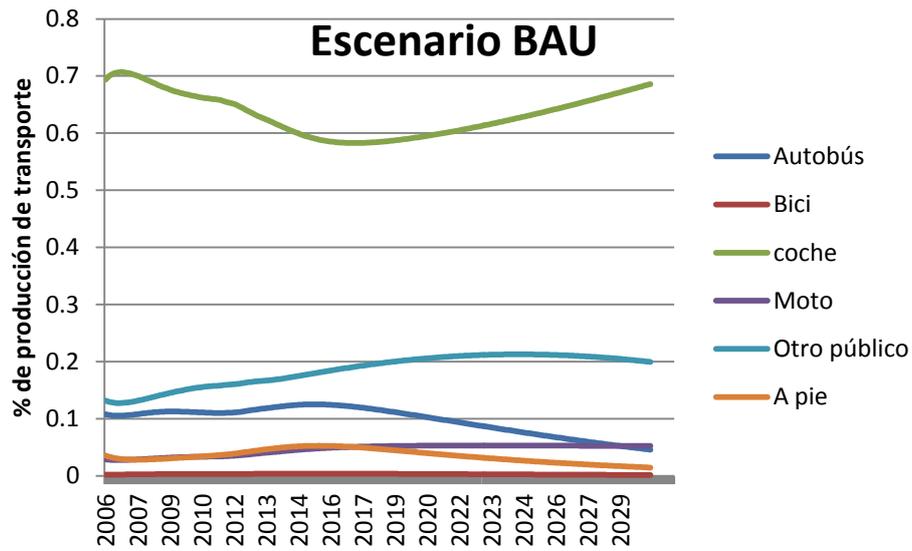


Figura 93 – Evolución del reparto modal según el modelo 2 para el escenario BAU.

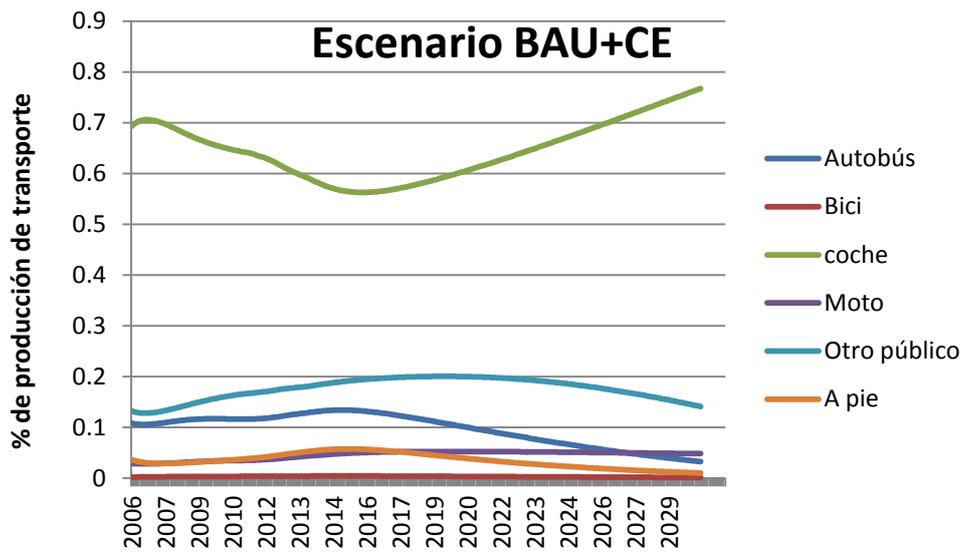


Figura 94 – Evolución del reparto modal según el modelo 2 para el escenario BAU+CE.

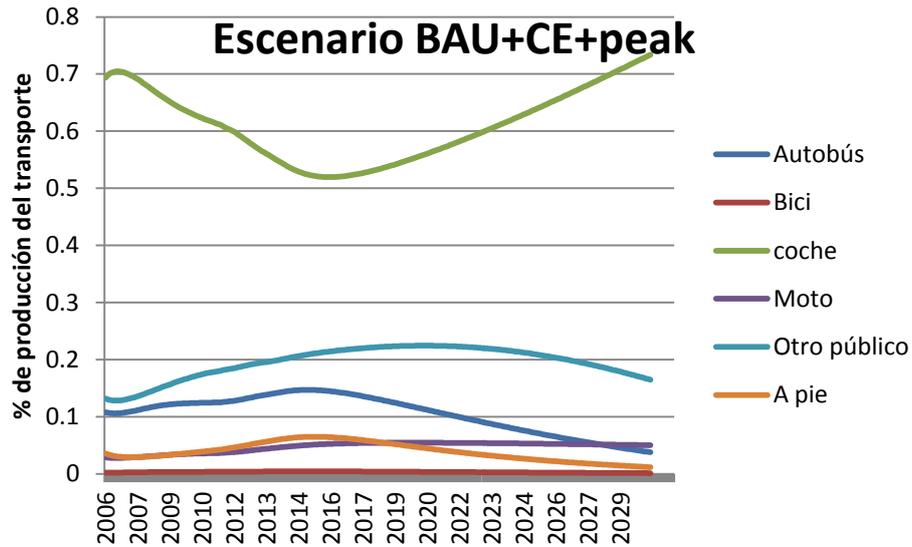


Figura 95 – Evolución del reparto modal según el modelo 2 para el escenario BAU+CE+peak.

Salta a la vista que el modelo arroja una clara tendencia hacia el mantenimiento del automóvil como modo dominante en el transporte de personas.

Des mismo modo que para el modelo anterior, se van a representar en 2 gráficos el reparto modal de la producción de transporte en 2015 y 2030.

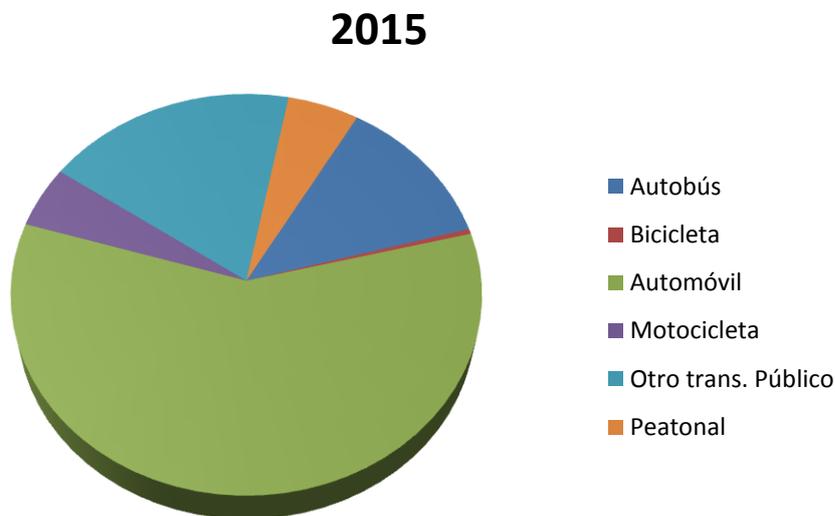


Figura 96 – Reparto modal de la movilidad en el año 2015 según el modelo 2.

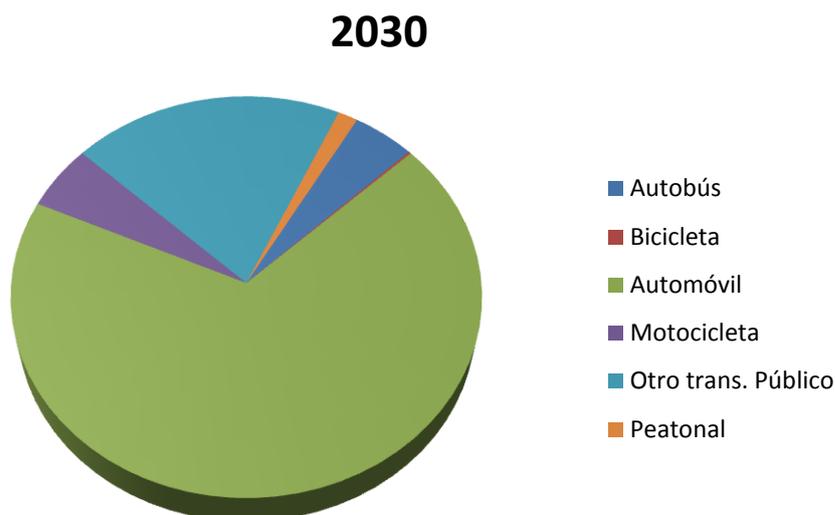


Figura 97 – Reparto modal de la movilidad en el año 2030 según el modelo 2.

2. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad para este modelo sigue la misma lógica que en el anterior: pequeñas variaciones en los valores o los valores finales de las variables para estudiar el impacto sobre algunas variables significativas del modelo.

Para este modelo las variables consideradas significativas son las mismas que en la primera parte del análisis de sensibilidad del otro modelo: Parque de vehículos, Precio del fuel por kilómetro y cuota de uso de automóvil. En este caso, el precio de fuel no aporta prácticamente nada, puesto que es indiferente a la mayoría de las variables, aún así se incluye.

Por otro lado, para estudiar la variable REGULACIÓN es necesario simular en el escenario BAU+CE, puesto que en el escenario BAU esta variable no interviene.

Así pues, las variables que se van a estudiar en este análisis son:

- Ingresos: variando el valor final, correspondiente a 2030.
- Regulación: variando el decrecimiento anual de la intensidad energética.
- Población: cambio sobre el valor final, de 2030. Es la variable que afecta a la densidad de población y por tanto a la población de las metrópolis y ciudades.
- Kilómetros de red: cambios sobre el valor final, de 2030.
- %Producción Urbana: es una constante.
- Vida útil vehículos: cambios en el valor inicial, de 2006, estimado en 218 meses de vida.
- Ocupación: cambios en el valor final, de 2030.
- Hogares con niños: cambios en el valor final, de 2030.
- Género: cambios en el valor final, de 2030.
- IPC: es una constante.

Estos son los resultados:

Variable	Ingresos				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
% cambio sobre valor final					
Valor final variable	40.95950	36.86350	38.91150	43.00700	45.05500
VEH	21488500	21207900	21342900	21644600	21811500
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68500	0.63680	0.66200	0.70850	0.72972
Sensibilidad VEH		0.13058	0.13551	0.14529	0.15031
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		0.70365	0.67153	0.68613	0.65285

Tabla 47 – Sensibilidad de las variables ante los ingresos en el modelo 2.

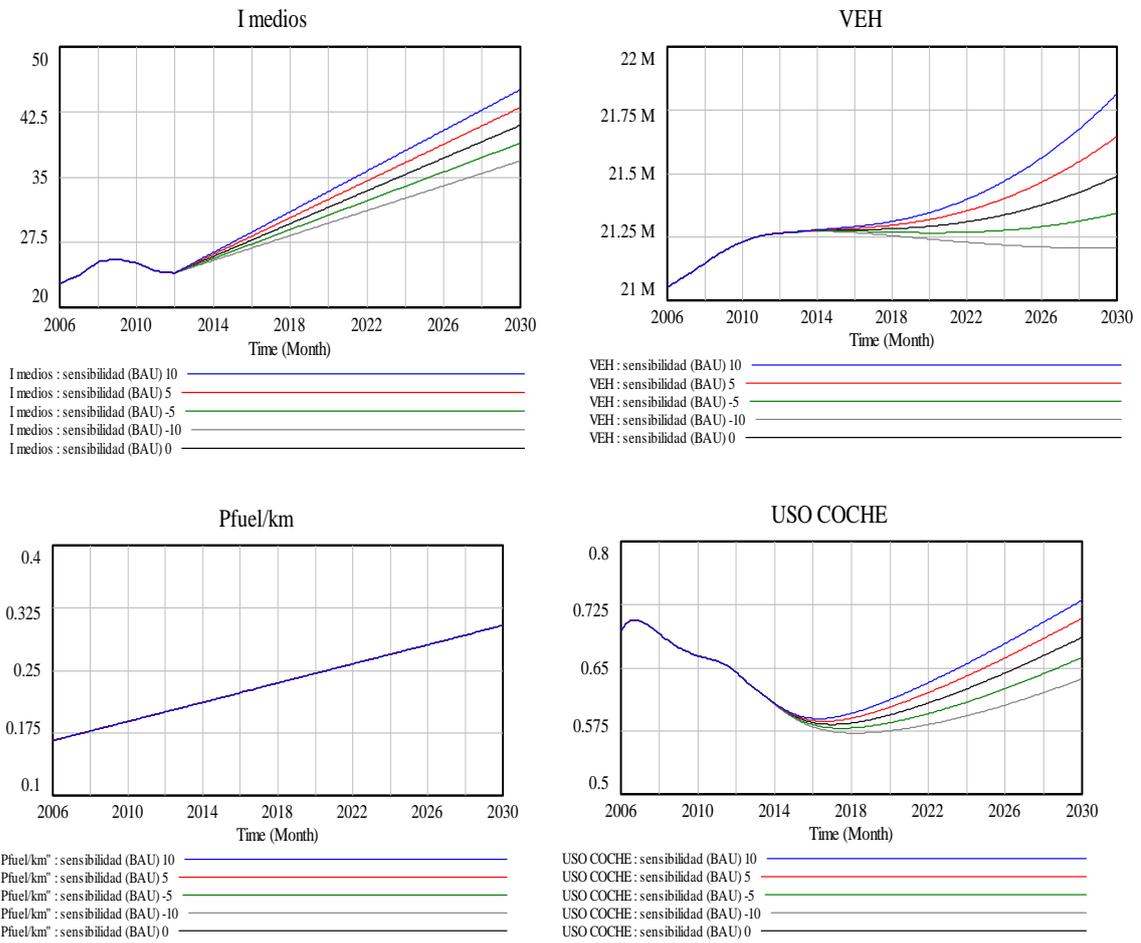


Figura 98 – Impacto de los ingresos en las variables del modelo 2.

Variable	REGULACION				
% cambio sobre evolución anual	0.00000	-0.10000	-0.05000	0.05000	0.10000
Valor final variable	0.29260	0.36342	0.32805	0.25732	0.22195
VEH	21560800	21535100	21547800	21574400	21588300
Pfuel/km	0.13365	0.16026	0.14696	0.12034	0.10704
% USO Coche	0.76723	0.75093	0.75888	0.77601	0.78522
Sensibilidad VEH		0.01192	0.01206	0.01262	0.01275
Sensibilidad Pfuel		-1.99119	-1.99119	-1.99134	-1.99126
Sensibilidad %Uso coche		0.21249	0.21774	0.22874	0.23449

Tabla 48 – Sensibilidad de las variables ante la REGULACIÓN en el modelo 2.

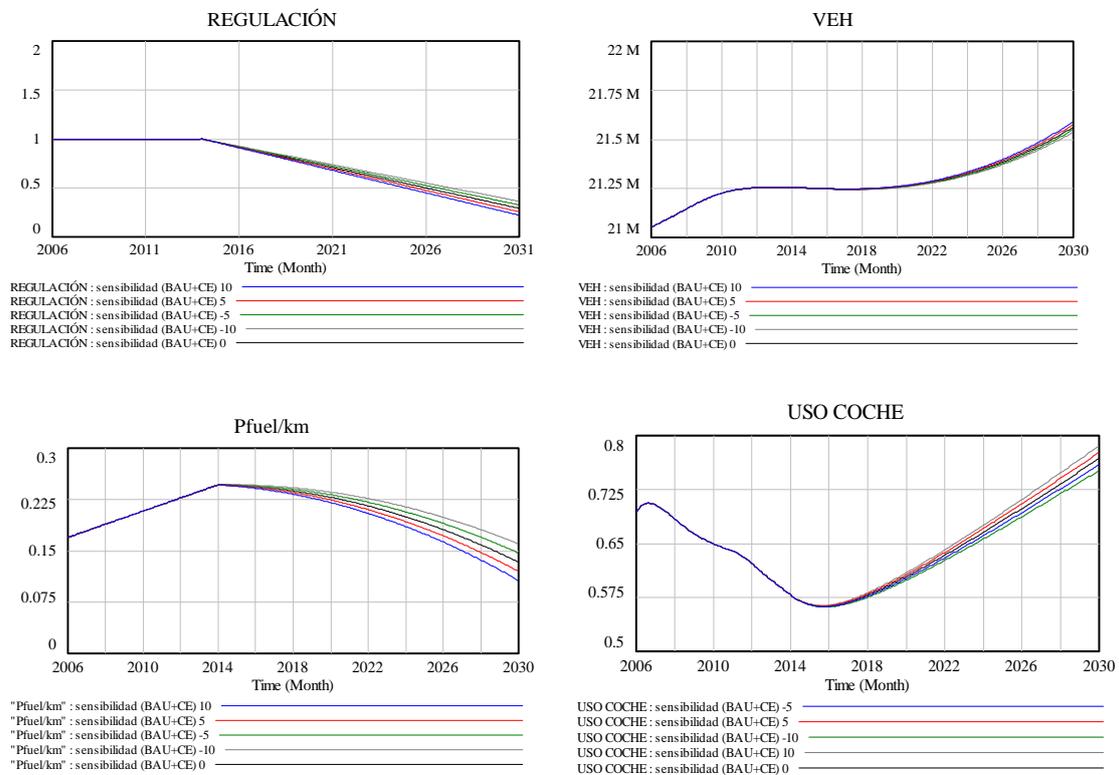


Figura 99 – Impacto de la REGULACIÓN en las variables del modelo 2.

Variable	Población				
% cambio valor final	0.000	-0.100	-0.050	0.050	0.100
Valor final variable	66815900	60134310	63475105	70156695	73497490
VEH	21488500	21580300	21534100	21443300	21398700
Pfuel/km	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168
% USO Coche	0.685	0.727	0.706	0.666	0.645
Sensibilidad VEH		-0.043	-0.042	-0.042	-0.042
Sensibilidad Pfuel		0.000	0.000	0.000	0.000
Sensibilidad %Uso coche		-0.612	-0.625	-0.566	-0.578

Tabla 49 – Sensibilidad de las variables ante la población en el modelo 2.

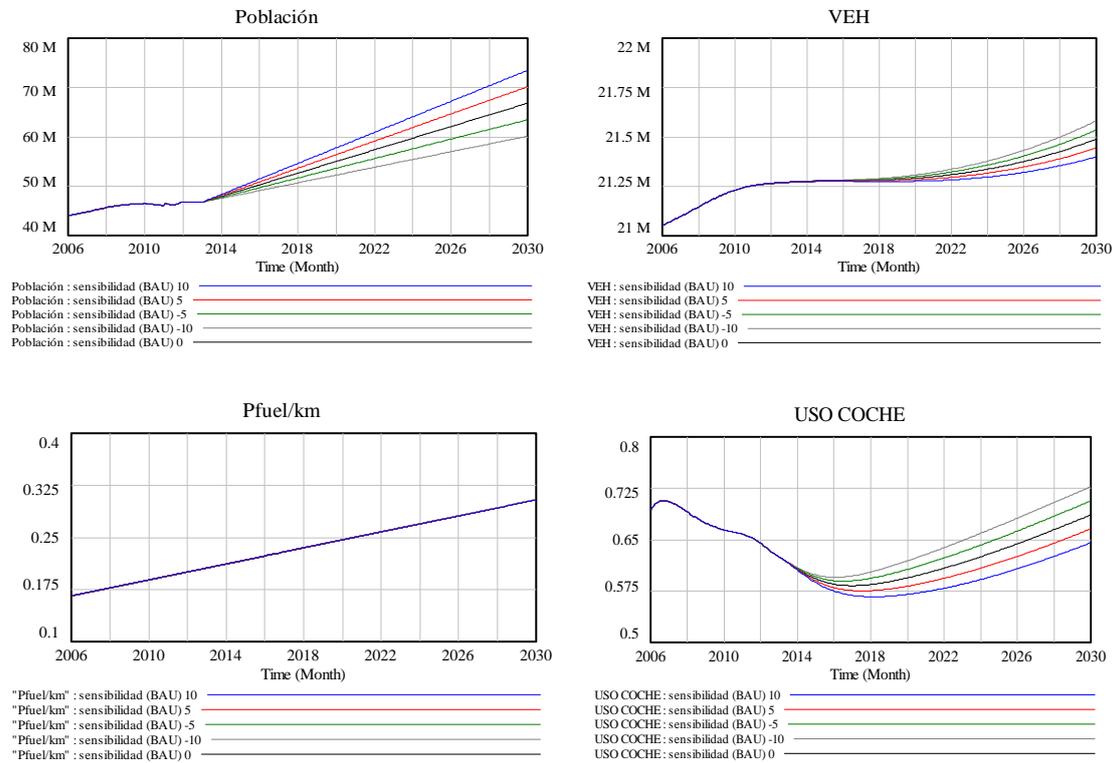


Figura 100 – Impacto de la población en las variables del modelo 2.

Variable	km de red				
% cambio valor final	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	663742.0	597367.8	630554.9	696929.1	730116.2
VEH	21488500	21475200	21482000	21494700	21500700
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.67950	0.68280	0.68890	0.69166
Sensibilidad VEH		0.00619	0.00605	0.00577	0.00568
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		0.09443	0.09266	0.08519	0.08283

Tabla 50 – Sensibilidad de las variables ante la extensión de la red en el modelo 2.

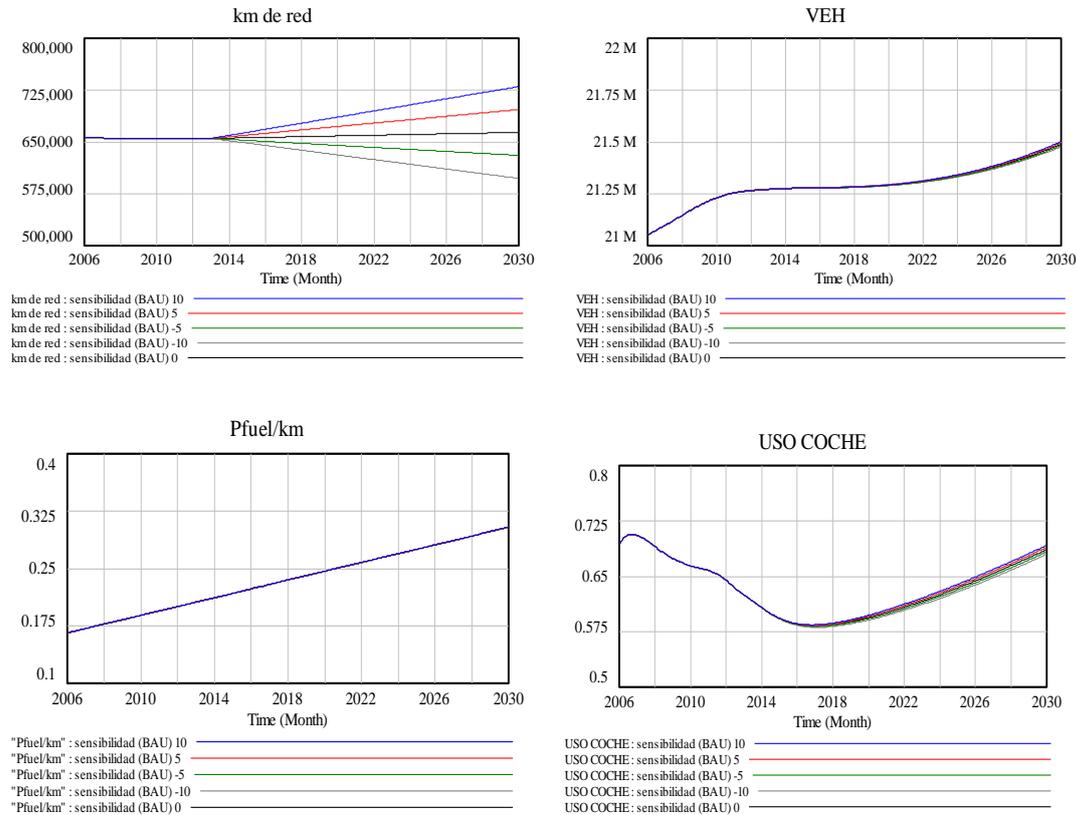


Figura 101 – Impacto de la extensión de la red en las variables del modelo 2.

Variable	% VKA urbana				
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	0.48800	0.43920	0.46360	0.51240	0.53680
VEH	21488500	21487700	21488100	21488800	21489200
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.68585	0.68592	0.68604	0.68609
Sensibilidad VEH		0.00037	0.00037	0.00028	0.00033
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		0.00187	0.00181	0.00169	0.00169

Tabla 51 – Sensibilidad de las variables ante la producción de transporte urbano en el modelo 2.

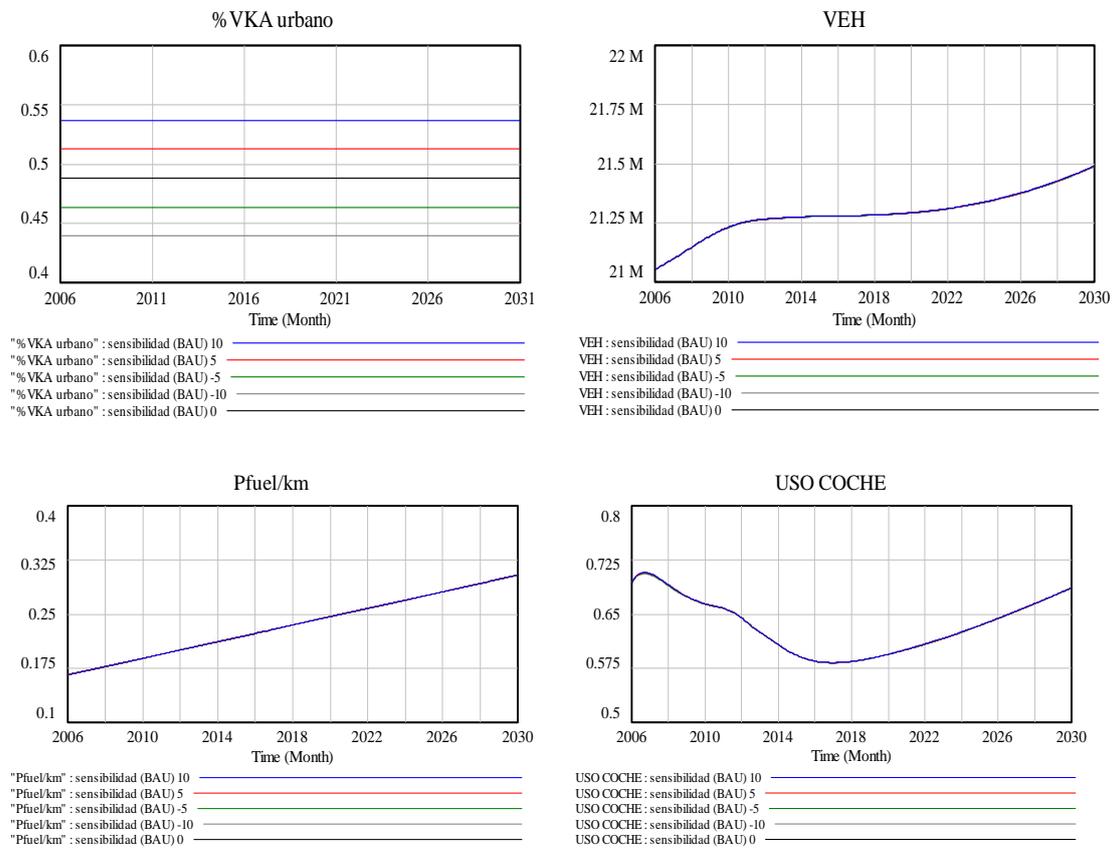


Figura 102 – Impacto de la producción de transporte urbano en las variables del modelo 2.

Variable	Vida útil vehículos				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
% cambio sobre valor inicial	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor inicial variable	218.0	196.2	207.1	228.9	239.8
VEH	21488500	21190200	21346700	21606100	21724800
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.68041	0.68335	0.68814	0.69029
Sensibilidad VEH		0.13882	0.13198	0.10945	0.10997
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		0.08121	0.07665	0.06292	0.06289

Tabla 52 – Sensibilidad de las variables ante la vida útil de los turismos en el modelo 2.

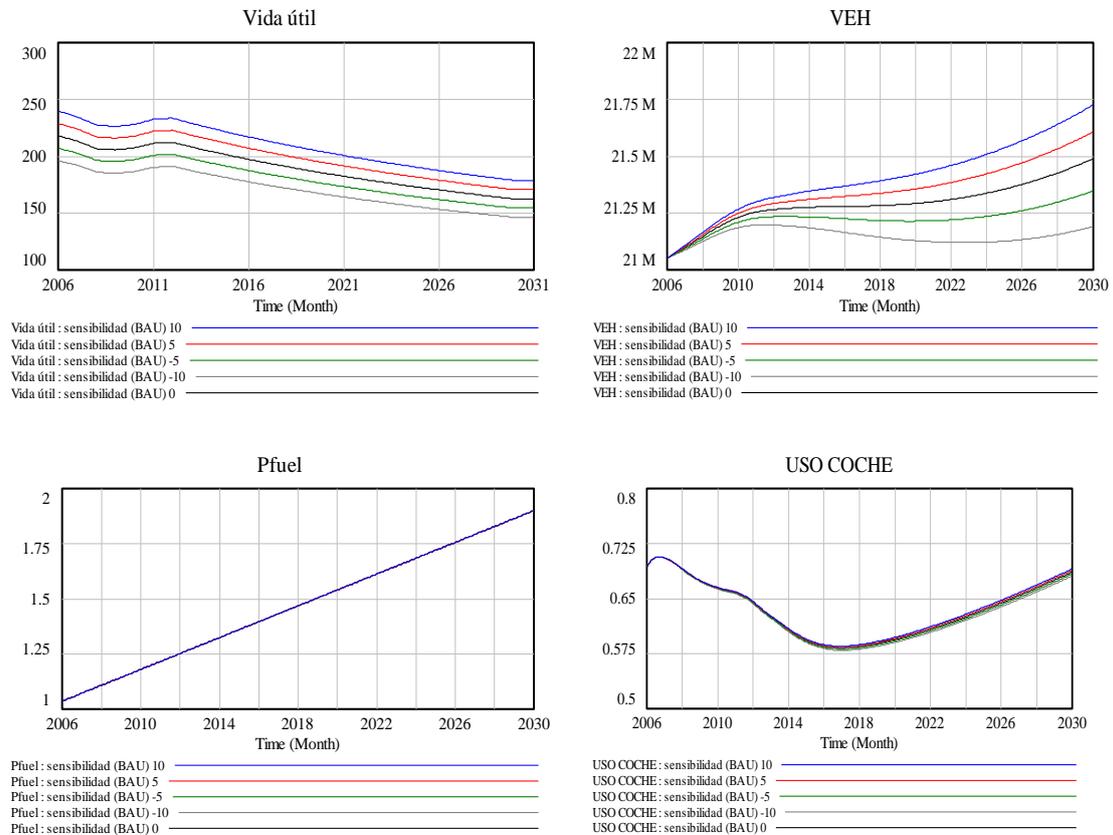


Figura 103 – Impacto de la vida útil de los turismos en las variables del modelo 2.

Variable	Ocupación				
% cambio valor final	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	54.95000	49.45500	52.20250	57.69750	60.44500
VEH	21488500	21429300	21459300	21526900	21544600
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.64773	0.66725	0.70392	0.72107
Sensibilidad VEH		0.02755	0.02718	0.03574	0.02611
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		0.55751	0.54605	0.52299	0.51150

Tabla 53 – Sensibilidad de las variables ante la población ocupada en el modelo 2.

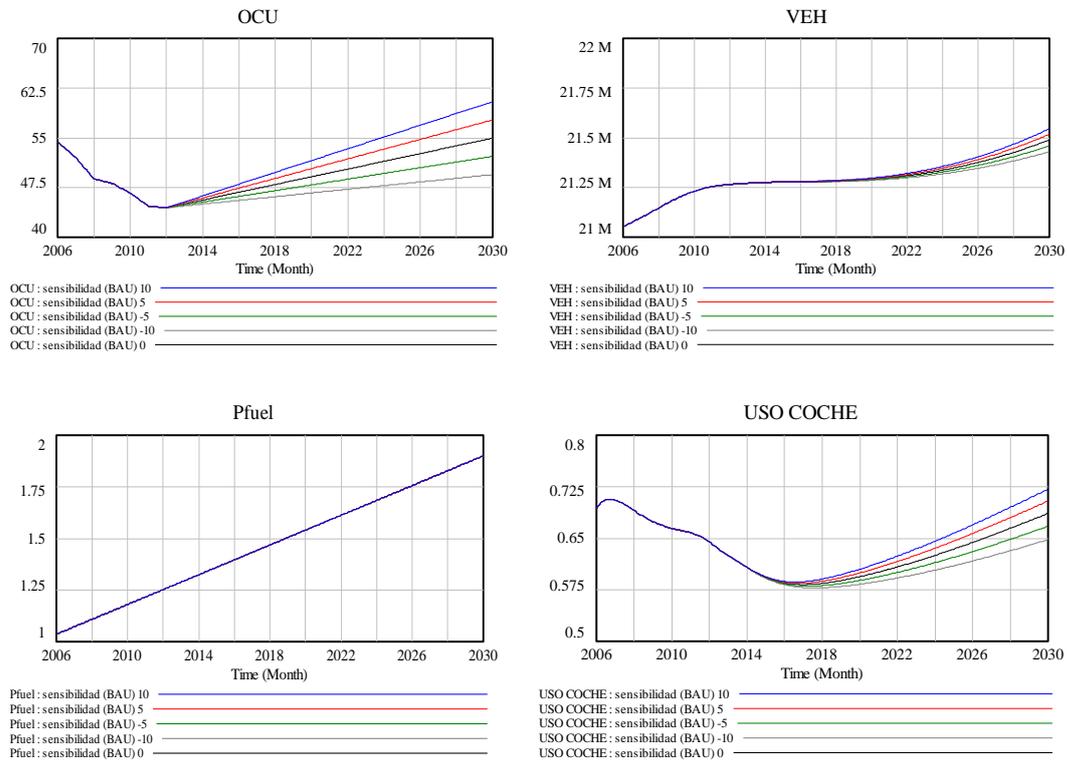


Figura 104 – Impacto de la población ocupada en las variables del modelo 2.

Variable	Hogares con niños				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	0.40000	0.36000	0.38000	0.42000	0.44000
VEH	21488500	21366600	21429300	21544000	21595800
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.58364	0.63727	0.72953	0.76798
Sensibilidad VEH		0.05673	0.05510	0.05166	0.04993
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		1.49190	1.41999	1.26972	1.19543

Tabla 54 – Sensibilidad de las variables ante la proporción de hogares con niños en el modelo 2.

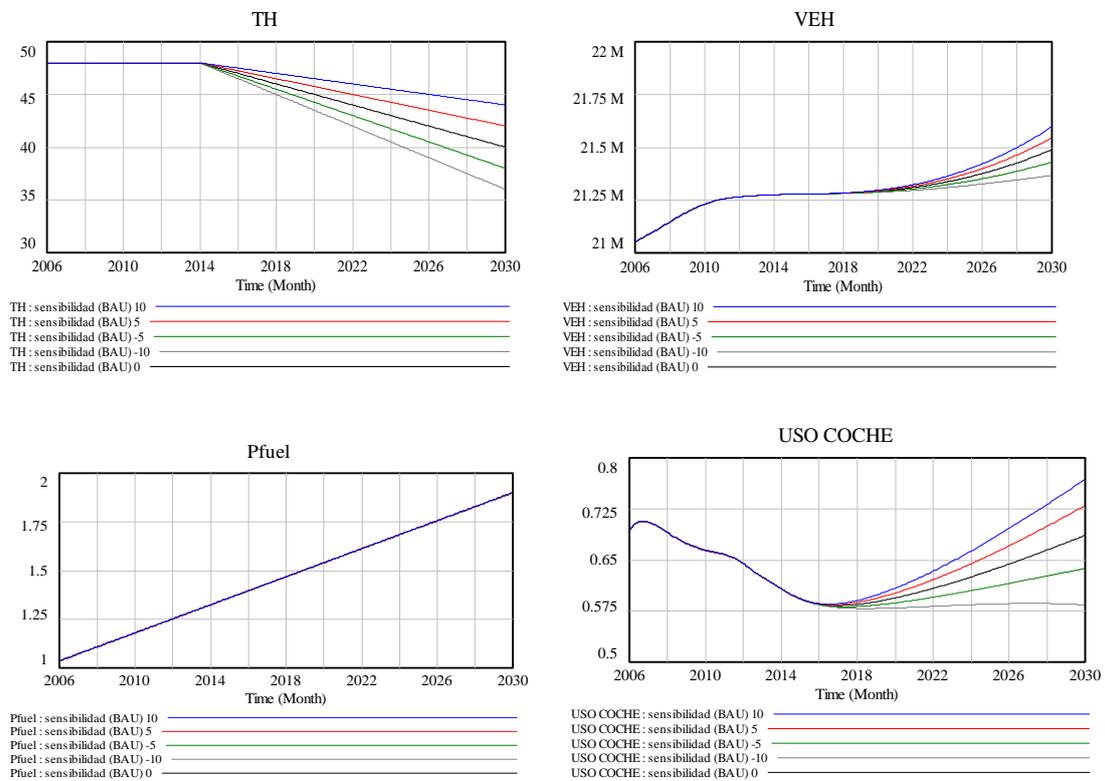


Figura 105 – Impacto de la proporción de hogares con niños en las variables del modelo 2.

Variable	Género				
	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor final variable	0.40000	0.36000	0.38000	0.42000	0.44000
VEH	21488500	21588600	21539000	21437400	21386100
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.76368	0.72585	0.64465	0.60249
Sensibilidad VEH		-0.04658	-0.04700	-0.04756	-0.04765
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		-1.13266	-1.16234	-1.20482	-1.21705

Tabla 55 – Sensibilidad de las variables ante el género en el modelo 2.

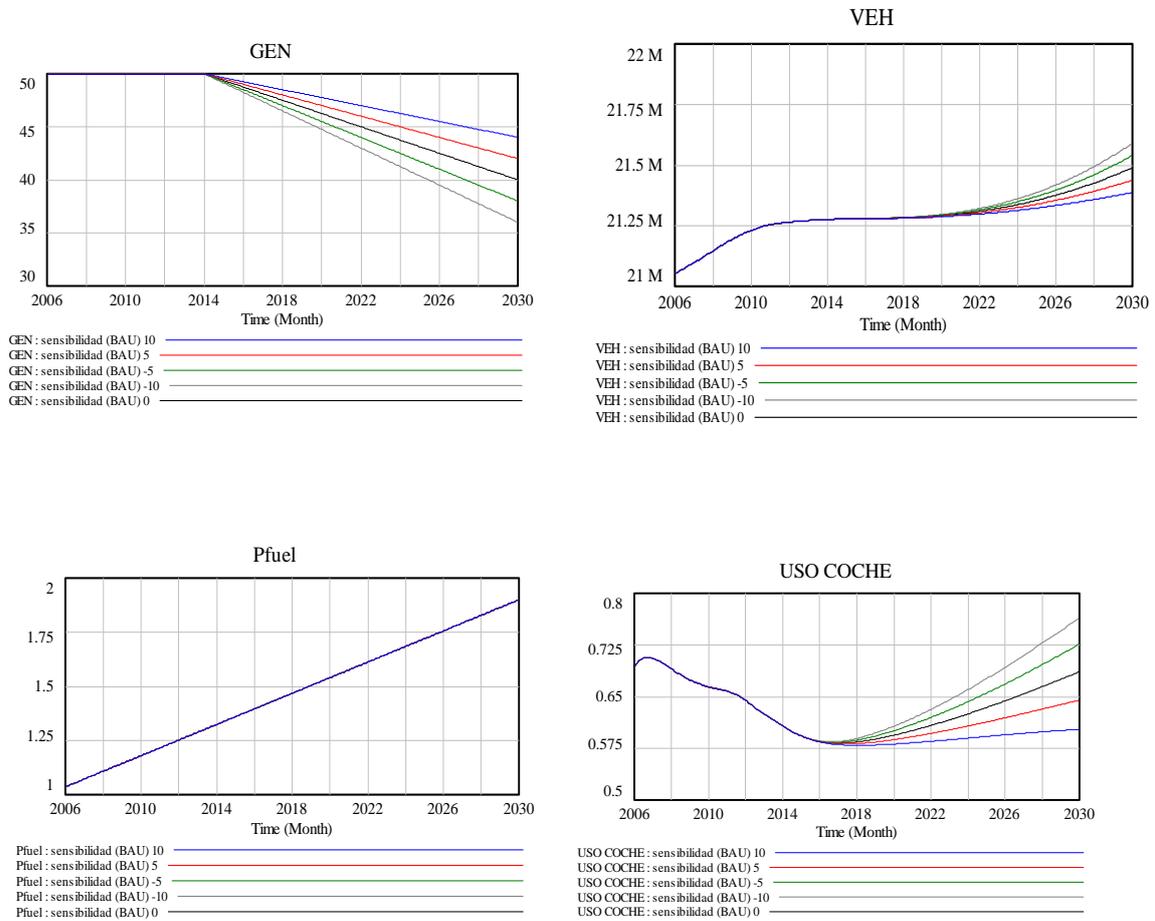


Figura 106 – Impacto del género en las variables del modelo 2.

Variable	IPC				
% cambio	0.00	-0.10	-0.05	0.05	0.10
Valor variable	0.02700	0.02430	0.02565	0.02835	0.02970
VEH	21488500	21618900	21552400	21427100	21368200
Pfuel/km	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800	0.16800
% USO Coche	0.68598	0.68269	0.68438	0.68750	0.68894
Sensibilidad VEH		-0.06068	-0.05947	-0.05715	-0.05598
Sensibilidad Pfuel		0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Sensibilidad %Uso coche		0.04789	0.04659	0.04429	0.04318

Tabla 56 – Sensibilidad de las variables ante el IPC en el modelo 2.

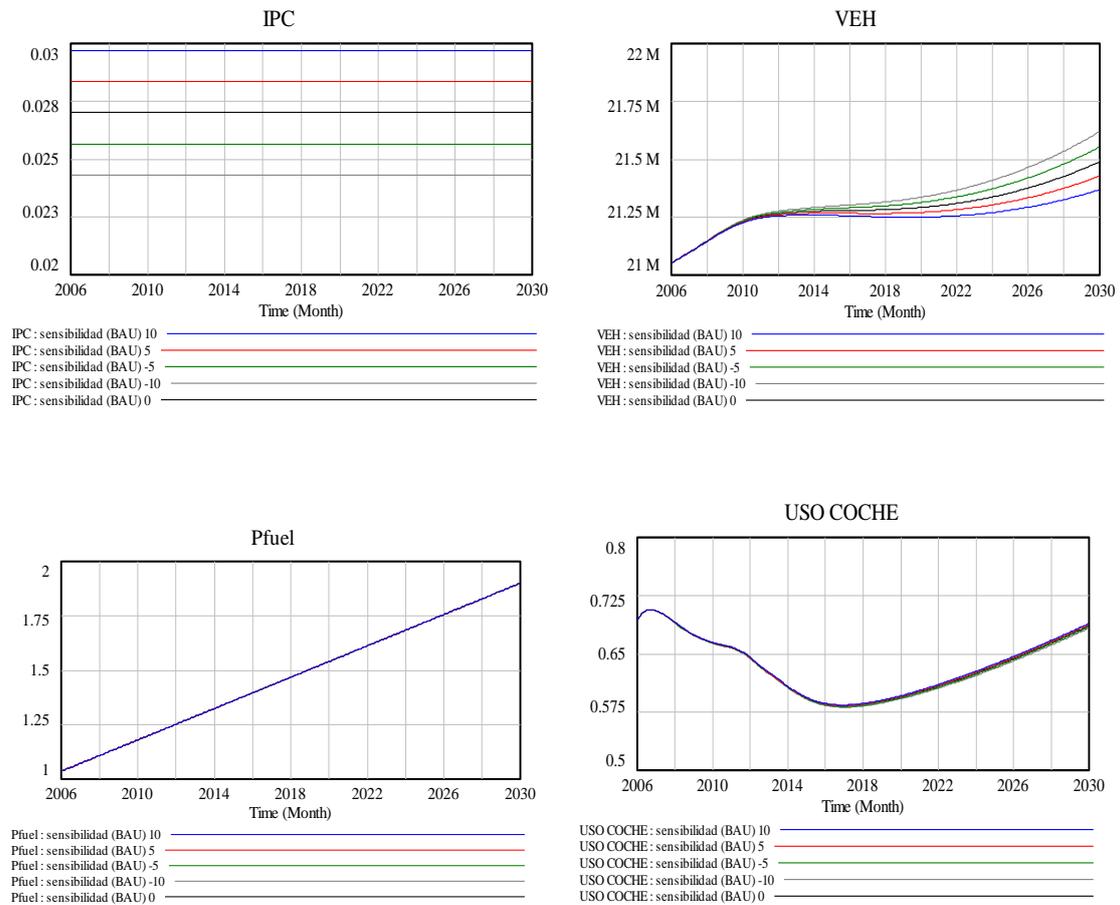


Figura 107 – Impacto del IPC en las variables del modelo 2.

Los resultados de este análisis de sensibilidad son todos congruentes. Destaca el impacto que tienen las variables que afectan al Hábito, frente al poco efecto que tenían con el modelo anterior, sobre el reparto modal. Especialmente la cantidad de hogares con niños y el género, que tienen tal efecto que un cambio del 10% sobre el valor final puede hacer cambiar la tendencia ascendente del uso del coche en un escenario BAU. También es significativo que en el caso del género, el impacto sobre el uso de coche es bastante simétrico con el que se produce sobre el uso de otros transportes públicos, mientras que el autobús no sufre apenas cambios.

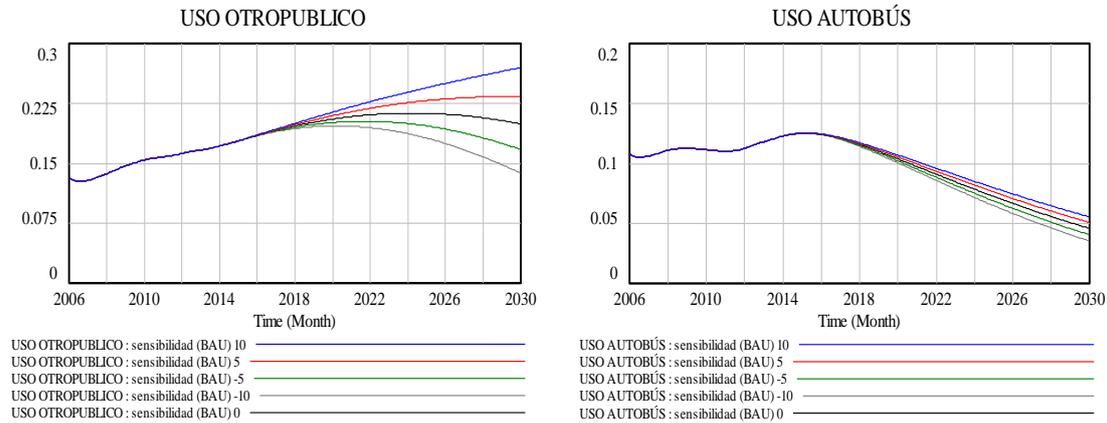


Figura 108 – Impacto del género sobre el uso de los transportes públicos.

Lo mismo ocurre con los hogares con niños.

En este caso también se ve que en los valores finales del reparto modal y otras variables “de estado” como el parque de vehículos, la REGULACIÓN tal y como está definida tiene un impacto muy discreto.

También son muy discretos los efectos de una mayor participación de la producción de transporte por núcleos urbanos, con las reducciones de velocidad media que conllevan y el aumento de congestión asociado.

Mediante análisis de sensibilidad se puede estudiar también la demanda inducida, producida por un aumento de las vías de circulación. En este caso, la demanda total es fija, pero un aumento significativo en la cuota cubierta por el automóvil vinculada a un aumento de la red viaria significaría que existe una importante demanda inducida. No es el caso. Aunque existe una relación positiva entre aumento de los kilómetros de red y aumento de uso de automóvil, el efecto es muy limitado.

Por último, a diferencia del modelo anterior, en este caso el parque de vehículos tiene menor relevancia frente al Hábito a la hora de concretar el reparto modal. Esto se observa con el análisis sobre la vida útil de los vehículos, que tiene un impacto enorme sobre el parque de vehículos, produciendo incluso cambios de tendencia, y sin embargo esto no se traduce en cambios significativos en el Uso del automóvil.

c. Comparativa de modelos y datos históricos

La simulación parte de 2006 para ambos modelos y en todos los escenarios, lo que permite contrastar un tercio de la simulación con la realidad en aquellos aspectos sobre los que hay datos. Los años entre 2006 y 2012 han sido años en los que la realidad ha presentado comportamientos nada predecibles y por ello son una buena prueba para los modelos.

Se van a comparar los datos históricos con los de los modelos de las variables cualitativas observables con mayor facilidad: producción de transporte en automóvil, parque de vehículos e intensidad energética. Para este estudio, los escenarios deberían contrastarse con respecto del reparto modal, pero al no haber datos anuales homogéneos del reparto modal ni para la movilidad ni para el transporte, esta tarea se complica. Sin embargo, se considerará que los 3 indicadores seleccionados tienen una influencia central en el modelo de reparto y por tanto en todo el modelo.

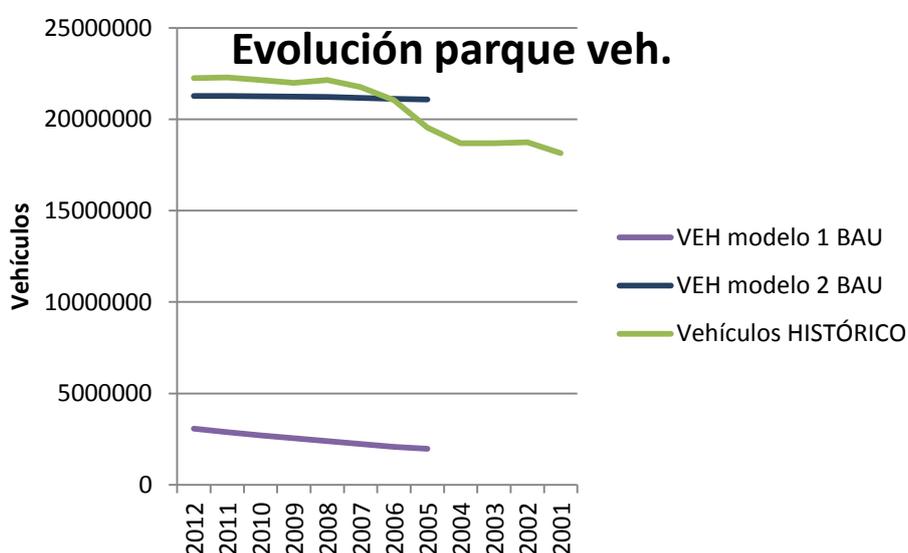


Figura 109 – Comparación resultados modelo 1 y modelo 2 respecto al parque de vehículos con el histórico.

Esta primera gráfica se representa la evolución de los parques de vehículos en los 2 modelos y en el histórico para el escenario BAU. Lo primero que se pone de manifiesto es lo desviado de los datos del parque de vehículos para el modelo 1, que da unos datos un orden de magnitud por debajo de lo real. Por otro lado, la tendencia que muestra este modelo es de crecimiento, cuando entre 2007 y 2012 se aprecia un estancamiento en el parque que sí refleja el modelo 2, mucho más aproximado a los datos reales. Sin embargo, el modelo 2 no muestra con demasiada fidelidad la evolución del modelo, tal vez por empezar la simulación justo en el año en que el crecimiento para, por lo que no recoge la inercia que acompañan sistemas como el representado. Esto hace que haya una cierta divergencia en la magnitud del parque y también en la tendencia, más estancada en los resultados del modelo que en la realidad.

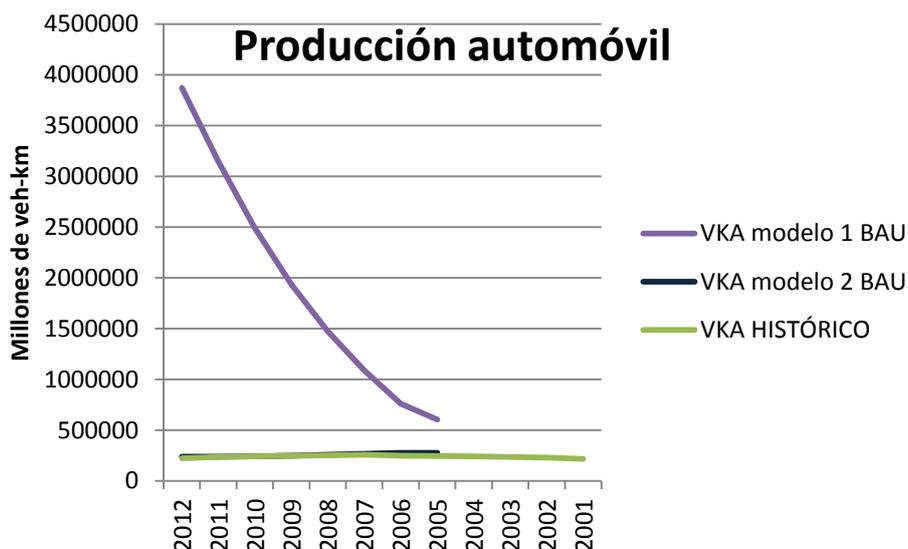


Figura 110 – Comparación resultados modelo 1 y modelo 2 respecto a la producción de transporte en automóvil con el histórico.

La segunda gráfica representa la producción de transporte en automóvil. La divergencia entre modelo y la divergencia entre el primer modelo y la realidad es evidente. Tanto los datos que refleja son completamente irreales. De hecho, el valor de la producción en automóvil para 2006, el año de inicio de la simulación es 603.350 millones de veh-km, cuando el valor de la demanda total de transporte para 2007 se estima en 705.561 millones de pers-km [5], por lo que con ese dato la totalidad del transporte se hubiera cubierto con automóviles. Pero lo más estridente es la tendencia, de crecimiento exponencial, frente a una realidad en la que ha habido una contracción económica y otros procesos que han hecho que la producción de transporte disminuya.

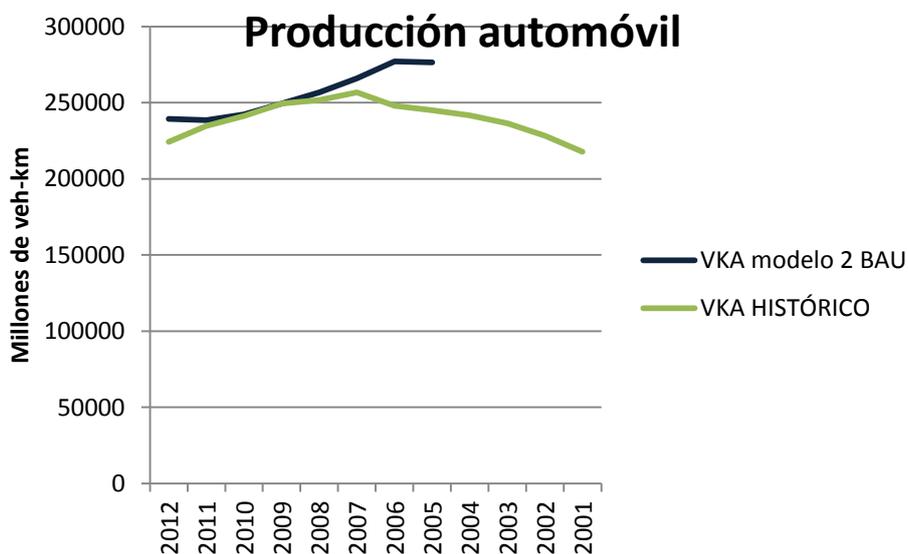


Figura 111 – Comparación resultados modelo 2 respecto a la producción de transporte en automóvil con el histórico.

Para evitar la distorsión de la gráfica anterior se muestra en esta los datos del segundo modelo y la producción histórica según datos del ministerio de Fomento. Esta gráfica muestra como el

segundo modelo sí es sensible a la evolución de los datos de entrada que hace que tenga una tendencia similar a la de los datos históricos y con una magnitud similar que llega a coincidir en algunos años. Sin embargo para 2012 ya se parecía una divergencia entre el modelo y la realidad. Hay que recordar que se está comparando los datos reales con los simulados para el escenario BAU, mientras que en los otros escenarios la producción mantiene la caída hasta 2014 y 2015 respectivamente.

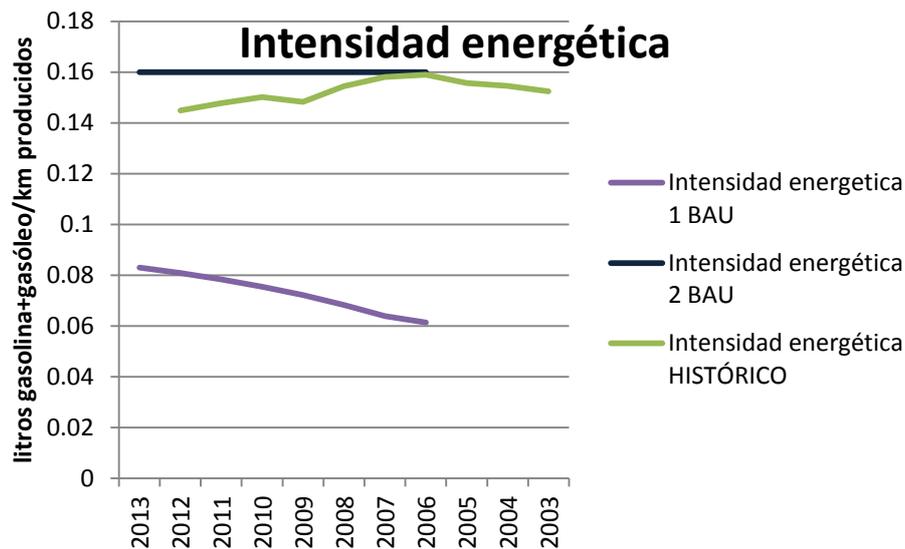
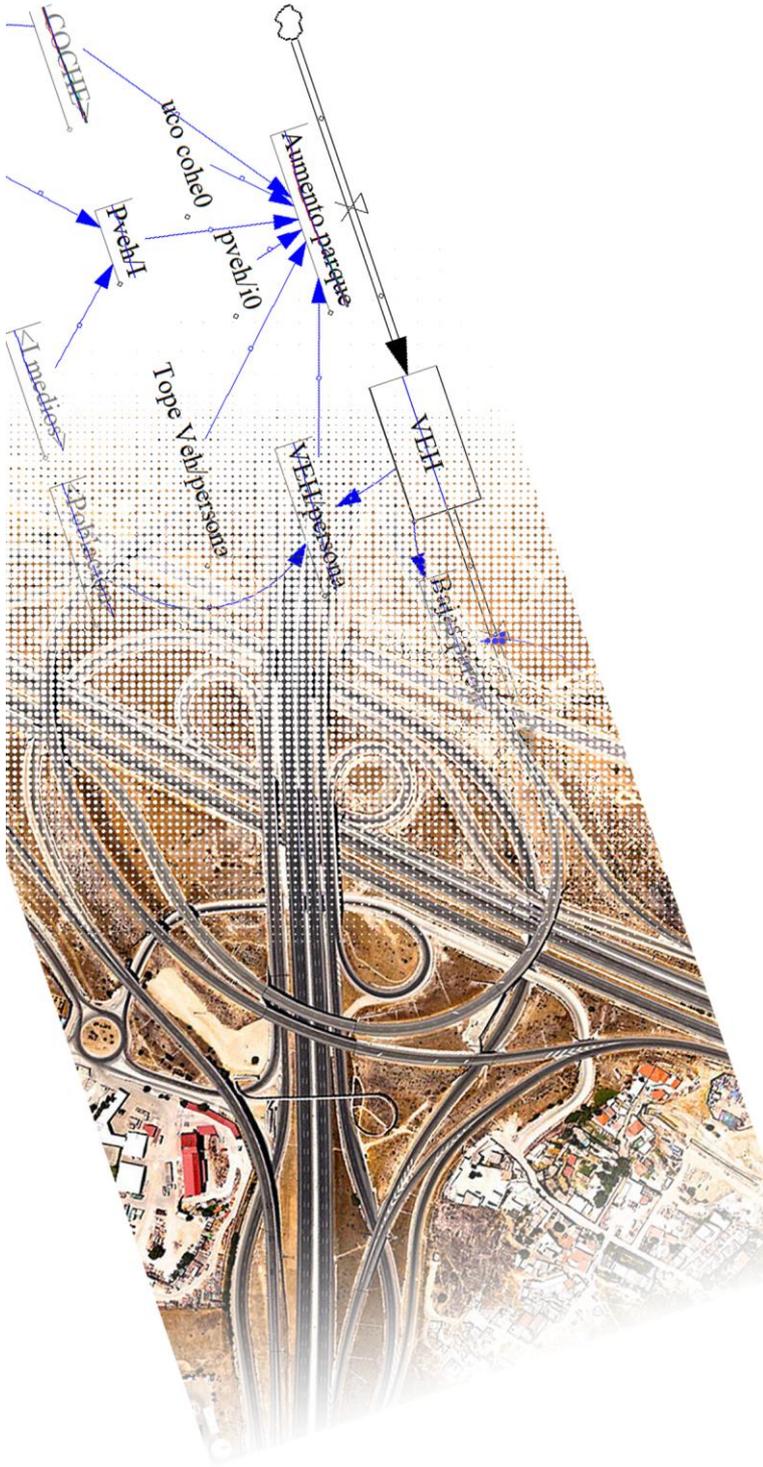


Figura 112 – Comparación resultados modelo 1 y modelo 2 respecto a la intensidad energética con el histórico.

Por último se compara la evolución de la intensidad energética agregada entre modelos, por ser un parámetro central del primer modelo y por ser un elemento sobre el que se plantean hipótesis en las simulaciones. Se aprecia la simplicidad con que se plantea el segundo modelo, en que se asume que la intensidad es constante todas las simulaciones (escenario BAU), mientras que la realidad muestra que esta es una variable que evoluciona, aunque sin cambios bruscos. En todo caso, el valor constante del segundo modelo es más cercano al dato histórico que el del modelo 1, que cerca de un orden de magnitud inferior y sobre todo, que tiene una tendencia opuesta a la real. Esto se explica por las hipótesis del modelo, en que se asume que no ha habido mejoras en la intensidad y que no hay intención de que las haya hasta 2014. Lo que revela esta comparación del primer modelo es que por sí mismo no es capaz de simular la realidad aún con datos exógenos reales.

CAPÍTULO 8

ESTUDIO ECONÓMICO



a. Introducción

En este capítulo se expondrán los costes económicos incurridos en la elaboración de este estudio. De la misma forma que en otros capítulos se analiza si el modelo y la propuesta es consistente técnica y teóricamente, en este se señalará su viabilidad económica.

Los costes están desglosados entre los costes directos y los costes indirectos. Los costes directos son los costes que son exclusivamente imputables a este proyecto, como las horas de trabajo insertas en él o la amortización de equipos y programas. Los costes indirectos son aquellos que si bien suelen constituir una pequeña parte de lo que luego serán los costes totales sí que están relacionados con el trabajo realizado en tanto que sin ellos no se hubiera podido llevar a cabo.

En todo momento se reflejará la estimación del coste necesario para elaborar el proyecto desarrollado, de forma que en el caso de que este proyecto se intentase desarrollar de manera independiente haya una estimación de los costes en los que se incurre.

La estructura será la siguiente:

- Costes directos
 - Costes trabajo
 - Sueldo bruto
 - Cotizaciones Seguridad Social
 - Coste de materiales amortizables
 - Equipos y programas
 - Amortizaciones
 - Coste de materiales no amortizables
- Costes indirectos
 - Gastos de explotación
 - Gastos de transporte
 - Dirección y servicios administrativos

Por último se resumirán todos los gastos en una categoría de gastos totales

b. Costes directos

Como se ha indicado antes, los costes directos son aquellos costes que van insertos en el proyecto, en tanto que son costes de los recursos dedicados exclusivamente a su desarrollo.

- **Costes trabajo**

Para evaluar los costes del trabajo hay que valorar las horas invertidas en él y la remuneración asociada a la cualificación de los trabajadores. Para ello primero se calcula el coste horario en el año en curso del ingeniero a cargo del proyecto, mediante un cómputo de los días laborables y con el dato del salario bruto total al que hay que añadir el 35% destinado a la Seguridad Social.

El salario bruto anual de un ingeniero se ha calculado tomando como referencia el acordado en el Convenio para la Industria Siderometalúrgica de la provincia de Valladolid 2013/2014. Para la categoría profesional de ingeniero refleja un salario bruto anual de: 26.710,04 €/año.

Coste persona año	
Sueldo bruto año	26.710,04 €
Seguridad social (35%) año	9.348,51 €
Coste personal año	36.058,55 €

Tabla 57 – Coste persona/año

Para calcular el coste horario, tomamos también las horas reflejadas en ese mismo convenio como de aplicación para el presente año: 1.744 horas/año.

Días efectivos año	
Duración año	365
Sábados y domingos	-106
Vacaciones y festivos	-37
Pérdidas	-4
Días efectivos al año	218
Horas laborables día	8
Horas laborables año	1.744

Tabla 58 – Cálculo horas anuales

Teniendo el salario anual y las horas anuales, podemos calcular el coste horario del profesional: 20,68 €/hora.

Ahora se recuenta la estimación de horas necesarias para el desarrollo de este proyecto. En este caso, se ha trabajado desde junio hasta diciembre, sin contar con agosto, lo que hace un total de 5 meses. A 20 días laborables por mes y 5 horas de trabajo al día sale el siguiente cálculo de horas totales y su reparto en tareas:

Horas empleadas	
Formación en Dinámica de sistemas	25 horas
Formación y documentación	100 horas
Estudio del problema	25 horas
Desarrollo del modelo	200 horas
Puesta a punto del modelo	50 horas
Elaboración de la documentación	100 horas
Total horas	500 horas

Tabla 59 – Distribución horas de trabajo

Teniendo las horas totales trabajadas y el coste horario, calculamos el coste total de personal inserto en este proyecto:

$$500 \text{ horas} \times 20,68 \text{ €/hora} = 10.340 \text{ €}$$

- **Costes material amortizable**

En este apartado se incluye el cálculo de los costes vinculados al equipo y los programas necesarios para desarrollar el proyecto pero que no son de uso exclusivo del proyecto. En este caso el material amortizable consiste en un PC, una impresora y las licencias de los programas utilizados.

El PC es un Acer T-Aspire, Pentium D, 2 GHz y 1 GB de RAM. Se presupone amortizado a los 3 años y un uso similar a las horas efectivas anuales calculadas para un trabajador: 1744 horas/año. La impresora es un modelo HP LaserJet 4, a la que también se supone un periodo de amortización de 3 años y un uso anual similar al del ordenador, por simplificar: 1744 horas/año.

En cuanto a los programas utilizados, el simulador para el modelo de Dinámica de Sistemas era de distribución gratuita por lo que no computa como gasto. Sin embargo, tanto el sistema operativo como los programas de tratamiento de datos y edición son privativos. En este caso el sistema operativo es Windows 7 y el resto de programas utilizados son del paquete Microsoft Office 2007. Se presupone para ambos programas una amortización de 3 años y un uso igual al del PC en el que están instalados: 1744 horas/año.

En las siguientes tablas se reflejan los costes de cada elemento y su coste por horas, lo que refleja al final el coste total en equipo amortizable suponiendo un uso de 500 horas para todos estos elementos en tanto que han operado en todas las fases del proyecto.

Concepto	Coste bruto (€)	Amortización anual (€/año)	Horas de trabajo anuales (h)	Amortización horaria (€/hora)	Coste total (€)
PC Acer	700	233,33	1744	0,13	66,89
Impresora HP	150	50	1744	0,02	14,33
Windows 7	90	30	1744	0,01	8,60
Microsoft Office 2007	250	83,33	1744	0,04	23,89
Total					113,72

Tabla 60 – Distribución coste material

En cuando a material no amortizable, material fungible, este se resume a material de papelería, lo que incluye papel, grapas, bolígrafos por un lado y por otro la encuadernación final del resultado. Estos costes ascienden a 72 €.

c. Costes indirectos

Los costes indirectos reflejan el coste de los consumos imprescindibles para la elaboración del proyecto pero que no están implicados de forma directa en su desarrollo. Estos costes se dividen en gastos de explotación, referido al consumo de energía y telecomunicaciones, y gastos administrativos vinculados a la emisión del proyecto.

Los gastos de electricidad se han supuesto con un consumo de 1 kW, un coste de 0,15€/kWh y las 500 horas de trabajo. En cuanto a la telefonía se supone un coste mensual de 30 € y se imputan sólo las horas dedicadas al proyecto, suponiendo 20 días al mes y 8 horas al día.

Los servicios administrativos son la tasa necesaria para la certificación del proyecto.

Gastos explotación	
Consumo de electricidad	100 €
Consumo telefonía	25 €
Gastos administrativos	
Servicios administrativos	100 €
Total gastos indirectos	225 €

Tabla 61- Distribución costes indirectos.

d. Coste total del proyecto

En total, los costes derivados del desarrollo del presente proyecto se resumen en el siguiente cuadro y gráfico.

	Concepto	Coste (€)
Costes directos	Personal	10.340
	Amortizaciones	113,72
	Material no amortizable	72
Coste indirecto	Gastos de explotación	125
	Servicios administrativos	100
Coste total proyecto		10.750,723

Tabla 62 – Distribución costes totales

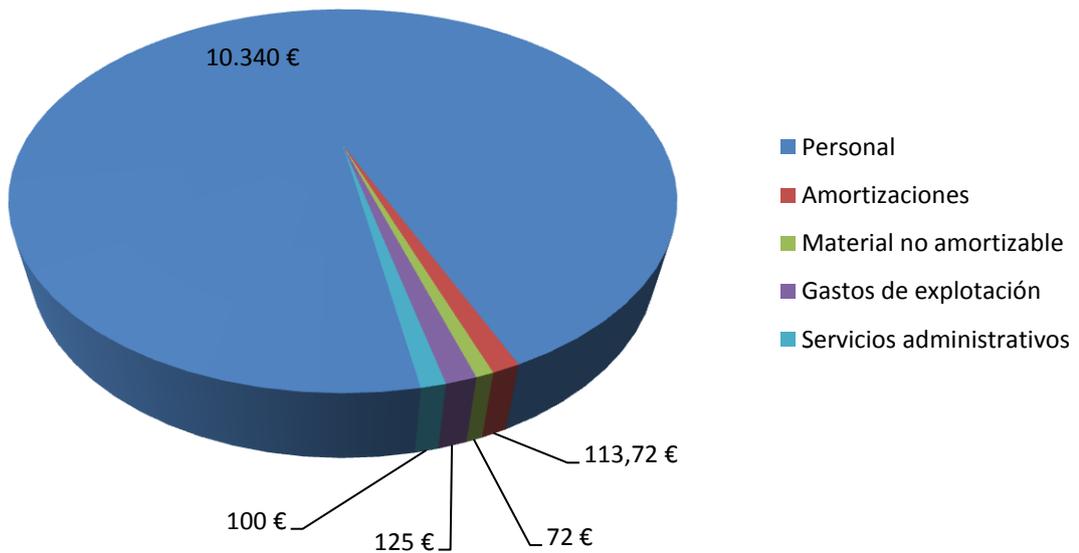
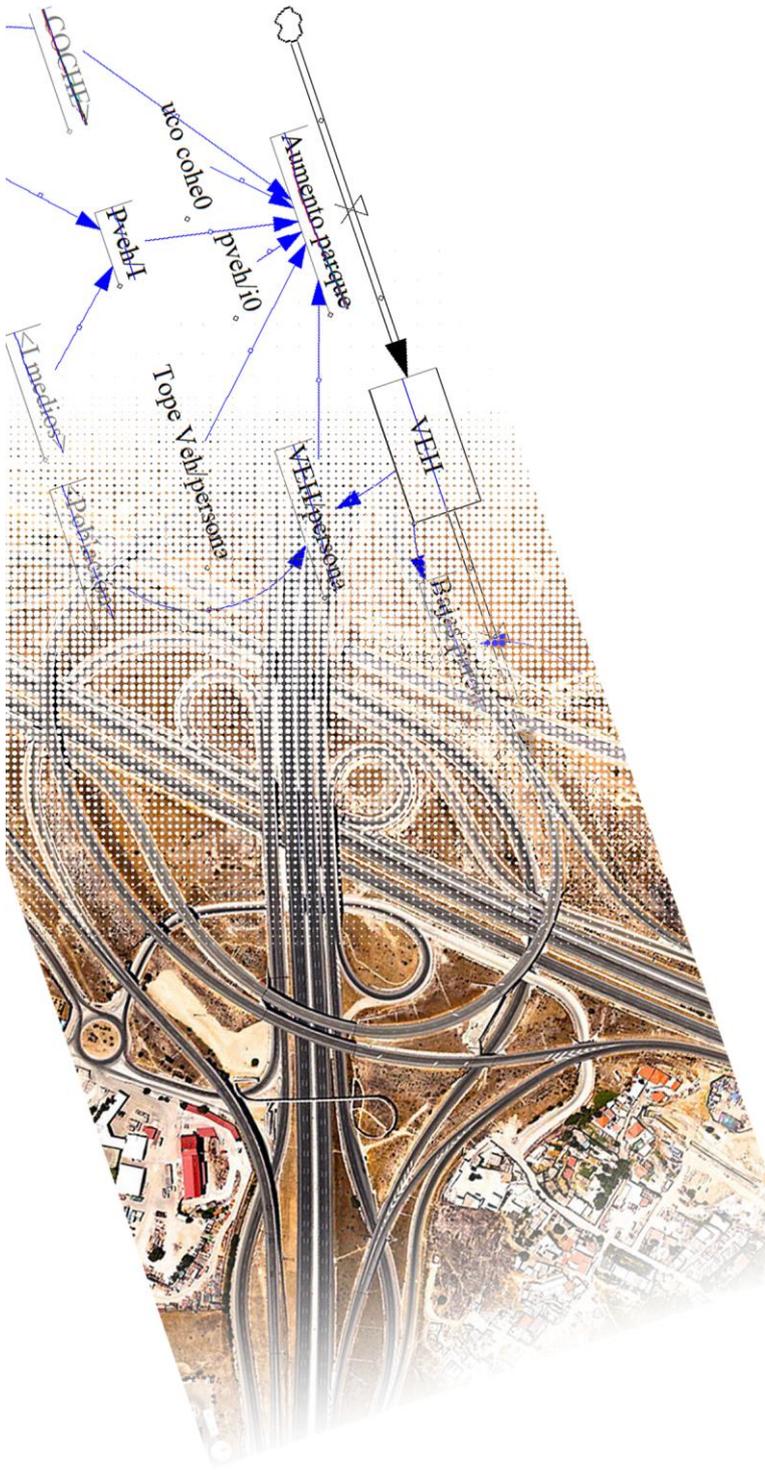


Figura 113 – Distribución costes totales del proyecto.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES



a. Resumen del trabajo realizado

A lo largo de este proyecto se han realizado dos tareas principales: por un lado una recopilación de información y por otro la puesta en práctica de un método analítico para esbozar políticas en el campo de trabajo, el reparto modal en el transporte.

La recogida de información también se ha desdoblado en dos campos principales, primero una tarea de recopilación de información en torno al tema del reparto modal y su contexto, el sector del transporte, y segundo un proceso formativo sobre Dinámica de Sistemas.

La parte de recopilación de información del sector del transporte ha sido la más intensa en trabajo, tanto para acceder a múltiples fuentes como para clasificar la información disponible y descartar el material no relacionado directamente con la temática del proyecto.

Una vez completada la fase de recopilación y análisis de información, de bibliografía y de referencias, se planteó el objetivo: comprobar el efecto de las variables contempladas en la bibliografía [11] mediante Dinámica de Sistemas. Este objetivo se plantea teniendo en cuenta que se escoge como perspectiva más adecuada para el estudio del transporte la perspectiva sistémica.

Para desarrollar este trabajo es necesario acotar el marco del estudio, limitado fundamentalmente por los datos disponibles para realizar el modelo. Ante esta realidad se decide hacer dos modelos y contrastar los resultados de cada uno. El primer modelo se empezó a desarrollar con los datos del INE, los más completos para este objeto hasta la fecha, que datan de 2008 e incluyen la relación entre el reparto modal y distintas variables socioeconómicas. Este modelo se sirve de correlaciones. [45][25] El segundo modelo se basa en hipótesis de causalidad, por lo que permite más elasticidad a la hora de plantear las hipótesis, mientras que mantiene intactas el resto de hipótesis del primer modelo. El segundo modelo es, por tanto, una mejora sobre el anterior a la vista de los resultados. Se han recogido ambos en el Proyecto para que sirva de muestra del procedimiento de trabajo de la Dinámica de Sistemas y para poder comparar los resultados de ambos métodos de modelar la realidad.

Para ambos modelos se desarrolla todo el proceso completo de construcción de modelos de la Dinámica de Sistemas, incluyendo la elaboración de diagramas causales y diagramas de Forrester con el software de simulación. También en ambos se realizan análisis de sensibilidad que confirman la robustez del modelo, como indicador de realismo y de consistencia.

Ambos modelos se simulan en 3 escenarios. En una primera parte del proceso se utilizan datos históricos y posteriormente los modelos se validan con otros datos. Tras la simulación y comentario de resultados se hacen sendos análisis de sensibilidad sobre las variables que además de servir para confirmar la consistencia de los modelos, sirve para valorar la influencia de cada variable sobre el modelo y poder extraer conclusiones en materia de toma de decisiones sobre la realidad.

Por último se realiza una valoración global del trabajo realizado, desde el punto de vista monetario y desde el punto de vista investigador.

b. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo tienen que tomar en perspectiva todo el recorrido.

Las primeras conclusiones se van a extraer del repaso de la bibliografía existente. Del repaso de referencias se pueden extraer varias conclusiones relativas al desarrollo y al estado del sistema de transporte que lo sitúan en una posición alarmante en un escenario de cambio climático antropogénico [16] y de declive de las fuentes energéticas dominantes en el sector [49] debido a la enorme dependencia del sector respecto de determinadas fuentes energéticas. [4][5] Pero no es alarmante tan sólo por la situación actual, como si fuera una novedad sobrevenida, sino por la rigidez que el sistema ha mostrado durante décadas para frenar sus tendencias tanto a nivel global como a nivel español, que es al que se ciñe el presente estudio. Cómo se ha visto en las distintas normativas, especialmente las más recientes [53], las políticas raramente cumplen con sus expectativas y objetivos más específicamente orientados a resolver las contradicciones más acuciantes del sistema de transporte mientras que cumplen ampliamente con los objetivos que a la larga representan una profundización de las contradicciones señaladas.

Dentro de las limitaciones con las que se encuentran las políticas, al menos en el Reino de España, es al intentar modificar las tendencias y el estado del reparto modal. Las políticas públicas tanto españolas como europeas llevan al menos 15 años promoviendo una desmotorización de los desplazamientos urbanos y un trasvase a modos menos intensivos energéticamente. Tras una década en la que el aumento de la proporción de producción de transporte en modo viario, se apuesta por las cadenas multimodales en las que, aunque el uso del transporte viario participe, se limite su efecto. Esta situación de ineffectividad está motivada por las limitaciones que la ingeniería de transporte - no sólo la ingeniería- encuentra a la hora de modelar y explicar el comportamiento de individuos y colectivos frente a la decisión de transportarse. [12] Ante esta situación se hace necesario buscar enfoques que integren variables que puedan servir para explicar el comportamiento de forma más precisa, aunque se pierda capacidad de predicción. Al fin y al cabo, para proponer políticas lo necesario son estudios con modelos de gestión y no tanto predictivos. Los nuevos horizontes en el estudio psicológico y sociológico sobre el transporte [35][36] permiten una comprensión mucho más holística de los procesos involucrados y abren un campo de investigación con escaso recorrido a día de hoy. [11]

Este último aspecto, la necesidad de ampliar las miras y buscar nuevos sistemas de análisis que integren los avances teóricos de las ciencias sociales en modelos útiles para el desarrollo de políticas públicas parece una invitación al campo de la Dinámica de Sistemas, en la que el lenguaje unificado para el análisis de fenómenos sistémicos proporciona herramientas útiles no sólo en los campos de sus usos originarios, como la gestión industrial, empresarial o urbana o la ecología, sino también en algunos campos de las ciencias sociales. [2] Así, parece que la oportunidad de combinar estas herramientas teóricas y técnicas es una posibilidad que está siendo poco explotada en el sector o al menos, que está teniendo poca repercusión.

Sin embargo, iniciar esta andadura de combinar la Dinámica de Sistemas y las teorías tanto de la ingeniería de transporte como de los campos de las ciencias sociales para estudiar el reparto modal se topan con un problema de falta de datos.

La manera de afrontar esta falta de datos ha sido contraponer dos maneras de modelar sistemas y de entender las relaciones entre variables.

Por un lado, mediante correlaciones, método comúnmente utilizado en la econometría, se pueden extraer resultados sobre las relaciones existentes en las tendencias históricas de las variables. Es una forma de apoyar las hipótesis de causalidad en las trayectorias históricas, pero entraña el riesgo de omitir algún factor y dar por válida una relación causal que no tiene por qué ser tal. En este caso, ha habido que armar una parte del modelo (todo el sub-bloque de producción de transporte con turismos) tomándolo de un estudio previo y sin producirlo originalmente por falta de datos consistentes y homogéneos para poder desarrollar ese modelo para el contexto de este proyecto. Por otro lado, los datos del INE [45] y del ministerio de Fomento [24][47] no ofrecen los suficientes datos cruzados para poder extraer modelos estadísticos sobre los que apoyar hipótesis de comportamiento. El estudio más completo del sector, que a juicio del autor se ha hecho en el ámbito relativo a este proyecto, presenta un anexo metodológico [5] en el que enumera una lista de problemas tanto de heterogeneidad de datos como de opacidad tan sólo en las fuentes públicas de datos, sin incluir los problemas derivados de la competencia entre intereses industriales. La recopilación de datos adecuados para elaborar modelos de este tipo es también un terreno por explorar.

Con todas las limitaciones de falta de datos, el método de análisis basado en la Dinámica de Sistemas se ha desarrollado de forma satisfactoria. El desarrollo de dos modelos, uno sucesivo al otro, es un ejemplo del método de trabajo y de las posibilidades que entraña la herramienta. El desarrollo de los modelos, que abarca todo el capítulo 6 de la presente memoria, es donde más se ha trabajado sobre el método de Dinámica de Sistemas, si bien no se recoge el recorrido entre las fases de conceptualización, formulación y evaluación de manera específica y diferenciada, mucho más largo y quebrado que el representado en la Figura 27 para el desarrollo del primer modelo. Esto es así por la gran complejidad del modelo a representar que se plasma en una gran complejidad en los modelos formales. Para ilustrar esta complejidad tan sólo recordar que el modelo 1 se sirve de 71 variables y el modelo 2 de 82, y que estas variables forman unos lazos cerrados, unas realimentaciones, que en el primer modelo no entrañan gran complejidad (la realimentación más grande abarca 4 variables) pero que en el segundo hacen que haya variables envueltas en 25 lazos simultáneamente, lo que complica enormemente la interpretación de resultados en función de la estructura.

En este sentido, los análisis de sensibilidad son un elemento clave del análisis de los modelos, que demuestran la robustez de los modelos y por tanto, son una prueba fundamental para considerar válidos los modelos. En este caso ambos modelos presentados lo son. Resaltar aquí que en toda la fase de modelización, las constantes simulaciones y análisis de sensibilidad son una herramienta fundamental que el software facilita y que sin él serían una tarea inabarcable.

Aún con estas limitaciones, el modelo arroja algunas conclusiones que merece la pena señalar:

- La importancia del parque de vehículos. Esto es una hipótesis que el modelo parece respaldar. En el reparto modal es posiblemente el aspecto que más mejora la percepción del uso del automóvil, por mucho que su precio aumente o la velocidad baje, debido a la congestión. Por ello hace que en el largo plazo el uso de coche tienda a aumentar.
- La importancia del efecto rebote. Se confirman las hipótesis del modelo de referencia. [25] Aunque obviamente no es el principal elemento que guía la evolución del modelo cuando hay mejoras en la eficiencia energética.
- La importancia de la congestión. También se confirma la hipótesis del modelo de referencia sobre la congestión, por lo que se justifica su inclusión. En este caso, para

estudiar el reparto modal, la congestión es un parámetro también muy influyente, aunque con menor incidencia que otros.

- El avance en materia de eficiencia energética. Los efectos de la variable definida como Regulación(conjunto de medidas, políticas y avances técnicos en materia de eficiencia energética) empezaron a hacer efecto en 2006, en tanto que la intensidad energética real y la del modelo se han comportado de forma similar cuando ese parámetro ha empezado a actuar.
- El impacto de los cambios de población. La población y los cambios tanto en la pirámide poblacional (número de adultos) como en la distribución territorial es el conjunto de variables, interrelacionadas en la realidad entre sí, que más afecta tanto a la producción de transporte como al reparto modal.
- El impacto de costes y velocidades. En el reparto modal el impacto de los cambios en los precios y las velocidades de los distintos modos tiene un impacto bajo sobre el reparto modal a nivel agregado.

Por otro lado, también hay que señalar las carencias del modelo que su simulación ha revelado:

- Falta de calibración. Los datos de algunas magnitudes son irreales. Esto es en gran parte debido a no haberse podido generar un modelo completamente propio por la falta de datos de suficiente calidad.
- Faltan realimentaciones. Hay algunas realimentaciones que por falta de conocimiento de su magnitud (de nuevo la falta de datos) no se han incluido. Por ejemplo el impacto que con el tiempo tiene un cambio del reparto modal en las políticas públicas, luego en la urbanización y al final en la producción del transporte y la congestión.
- Faltan elementos limitativos. Más allá de las magnitudes, las tendencias también son inverosímiles dado que muestran un crecimiento exponencial inmediato que la experiencia histórica muestra erróneo e imposible. Hay límites tanto a la expansión del parque de vehículos como al crecimiento de la producción del transporte y esos límites, que en este modelo tan sólo representa la congestión, al no contemplarse emulan una dinámica irreal. En todo caso, lo que hay que señalar es la insuficiencia de trasladar un modelo econométrico a uno de Dinámica de Sistemas.

Por otro lado, se ha armado un segundo modelo basado en hipótesis de relación que, aunque apoyadas en la bibliografía [4][57], no suponen un conocimiento preciso a nivel cuantitativo de las relaciones entre variables. Limitándonos a establecer relaciones cualitativas se tiene una mayor elasticidad para plantear el modelo, pero también una menor seguridad en que los resultados vayan a ser coherentes, teniendo que esperar a la simulación para comprobar el modelo.

Decir que esta metodología es bastante más coherente con el método de trabajo de la Dinámica de Sistemas que insertar correlaciones en los modelos.

A la vista de los resultados cabe afirmar que este segundo modelo es más consistente que el primero. Esto se puede deber bien a que está mejor planteado que el primero, por tener un mayor margen de maniobra, o bien por ser una forma superior de plantear este problema, en el que las correlaciones no aportan resultados consistentes. Este estudio no puede confrontar completamente los modelos para aclarar en cuál de esos dos supuestos nos encontramos, por las limitaciones del primero.

Si se da por válido el segundo modelo los resultados que se extraen son más sugerentes que los del primer modelo:

- Se muestra el peso fundamental de los ingresos en el reparto modal, al ser una variable decisiva para la evolución del parque de vehículos como por su propio efecto en las condiciones de la población.
- Se muestra el impacto que el género y la estructura de los hogares tienen en el reparto modal.
- Se muestra el efecto que la subida de precio combinada con la eficiencia energética provocan un efecto rebote lógico, en el que un mayor aumento del precio del combustible empeora la producción en automóvil, lo que parece de sentido común, contra los resultados del otro modelo.
- Se muestra la diferencia entre los otros modos de transporte público, principalmente ferroviarios, respecto del autobús, que por los efectos de las variables que influyen en el hábito de la población tiene una tendencia a participar mucho menos que el resto de transportes públicos cuando hay una caída del uso dominante que es el automóvil.

Sin embargo el modelo también presenta carencias:

- La demanda total de transporte es una variable sobre la que hay una fuerte discusión y que no es ajena a las dinámicas del modelo. En este sentido faltaría una realimentación fundamental que hiciera que la demanda de transporte no fuera un “input” sino una variable central del modelo.
- Para los modos no motorizados es necesario definir algunas variables que por lo cualitativo de las mismas no se han modelado, como el clima, la distancia de cada recorrido o el motivo del viaje. Al ser los modos que más limitaciones tienen con respecto a estos factores, la inclusión de esas variables seguramente tenga un efecto sobre los resultados de los modos no motorizados y por añadidura en las de todo el modelo.

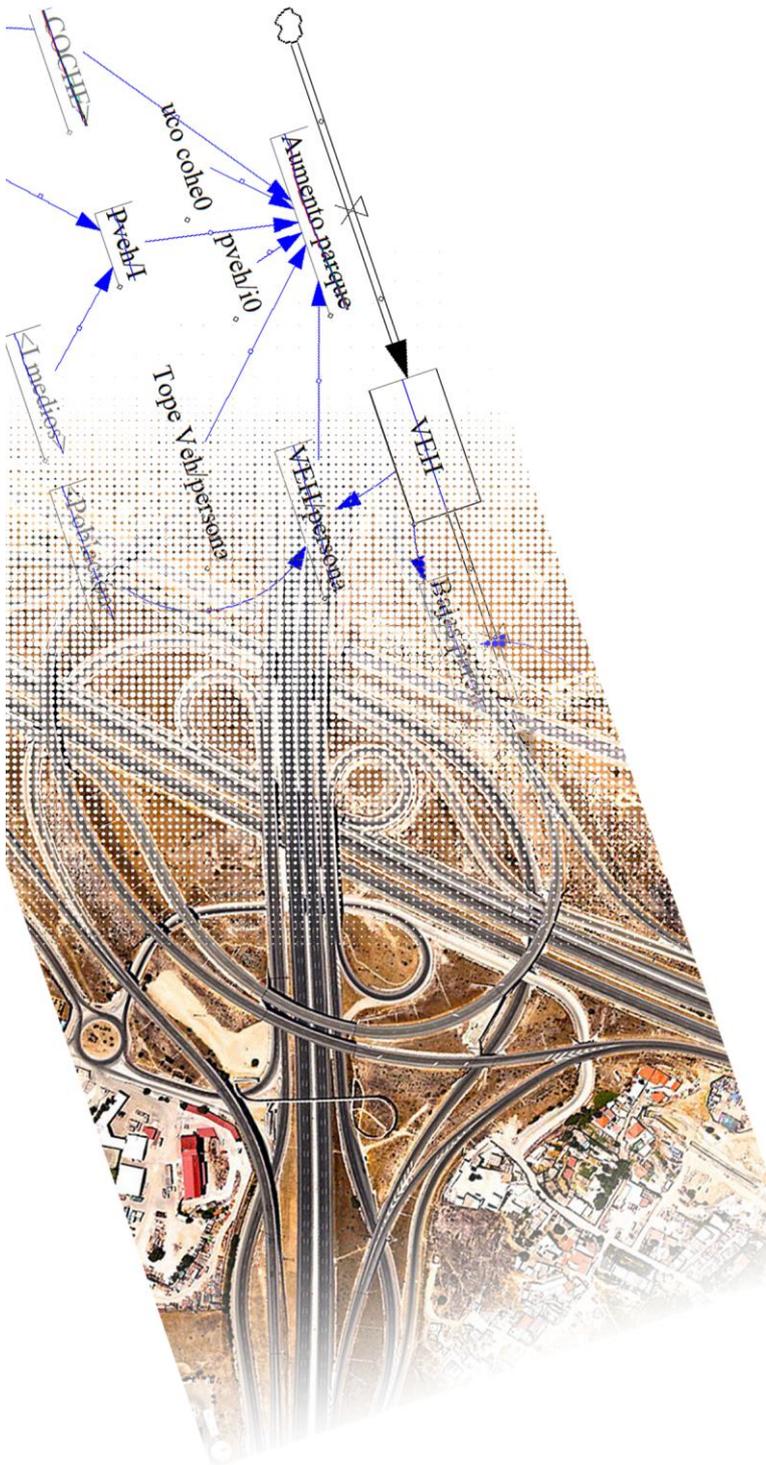
c. Posibles líneas futuras

Las limitaciones enunciadas y las carencias observadas de los modelos sientan las bases de los posibles futuros trabajos en esta línea que se pueden realizar. Por un lado un trabajo más laborioso de toma de datos y elaboración de modelos econométricos mediante correlaciones pueden servir de base para modelos que incluyan relaciones con un mayor peso de aspectos cuantitativos entre variables. Por otro lado, estudiar los modelos causales sobre procesos históricos puede servir para validar los modelos.

En este sentido, una ampliación de los datos disponibles podría suponer aplicar el modelo definitivo sobre otros países o ámbitos (ciudades, áreas metropolitanas, regiones...), lo que además de enriquecer más el modelo validándolo en otros contextos, lo haría una herramienta de trabajo con aspiración universal.

En todo caso, el estudio del reparto modal necesita de un conocimiento multidisciplinar que combine elementos de ciencia social, como se ha intentado esbozar aquí, con herramientas propias de la ingeniería como la Dinámica de Sistemas o de la economía como el cálculo de elasticidades.

BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aracil, Javier. *Introducción a la dinámica de sistemas*. Alianza Universidad. 1986.
- [2] Martín García, Juan. *Dinámica de sistemas. Ejercicios*. Juan Martín García. 2003
- [3] Comisión Europea. *Hoja de ruta hacia una economía hipocarbónica competitiva en 2050*. 2011
- [4] A. Estevan, A. Sanz. *Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*. Bakeaz, CCOO, Los libros de la catarata. 1996.
- [5] A. Sanz, P. Vega, M. Mateos. *Las cuentas ecológicas del transporte en España. Libros en Acción*. 2014.
- [6] P.J. Pérez, A. Monzón. *Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión*. Observatorio medioambiental, 2008, vol.11 127-147
- [7] Comisión Europea. European Commission's Transport *White Paper. European transport policy for 2010: time to decide*. 2001
- [8] Comisión Europea. *European Commission's Green Paper on energy efficiency. Doing more with less* 2005
- [9] Comisión Europea. *Keep Europe Moving –sustainable mobility for our continent, Mid-term review of the European Commission's 2001 Transport Whit Paper*. 2006
- [10] M. Mendiluce, L. Schipper. *Trends in passenger transport and freight energy use in Spain*. Energy Policy 39 (2011) 6466-6475
- [11] A. de Witte, J. Hollevoet, F. Dobruszkes, M. Hubert, C. Macharis. *Linking modal choice to motility: A comprehensive review*. Transportation Research part A (2013) 329-341
- [12] A. Orro. *Modelos de elección discreta en transportes con coeficientes aleatorios*. 2005. Tesis doctoral Universidad de la Coruña.
- [13] L. Mumford. *La ciudad en la historia*. Pepitas de calabaza. 2014
- [14] L. Mumford. *El mito de la máquina. Técnica y evolución humana*. Pepitas de calabaza. 2013
- [15] L. Mumford. *El pentágono del poder. El mito de la máquina (vol. II)*. Pepitas de calabaza. 2011
- [16] IPCC. *Quinto Informe de evaluación: Cambio Climático*. 2013
- [17] M.K. Hubbert. *Nuclear energy and the fossil fuels. Drilling and Production Practice*. 1956. American Petroleum Institute. Spring Meeting (Texas) of the American Petroleum Institute.
- [18] WEO, 2010. *World Energy Outlook 2010*. OECD / IEA.
- [19] WEO, 2011. *World Energy Outlook 2011*. IEA, International Energy Agency: OECD, Paris.

- [20] WEO, 2012. *World Energy Outlook 2012*. OECD / IEA.
- [21] WEO, 2013. *World Energy Outlook 2013*. OECD / IEA.
- [22] Web de datos públicos del Banco Mundial <http://datos.bancomundial.org/>
- [23] J. Barnett. *The Fractured Metropolis*. 1995. HarperCollins
- [24] Ministerio de Fomento. *Anuario estadístico 2012*.
- [25] K. M. Hymel, K. A. Small, K. Van Dender. *Induced demand and rebound effects in road transport*. Transportation research part B 44 (2010) 1220-1241
- [26] C. Weis, K. W. Axhausen. *Induced travel demand: Evidence from a pseudo panel data based structural equations model*. Research in Transportation Economics 25 (2009) 8-18
- [27] R. M. González, G. A. Marrero. *Induced road traffic in Spanish regions: A dynamic panel data model*. Transportation Research part A 46 (2012) 435-445
- [28] Francisco Aparicio y otros. *Ingeniería del transporte*. Dossat. 2008.
- [29] C. Jotin Khisty, B. Kent Lall. *Transportation engineering: An introduction*. Prentice Hall. 1998
- [30] P. H. Wright, N. J. Ashford. *Transportation Engineering: Planning and Design* John Wiley & Sons
- [31] Manuel Herce. *Sobre la movilidad en la ciudad*. Ed. Reverté. 2009
- [32] A. Gómez Ortega, M. L. Delgado Jalón, J. A. Rivero Menéndez. *A strategic analysis of collective urban transport in Spain using the Five Forces Model*. Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa 20 (2014) 5-15
- [33] Los amigos de Ludd. *Las ilusiones renovables*. 2007. Muturreko burutazioak
- [34] X. Labandeira, C. J. León, M. X. Vázquez. *Economía ambiental*. 2006. Pearson Prentice Hall.
- [35] V. Kaufmann, M. M. Bergman, D. Joye. *Motility: mobility as capital*. International journal of urban and regional research. 28 (2004) 745-756
- [36] V. Kaufmann, M. Flamm. *Operationalising the concept of motility: a qualitative study*. Mobilities 1 (2006) 167-189
- [37] Ministerio de Fomento y el Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. *Estrategia Española de Movilidad Sostenible*. 2009
- [38] H. Suzuki, R. Cervero, and K. Iuchi, *Transforming Cities with Transit*, World Bank Publications, 2013
- [39] M. Aymerich et al. *Transportes. Un enfoque integral*. Ed. R. Izquierdo.

- [40] Domencich, T. y D. McFadden *A Disaggregated Behavioral Model of Urban Travel Demand* (1972). Report No.CRA-156-2, Charles River Associates, Inc., Cambridge, Massachusetts.
- [41] Manski, C. F. *Identification Problems in the Social Sciences* (1995). Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.
- [42] J.D. Ortúzar, L. G. Willumsen. *Modeling transport*. 2011. Wiley
- [43] M. Diana. *From mode choice to modal diversion: a new behavioural paradigm and an application to the study of the demand for innovative transport services*. Technological forecasting & Social Change 77 (2010) 429-441
- [44] J. Almaraz et. Al. *Transporte y elección modal. Aplicaciones de la sociología a la movilidad*. X Congreso español de sociología. 2012.
- [45] Encuesta de hogares y medioambiente 2008
<http://www.ine.es/jaxi/menu.do?type=pcaxis&path=%2Ft25%2Fp500&file=inebase&L=0>
- [46] A. Fernandez-Heredia, A. Monzón, S. Jara-Díaz. *Understanding cyclists' perceptions. Keys for a successful bicycle promotion*. 2013. TRANSyT (UPM)
- [47] Ministerio de Fomento. *Movilia 2006*. 2006
- [48] Ministerio de industria, energía y turismo. *Evolución del precio del gasóleo en España durante el último medio siglo*.
<http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/387/NOTAS.pdf>
- [49] I. Capellán-Pérez, M. Mediavilla, C. de Castro, Ó. Carpintero, and L. Javier Miguel. *Fuel Depletion and Socio-Economic Scenarios: An Integrated Approach*. Energy. 2014
- [50] Base de datos del Banco Mundial. <http://datos.bancomundial.org/>
- [51] Ministerio de Fomento. *Plan Estratégico de infraestructuras y transporte*. 2005.
- [52] Junta de Castilla y León. *Plan regional de carreteras 2008-2020*. 2008
- [53] Ministerio de Fomento. *Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda*. 2012
- [54] Forrester, J.W., *Industrial Dynamics*, Productivity Press, 1986.
- [55] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers. *Más allá de los límites del crecimiento*. 1992. El país-Aguilar.
- [56] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers. *Los límites del crecimiento 30 años después*. 2004. Galaxia Gutemberg.
- [57] R. Marina Gonzalez, G. A. Marrero. *Induced road traffic in Spanish regions: A dynamic panel data model*. Transportation research part A (2012) 435-445
- [58] V. Kaufmann. *Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines- La question du report modal*. 2000. Presses polytechniques et universitaires romandes.

[59] RACC. *La congestión en las vías de acceso a Madrid*. 2009

ANEXO 1

Estimación de costes y velocidades de los modos y medios de transporte insertos en el modelo

Los apartados del coste se dividen así:

- Amortización: incluye el coste del vehículo por km recorrido
- Combustible: el coste del combustible por km recorrido
- Mantenimiento: el coste del mantenimiento por km recorrido
- Otros: incluyen gastos varios como seguros, multas o gastos administrativos por km recorrido

Los atributos de cada medio se justifican:

- Autobús:
 - Coste:
 - Otros: Sólo hay categoría de otros porque sólo se incluye como coste de autobús el coste del billete. Se ha calculado en base a datos personales, tomando como dato de referencia el coste de bono bus ordinario de Valladolid (AUVASA), que en 2006 eran 50 cent/viaje. Se estima que un viaje medio en autobús en Valladolid son 7 km de recorrido (distancia recorrida entre un barrio periférico de Valladolid –Parquesol- y un centroide atractor de actividad– Universidad local)
 - Velocidad: velocidad media para los autobuses urbanos de Valladolid según prensa.
(<http://www.20minutos.es/noticia/460006/0/auvasa/velocidad/lenta/>)
- Otros medios de transporte público
 - Coste:
 - Otros: sólo se incluye el coste del billete, de la misma forma que en el autobús. El dato es bastante heterogéneo, así que se toma de referencia el dato del estudio de Ecologistas en Acción “Los medios de transporte en la ciudad. Un análisis comparativo” para los costes por viajero/km que imputan en los metros de Madrid y Barcelona.
 - Velocidad: La velocidad se estima tomando como referencia el Metro, en este caso de Barcelona. Del informe anual de TMB de 2012, se toma la velocidad media de la línea 2, que es la más usada y cuyo dato de velocidad es la mediana de la velocidad del resto.
- Coche:
 - Coste
 - Amortización: Se supone en base a experiencias del autor, que el coste de un coche en 18000 €, un kilometraje anual de 22000 km y una vida útil de 10 años.
 - Combustible: se supone para 2006 un coste de 1 €/l de combustible (fue algo menor) [48]. Se supone una intensidad energética de 5 l/100 km, basado en experiencias del autor.

	Amortización	Combustible	Mantenimiento	Otros	Total €/km persona	Velocidad media km/h
Autobús	0	0	0	0,07	0,07	12
Otro medio de transporte público	0	0	0	0,08	0,08	27.6
Coche	0,0818	0,05	0,00781	0,02068	0,08015909	31.5
Moto o ciclomotor	0,0178	0,035	0,018	0,02	0,1083	26.666
Bicicleta	0,0133	0	0,02222	0	0,0355	15.6
A pie	0	0	0	0	0	5.85

Tabla 63 – Estimación costes y velocidades para los medios de transporte analizados.

ANEXO 2

Relación de ecuaciones empleadas en el Modelo 1

- (01) "% camiones" = WITH LOOKUP (
- Time,
- ((2000,0)-
- (2015,1)],(2004,0.2115),(2005,0.2137),(2006,0.215),(2007,0.216
-),(2008,0.213),(2009,0.211),(2010,0.207),(2011,0.204),(2012,0.201))
- (02) "% pob. rural" = WITH LOOKUP (
- Time,
- ((0,0)-(3000,10)],(2006,22.53),(2006,22.527))
- (03) "% pob. urbana"= ACTIVE INITIAL (
- IF THEN ELSE(((Time-2005)*0.6967*0.022+0.6967)<0.77473 , ((Time-
- 2005)*0.6967
- *0.022+0.6967) , 0.77473),
- 0.6967)
- (04) "% red urbana"=
- 128181/652971
- (05) cong=
- DELAY1(-8.4146-1.416*LN("km red
- urbana/adultos")+0.46*("VKA/adultos"+LN("% pob. urbana"
-))+1.1647*LN(DENS)+0.4636*LN("% camiones"), 1)
- (06) DENS=
- Población/superficie
- (07) FINAL TIME = 2030
- (08) fint= ACTIVE INITIAL (
- DELAY1(-0.1619-0.0304*("VKA/adultos"+LN(Pfuel))-0.0078*LN(I
- medios)+0.8465
- *"fint t-1"-0.0108*LN("% pob. urbana))-0.0249

$$*LN("Población/adultos")-0.091*LN(REGULACIÓN), 1),$$

$$LN(0.05))$$

(09) "fint t-1"=

$$DELAY\ FIXED(fint, 1, LN(0.05))$$

(10) HABITO bici=

$$-0.019143+-0.540932*"%\ pob.\ urbana"+-0.66653*"%\ pob.\ rural"+0.20264*"%\ TH: unipersonal"$$

$$+0.25405*"%\ TH: pareja sola"+0.573746*OCU+0.3103*"%\ I<1000"$$

(11) HABITO bus=

$$-0.019143+-0.540932*"%\ pob.\ urbana"+-0.66653*"%\ pob.\ rural"+0.20264*"%\ TH: unipersonal"$$

$$+0.25405*"%\ TH: pareja sola"+0.573746*OCU+0.3103*"%\ I<1000"$$

(12) HABITO coche=

$$-0.019143+-0.540932*"%\ pob.\ urbana"+-0.66653*"%\ pob.\ rural"+0.20264*"%\ TH: unipersonal"$$

$$+0.25405*"%\ TH: pareja sola"+0.573746*OCU+0.3103*"%\ I<1000"$$

(13) HABITO moto=

$$-0.019143+-0.540932*"%\ pob.\ urbana"+-0.66653*"%\ pob.\ rural"+0.20264*"%\ TH: unipersonal"$$

$$+0.25405*"%\ TH: pareja sola"+0.573746*OCU+0.3103*"%\ I<1000"$$

(14) HABITO otropublic=

$$-0.019143-0.540932*"%\ pob.\ urbana"-0.66653*"%\ pob.\ rural"+0.20264*"%\ TH: unipersonal"$$

$$+0.25405*"%\ TH: pareja sola"+0.573746*OCU+0.3103*"%\ I<1000"$$

(15) HABITO pie=

$$-0.019143+-0.540932*"%\ pob.\ urbana"+-0.66653*"%\ pob.\ rural"+0.20264*"%\ TH: unipersonal"$$

$$+0.25405*"TH: pareja sola"+0.573746*OCU+0.3103*"I<1000"$$

(16) $i =$

$$0.05$$

(17) $I_{medios} = \text{WITH LOOKUP} ($

Time,

$$\begin{aligned} & \text{([(2000,0)-} \\ & (2030,50)],(2004,20.92),(2005,21.793),(2006,22.735),(2007,23.712 \\ &),(2008,25.227),(2008,25.277),(2009,25.556),(2010,25.14),(2011,24.176),(2012 \\ & ,23.972),(2030,40.972))) \end{aligned}$$

(18) $"I<1000" = \text{WITH LOOKUP} ($

Time,

$$\begin{aligned} & \text{([(0,0)-} \\ & (3000,10)],(2006,16.9),(2007,14.4),(2008,13.05),(2009,14.68),(2010 \\ & ,15.72))) \end{aligned}$$

(19) $\text{INITIAL TIME} = 2006$

(20) $\text{km de red} = \text{WITH LOOKUP} ($

Time,

$$\begin{aligned} & \text{([(2000,600000)-} \\ & (2030,700000)],(1996,652315),(1997,651798),(1998,652971) \\ & ,(1999,653467),(2000,653255),(2001,653497),(2002,653837),(2003,654282),(2004 \\ & ,654282),(2005,655344),(2006,656037),(2007,655709),(2008,654709),(2009,655161 \\ &),(2010,655485),(2011,655583),(2012,655293),(2013,655059),(2030,663742))) \end{aligned}$$

(21) $"\text{km red} / \text{superficie}" =$

$$\text{km de red/superficie}$$

- (22) "km red urbana/adultos"=

$$\text{km de red} * \% \text{ red urbana} / \text{Población adultos}$$
- (23) licencias de conducir = WITH LOOKUP (
 Time,

$$[(2000,0)-$$

$$(2031,5e+007)],(2002,2.03014e+007),(2003,2.09192e+007),(2004,$$

$$2.15495e+007),(2005,2.11242e+007),(2006,2.21242e+007),(2007,2.27777e+007),$$

$$(2008,2.36572e+007),(2009,2.57311e+007),(2010,2.57824e+007),(2011,2.61181e+007$$

$$),(2012,2.63092e+007),(2030,4.39526e+007)))$$
- (24) "licencias/adulto"=

$$\text{licencias de conducir} / \text{Población adultos}$$
- (25) OCU = WITH LOOKUP (
 Time,

$$[(1992,0)-$$

$$(2012,1)],(1992,40.55),(1993,37.366),(1994,37.14),(1995,37.9497$$

$$),(1996,38.9368),(1997,39.835),(1998,40.926),(1999,42.87),(2000,44.42),(2001$$

$$,45.08),(2002,48.57),(2003,49.85),(2004,51),(2005,53.02),(2006,54.37),(2007$$

$$,52.027),(2008,48.79),(2009,48.133),(2010,46.68),(2011,44.7),(2012,44.45),$$

$$(2030,40)))$$
- (26) Pbici0= INITIAL(

$$(-\text{tbici}-\text{€bici}) * \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"})$$
- (27) Pbus0= INITIAL(

$$(-\text{tbus}-\text{€bus}) * \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"})$$
- (28) Pcoche0= INITIAL(

$$(-\text{tcoche}-\text{€coche}) / \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"})$$
- (29) PERCEPCION bici=

$$\text{DELAY1}(0.262364 * \text{Pbici0} / (-\text{tbici}-\text{€bici}) / \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"}), 1)$$

- (30) PERCEPCION bus=

$$\text{DELAY1}(2.6878 * P_{\text{bus}0} / (-t_{\text{bus}} - \epsilon_{\text{bus}}) / \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"}), 1)$$
- (31) PERCEPCION coche=

$$\text{DELAY1}(3.7658 * P_{\text{coche}0} / (-t_{\text{coche}} - \epsilon_{\text{coche}}) * \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"}), 1)$$
- (32) PERCEPCION moto=

$$\text{DELAY1}(0.74193 * P_{\text{moto}0} / (-t_{\text{moto}} - \epsilon_{\text{moto}}) / \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"}), 1)$$
- (33) PERCEPCION otropublic=

$$\text{DELAY1}(1.94591 * P_{\text{otropublic}0} / (-t_{\text{otropublic}} - \epsilon_{\text{otropublic}}) / \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"}), 1)$$
- (34) PERCEPCION pie=

$$\text{DELAY1}(3.41 * P_{\text{pie}0} / (-t_{\text{pie}} - \epsilon_{\text{pie}}) / \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"}), 1)$$
- (35) Pfuel=

$$1 + 1 * 0.1 * (\text{Time} - 2005)$$
- (36) "Pfuel/km"=

$$\text{DELAY1}(\text{LN}(\text{EXP}(\text{fint}) * P_{\text{fuel}}), 1)$$
- (37) Pmoto0= INITIAL(

$$(-t_{\text{moto}} - \epsilon_{\text{moto}}) * \text{EXP}(\text{"VEH/adultos"})$$
- (38) Población = WITH LOOKUP (

$$\text{Time},$$

$$((1992, 4e+007) -$$

$$(2030, 7e+007)], (2004, 4.25475e+007), (2005, 4.32963e+007), ($$

$$2006, 4.401e+007), (2007, 4.47847e+007), (2008, 4.56689e+007), (2009, 4.62393e+007$$

$$), (2010, 4.64866e+007), (2011, 4.60526e+007), (2011, 4.66672e+007), (2011.45, 4.60526e$$

$$+007$$

$$), (2012, 4.68182e+007), (2013, 4.67279e+007), (2030, 6.68159e+007))$$

- (39) Población adultos = WITH LOOKUP (
- Time,
- ([(2003,3.576e+007)-
- (2030,7e+007)],(2003,3.57628e+007),(2004,3.63781e+007
-),(2005,3.70184e+007),(2006,3.76285e+007),(2007,3.82461e+007),(2008,3.90013e+00
- 7
-),(2009,3.93959e+007),(2010,3.95601e+007),(2011,3.96671e+007),(2012,3.97487e+00
- 7
-),(2013,3.96253e+007),(2013,3.963e+007),(2030,5.6289e+007))
- (40) "Población/adultos"=
- Población/Población adultos
- (41) Potro0= INITIAL(
- (-totropublic-€otropublic)*EXP("VEH/adultos"))
- (42) Ppie0= INITIAL(
- (-tpie-€pie)*EXP("VEH/adultos"))
- (43) Pveh=
- LN(i*0.08182*(Time-2005)+0.08182+0.08182*0.027*(Time-2005))
- (44) REGULACIÓN = WITH LOOKUP (
- Time,
- ([(0,0)-(2005,10)],(1995,1),(2005,1),(2014,1) ,(2030,10))
- (45) SAVEPER =
- TIME STEP
- (46) superficie=
- 505992
- (47) tbici=
- 0.05
- (48) tbus=

0.0833

(49) tcoche=

0.03968+EXP(cong)/500

(50) "TH: pareja sola" = WITH LOOKUP (

Time,

((0,0)-
(3000,10)],(2006,15.62),(2007,15.71),(2008,16.51),(2009,16.96),(
2010,17.16),(2011,17.47)))

(51) "TH: unipersonal" = WITH LOOKUP (

Time,

((0,0)-
(3000,10)],(2006,6.17),(2007,6.4),(2008,6.64),(2009,6.94),(2010,
7.05),(2011,7.28)))

(52) TIME STEP = 0.08

(53) tmoto=

0.0375

(54) totropublic=

0.0362319

(55) tpie=

0.1709

(56) USO AUTOBÚS=

EXP(HABITO bus)*EXP(PERCEPCION bus)/(EXP(HABITO
bus)*EXP(PERCEPCION bus)+
EXP(PERCEPCION bici)*EXP(HABITO bici)+EXP(PERCEPCION
coche)*EXP(HABITO coche
) +EXP(PERCEPCION moto)*EXP(HABITO moto)+EXP(PERCEPCION
otropublic)*EXP(HABITO otropublic

) + EXP(PERCEPCION pie) * EXP(HABITO pie))

(57) USO BICI =

EXP(HABITO bici) * EXP(PERCEPCION bici) / (EXP(HABITO bus) * EXP(PERCEPCION bus

) + EXP(PERCEPCION bici) * EXP(HABITO bici) + EXP(PERCEPCION coche) * EXP(HABITO coche

) + EXP(PERCEPCION moto) * EXP(HABITO moto) + EXP(PERCEPCION otropublic) * EXP(HABITO otropublic

) + EXP(PERCEPCION pie) * EXP(HABITO pie))

(58) USO COCHE =

EXP(HABITO coche) * EXP(PERCEPCION coche) / (EXP(HABITO bus) * EXP(PERCEPCION bus

) + EXP(PERCEPCION bici) * EXP(HABITO bici) + EXP(PERCEPCION coche) * EXP(HABITO coche

) + EXP(PERCEPCION moto) * EXP(HABITO moto) + EXP(PERCEPCION otropublic) * EXP(HABITO otropublic

) + EXP(PERCEPCION pie) * EXP(HABITO pie))

(59) USO MOTO =

EXP(HABITO moto) * EXP(PERCEPCION moto) / (EXP(HABITO bus) * EXP(PERCEPCION bus

) + EXP(PERCEPCION bici) * EXP(HABITO bici) + EXP(PERCEPCION coche) * EXP(HABITO coche

) + EXP(PERCEPCION moto) * EXP(HABITO moto) + EXP(PERCEPCION otropublic) * EXP(HABITO otropublic

) + EXP(PERCEPCION pie) * EXP(HABITO pie))

(60) USO OTROPUBLICO =

EXP(PERCEPCION otropublic) * EXP(HABITO otropublic) / (EXP(HABITO bus) * EXP(PERCEPCION bus

) + EXP(PERCEPCION bici) * EXP(HABITO bici) + EXP(PERCEPCION coche) * EXP(HABITO coche

) + EXP(PERCEPCION moto) * EXP(HABITO moto) + EXP(PERCEPCION otropublic) * EXP(HABITO otropublic)
) + EXP(PERCEPCION pie) * EXP(HABITO pie))

(61) USO PIE =

EXP(HABITO pie) * EXP(PERCEPCION pie) / (EXP(HABITO bus) * EXP(PERCEPCION bus) +
 EXP(PERCEPCION bici) * EXP(HABITO bici) + EXP(PERCEPCION coche) * EXP(HABITO coche)
) + EXP(PERCEPCION moto) * EXP(HABITO moto) + EXP(PERCEPCION otropublic) * EXP(HABITO otropublic)
) + EXP(PERCEPCION pie) * EXP(HABITO pie))

(62) "VEH t-1" =

DELAY FIXED("VEH/adultos", 1, LN(1.80583e+006/3.70184e+007))

(63) "VEH/adultos" =

DELAY1(-0.4355 + 0.0211 * Pveh + 0.0028 * LN(i) + 0.0215 * LN(I medios) -
 0.1072 * LN("% pob. urbana")
) + 0.0625 * LN("licencias/adulto") + 0.8697 * "VEH t-1" + 0.0452 * "VKA/adultos" - 0.001
 * "Pfuel/km", 1)

(64) "VKA t-1" =

DELAY FIXED("VKA/adultos", 1, LN(2.45073e+011/3.70184e+007/1000))

(65) "VKA/adultos" = ACTIVE INITIAL (

DELAY1(1.8472 + 0.1031 * LN(I medios) - 0.0092 * cong - 0.0244 * cong * LN(I
 medios) - 0.0124
 * cong * "Pfuel/km" + 0.7947 * "VKA t-1" + 0.034 * "VEH/adultos" - 0.0474 * "Pfuel/km" -
 0.0251
 * "Pfuel/km" * "Pfuel/km" + 0.0635 * "Pfuel/km" * LN(I
 medios) + 0.2663 * LN("Población/adultos")
) - 0.1626 * LN("% pob. urbana") + 0.0186 * LN("km red / superficie"), 1),
 LN(2.45073e+011/3.70184e+007/1000))

(66) €bici =

$$0.03555+0.03555*0.027*(\text{Time}-2005)$$

(67) €bus=

$$0.07+0.07*0.027*(\text{Time}-2005)$$

(68) €coche=

$$\text{EXP}(\text{Pveh})+\text{EXP}(\text{"Pfuel/km"})+0.007+0.0206$$

(69) €moto=

$$(\text{EXP}(\text{"Pfuel/km"})*0.75+0.0178+0.018+0.02)*(1+0.027*(\text{Time}-2005))$$

(70) €otropublic=

$$0.035+0.035*0.027*(\text{Time}-2005)$$

(71) €pie=

$$0$$

ANEXO 3

Relación de ecuaciones empleadas en el Modelo 2

- (01) "% pob. metro"=
$$52.9 * \text{DENS} / \text{DENS0}$$
- (02) "% red urbana"=
$$128181 / 652971$$
- (03) "% pob. ciud"=
$$(16.3 + 11.3) * \text{DENS0} / \text{DENS}$$
- (04) "% VKA urbano"=
$$0.488$$
- (05) Aumento parque=
$$\text{IF THEN ELSE}(\text{"VEH/persona"} < \text{"Tope Veh/persona"}, 1.66063e+006 / 12 * \text{USO COCHE} / \text{uco cohe0} * (\text{"pveh/i0"} / \text{"Pveh/I"})^2, 0)$$
- (06) Bajas parque=
$$\text{VEH} / \text{Vida útil}$$
- (07) ciud0= INITIAL(
$$\text{"% pob. ciud"})$$
- (08) cong=

DELAY1(VKA*("%VKA urbano"/V media urb+(1-"%VKA urbano")/V media interurb)

-VKA*("%VKA urbano"/V libre urb+(1-"%VKA urbano")/V libre interurb), 1)

(09) DEMANDA TOTAL = WITH LOOKUP (

Time,

((1992,0)-
(2035,2e+006)],(1992,357534),(2000,32,554386),(2007,678305),(
2012,624605),(2030,1.00952e+006))

Units: **undefined**

DAtos de 2007 y 2012 de las cuentas ecológicas, tabla 20. los

otros dos puntos tan sólo marcan tendencia. Millones de
personas-km

(10) DENS=

DELAY3I(Población/superficie*VEH0/VEH, 120, Población/superficie)

(11) DENS0= INITIAL(

DENS)

(12) FINAL TIME = 2030

(13) GEN = WITH LOOKUP (

Time,

((2000,30)-(2050,100)],(2005,50),(2014,50),(2030,40))

(14) GEN0= INITIAL(

GEN)

(15) HABITO bici=

$$\text{SMOOTH3I}(-0.8*(\text{OCU0}/\text{OCU})*(\text{metro0}/\% \text{ pob. metro})*(\% \text{ pob. ciudad}/\text{ciud0})*(\text{GEN0}/\text{GEN})*(\text{I medios}/\text{I0})*(\text{TH0}/\text{TH}), 3, -0.8)$$

(16) HABITO bus=

$$\text{SMOOTH3I}(1.19*(\text{OCU}/\text{OCU0})*(\% \text{ pob. metro}/\text{metro0})*(\text{ciud0}/\% \text{ pob. ciudad})*(\text{GEN0}/\text{GEN})*(\text{I0}/\text{I medios})*(\text{TH0}/\text{TH}), 3, 1.19)$$

(17) HABITO coche=

$$\text{SMOOTH3I}(2.12*(\text{OCU}/\text{OCU0})*(\text{metro0}/\% \text{ pob. metro})*(\% \text{ pob. ciudad}/\text{ciud0})*(\text{GEN0}/\text{GEN})*(\text{I medios}/\text{I0})*(\text{TH}/\text{TH0}), 3, 2.12)$$

(18) HABITO moto=

$$0.53*(\text{OCU}/\text{OCU0})*(\% \text{ pob. metro}/\text{metro0})*(\% \text{ pob. ciudad}/\text{ciud0})*(\text{GEN0}/\text{GEN})*(\text{I medios}/\text{I0})*(\text{TH0}/\text{TH})$$

(19) HABITO otropublic=

$$\text{SMOOTH3I}(1.29*(\text{OCU}/\text{OCU0})*(\% \text{ pob. metro}/\text{metro0})*(\text{ciud0}/\% \text{ pob. ciudad})*(\text{GEN0}/\text{GEN})*(\text{I medios}/\text{I0})*(\text{TH0}/\text{TH}), 3, 1.29)$$

(20) HABITO pie=

$$\text{SMOOTH3I}(0.64*(\text{OCU}/\text{OCU})*(\text{metro0}/\% \text{ pob. metro})*(\% \text{ pob. ciudad}/\text{ciud0})*(\text{GEN0}/\text{GEN})*(\text{I0}/\text{I medios})*(\text{TH}/\text{TH0}), 3, 0.64)$$

Units: **undefined**

- (21) I medios = WITH LOOKUP (
- Time,
- ([(2000,0)-
- (2030,50)],(2004,20.92),(2005,21.793),(2006,22.735),(2007,23.712
-),(2008,25.227),(2008,25.277),(2009,25.556),(2010,25.14),(2011,24.176),(2012
- ,23.972),(2030,40.9595))
- (22) IO= INITIAL(
- I medios)
- (23) INITIAL TIME = 2006
- (24) Intensidad fuel=
- 0.16*REGULACIÓN
- 0.16+RAMP(-0.01 ,2030, 2030) MAX(0.16-0.16*EXP(-RAMP(0.01
- ,2030, 2030)) ,0.04)
- (25) IPC=
- 0.027
- (26) km de red = WITH LOOKUP (
- Time,
- ([(2000,600000)-
- (2030,700000)],(1996,652315),(1997,651798),(1998,652971)
- ,(1999,653467),(2000,653255),(2001,653497),(2002,653837),(2003,654282),(2004
- ,654282),(2005,655344),(2006,656037),(2007,655709),(2008,654709),(2009,655161
-),(2010,655485),(2011,655583),(2012,655293),(2013,655059),(2030,663742))

- (27) km red0= INITIAL(
 km de red)
- (28) metro0= INITIAL(
 "% pob. metro")
- (29) OCU = WITH LOOKUP (
 Time,
 ((1992,0)-
 (2030,100)],(1992,40.55),(1993,37.366),(1994,37.14),(1995,37.9497
),(1996,38.9368),(1997,39.835),(1998,40.926),(1999,42.87),(2000,44.42),(2001
 ,45.08),(2002,48.57),(2003,49.85),(2004,51),(2005,53.02),(2006,54.37),(2007
 ,52.027),(2008,48.79),(2009,48.133),(2010,46.68),(2011,44.7),(2012,44.45),
 (2030,54.95)))
 Units: **undefined**
 0.66 anual entre 2014 y 2030
- (30) OCU0= INITIAL(
 OCU)
- (31) Pbici0= INITIAL(
 tbici*€bici*"VEH/persona"*VKA)
- (32) Pbus0= INITIAL(
 tbus*€bus*"VEH/persona")
- (33) Pcoche0= INITIAL(
 tcoche*€coche/"VEH/persona")

(34) PERCEPCION bici=

$$\text{DELAY II}(-0.8 * P_{\text{bici0}} / t_{\text{bici}} / \epsilon_{\text{bici}} / \text{"VEH/persona"} / \text{VKA}, 1, -0.8)$$

(35) PERCEPCION bus=

$$\text{DELAY II}(1.19 * P_{\text{bus0}} / t_{\text{bus}} / \epsilon_{\text{bus}} / \text{"VEH/persona"}, 1, 1.19)$$

(36) PERCEPCION coche=

$$\text{DELAY II}(2.12 * P_{\text{coche0}} / t_{\text{coche}} / \epsilon_{\text{coche}} * \text{"VEH/persona"}, 1, 2.12)$$

(37) PERCEPCION moto=

$$\text{DELAY II}(0.53 * P_{\text{moto0}} / t_{\text{moto}} / \epsilon_{\text{moto}} / \text{"VEH/persona"}, 1, 0.53)$$

(38) PERCEPCION otropublic=

$$\text{DELAY II}(1.29 * P_{\text{otro0}} / t_{\text{otropublic}} / \epsilon_{\text{otropublic}} / \text{"VEH/persona"}, 1, 1.29)$$

(39) PERCEPCION pie=

$$\text{DELAY II}(0.64 * P_{\text{pie0}} / t_{\text{pie}} / \text{"VEH/persona"} / \text{VKA}, 1, 0.64)$$

(40) P_{fuel}=

$$1 + 1 * 0.036 * (\text{Time} - 2005)$$

(41) "P_{fuel/km}"=

$$\text{Intensidad fuel} * P_{\text{fuel}}$$

(42) P_{moto0}= INITIAL(

$$t_{\text{moto}} * \epsilon_{\text{moto}} * \text{"VEH/persona"})$$

Units: **undefined**

- (43) Población = WITH LOOKUP (
- Time,
- ([(1992,4e+007)-
- (2030,7e+007)],(2004,4.25475e+007),(2005,4.32963e+007),(
- 2006,4.401e+007),(2007,4.47847e+007),(2008,4.56689e+007),(2009,4.62393e+007
-),(2010,4.64866e+007),(2011,4.60526e+007),(2011,4.66672e+007),(2011.45,4.60526e
- +007
-),(2012,4.68182e+007),(2013,4.67279e+007),(2030,6.68159e+007)))
- (44) Potro0= INITIAL(
- totropublic*€otropublic*"VEH/persona")
- (45) Ppie0= INITIAL(
- tpie*"VEH/persona"*VKA)
- (46) Pveh=
- 0.08182+0.08182*IPC*(Time-2005)
- (47) "Pveh/I"=
- Pveh/(I medios)
- (48) "pveh/i0"= INITIAL(
- "Pveh/I")
- (49) REGULACIÓN=
- 1+RAMP(-0.5/12, 2031, 2035)

- (50) SAVEPER =
TIME STEP
- (51) superficie=
505992
- (52) tbici=
0.05
- (53) tbus=
 $0.0833 + \text{cong}/\text{VKA} * 0.32$
- (54) tcoche=
 $0.03968 + \text{cong}/\text{VKA} * 0.68$
- (55) TH = WITH LOOKUP (
Time,
 $((2000,0)-(2035,50)],(2006,48),(2014,48),(2030,40))$)
- (56) TH0= INITIAL(
TH)
- (57) TIME STEP = 0.0833
- (58) tmoto=
0.0375
- (59) "Tope Veh/persona"=

(60) totropublic=

0.039855

(61) tpie=

0.1709

(62) uco cohe0= INITIAL(

USO COCHE)

(63) USO AUTOBÚS=

EXP(HABITO bus)*EXP(PERCEPCION bus)/(EXP(HABITO bus)*EXP(PERCEPCION bus)+

EXP(PERCEPCION bici)*EXP(HABITO bici)+EXP(PERCEPCION coche)*EXP(HABITO coche

)+EXP(PERCEPCION moto)*EXP(HABITO moto)+EXP(PERCEPCION otropublic)*EXP(HABITO otropublic

)+EXP(PERCEPCION pie)*EXP(HABITO pie))

(64) USO BICI=

EXP(HABITO bici)*EXP(PERCEPCION bici)/(EXP(HABITO bus)*EXP(PERCEPCION bus

)+EXP(PERCEPCION bici)*EXP(HABITO bici)+EXP(PERCEPCION coche)*EXP(HABITO coche

)+EXP(PERCEPCION moto)*EXP(HABITO moto)+EXP(PERCEPCION otropublic)*EXP(HABITO otropublic

)+EXP(PERCEPCION pie)*EXP(HABITO pie))

(65) USO COCHE=

EXP(HABITO coche)*EXP(PERCEPCION coche)/(EXP(HABITO bus)*EXP(PERCEPCION bus

$$)+EXP(PERCEPCION\ bici)*EXP(HABITO\ bici)+EXP(PERCEPCION\ coche)*EXP(HABITO\ coche)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ moto)*EXP(HABITO\ moto)+EXP(PERCEPCION\ otropublic)*EXP(HABITO\ otropublic)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ pie)*EXP(HABITO\ pie))$$

(66) USO MOTO=

$$EXP(HABITO\ moto)*EXP(PERCEPCION\ moto)/(EXP(HABITO\ bus)*EXP(PERCEPCION\ bus)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ bici)*EXP(HABITO\ bici)+EXP(PERCEPCION\ coche)*EXP(HABITO\ coche)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ moto)*EXP(HABITO\ moto)+EXP(PERCEPCION\ otropublic)*EXP(HABITO\ otropublic)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ pie)*EXP(HABITO\ pie))$$

(67) USO OTROPUBLICO=

$$EXP(PERCEPCION\ otropublic)*EXP(HABITO\ otropublic)/(EXP(HABITO\ bus)*EXP(PERCEPCION\ bus)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ bici)*EXP(HABITO\ bici)+EXP(PERCEPCION\ coche)*EXP(HABITO\ coche)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ moto)*EXP(HABITO\ moto)+EXP(PERCEPCION\ otropublic)*EXP(HABITO\ otropublic)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ pie)*EXP(HABITO\ pie))$$

(68) USO PIE=

$$EXP(HABITO\ pie)*EXP(PERCEPCION\ pie)/(EXP(HABITO\ bus)*EXP(PERCEPCION\ bus)+$$

$$EXP(PERCEPCION\ bici)*EXP(HABITO\ bici)+EXP(PERCEPCION\ coche)*EXP(HABITO\ coche)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ moto)*EXP(HABITO\ moto)+EXP(PERCEPCION\ otropublic)*EXP(HABITO\ otropublic)$$

$$)+EXP(PERCEPCION\ pie)*EXP(HABITO\ pie))$$

(69) V libre interurb=

100

(70) V libre urb=

50

(71) V media interurb=

86.66*km de red/km red0

(72) V media urb=

24.15*km de red/km red0

(73) VEH= INTEG (

Aumento parque-Bajas parque,

2.10526e+007)

(74) "VEH/persona"=

VEH/Población

Units: **undefined**

(75) VEH0= INITIAL(

VEH)

Units: **undefined**

(76) Vida útil=

218*(I0/I medios)^0.5

(77) VKA= ACTIVE INITIAL (

USO COCHE*DEMANDA TOTAL/12,

238024/12)

$$(78) \quad \text{€bici} =$$

$$0.03555 + 0.03555 * \text{IPC} * (\text{Time} - 2005)$$

$$(79) \quad \text{€bus} =$$

$$0.07 + 0.07 * \text{IPC} * (\text{Time} - 2005)$$

$$(80) \quad \text{€coche} =$$

$$P_{\text{veh}} + "P_{\text{fuel/km}}" + 0.007 + 0.0206$$

$$(81) \quad \text{€moto} =$$

$$("P_{\text{fuel/km}}" * 0.75) + (0.0178 + 0.018 + 0.02) * (1 + \text{IPC} * (\text{Time} - 2005))$$

$$(82) \quad \text{€otropublic} =$$

$$0.035 + 0.035 * \text{IPC} * (\text{Time} - 2005)$$