

**Trabajo Tutelado Análisis y Gestión
de la Demanda de Transporte**

Tutor: Daniel de la Hoz Sánchez

*Análisis del Impacto del Cobro
de Impuestos a los
Combustibles sobre la
Movilidad y las Emisiones de
CO₂ Utilizando Sistemas
Dinámicos*

2008



*Doctorado Planificación, Diseño y
Gestión Sostenible de Sistemas de
Ingeniería Civil*

Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Ingeniería Civil:
Hidráulica y Energética

Luis Angel Guzmán-García
Ingeniero Civil

Septiembre de 2008



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. METODOLOGÍA.....	9
2.1.1. <i>Relación a Largo Plazo.....</i>	<i>11</i>
2.1.2. <i>Comportamiento Dinámico</i>	<i>12</i>
3. MODELOS DINÁMICOS TRANSPORTE - TERRITORIO	15
3.1. EL MODELO TERRITORIAL Y EL TRANSPORTE URBANO	15
3.1.1. <i>Tendencias en la Relación entre Usos del Suelo y Transportes</i>	<i>18</i>
3.1.2. <i>Factores en la Relación Usos del Suelo – Transporte.....</i>	<i>19</i>
3.1.3. <i>Impactos de la Distribución de los Usos del Suelo</i>	<i>20</i>
3.1.4. <i>Modelos del Usos del Suelo y Transporte</i>	<i>22</i>
3.1.5. <i>Formulación del Sistema Dinámico de Usos del Suelo y Transporte</i>	<i>25</i>
3.2. EL MODELO MARS.....	27
3.2.1. <i>Características Principales del Modelo.....</i>	<i>29</i>
4. POLÍTICAS Y ESCENARIOS ASUMIDOS	31
4.1. ESTRATEGIA DENTRO DEL MODELO	35
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	36
6. ANEXO I. LA DINÁMICA DE SISTEMAS - DESCRIPCIÓN	43
6.1. HISTORIA.....	45
6.2. ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA.....	46
6.2.1. <i>Límites del Sistema</i>	<i>46</i>
6.2.2. <i>Elementos y Relaciones en un Modelo</i>	<i>47</i>
6.3. DIAGRAMA CAUSAL Y CICLO	47
6.3.1. <i>Niveles</i>	<i>49</i>
6.3.2. <i>Variables de Flujo</i>	<i>49</i>
6.3.3. <i>Variables Auxiliares</i>	<i>51</i>
6.4. LAS ECUACIONES DEL MODELO Y SU PROGRAMACIÓN	52
7. ANEXO II. EL MODELO MARS	54
7.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MODELO	55
7.1.1. <i>El Modelo de Transporte</i>	<i>60</i>
7.1.2. <i>El Modelo de Usos del Suelo</i>	<i>67</i>
7.2. EL MODELO EN EL ENTORNO VENSIM®	78
7.3. MARS EN MADRID	82
7.3.1. <i>Información Requerida por el Modelo.....</i>	<i>85</i>
7.4. CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE	85
7.4.1. <i>Generación de Viajes</i>	<i>85</i>
7.4.2. <i>Atractividad.....</i>	<i>86</i>
7.4.3. <i>Distribución de Viajes</i>	<i>87</i>
8. REFERENCIAS	96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de Retroalimentación de Usos del Suelo y Transporte	13
Figura 2. Diagrama Agregado de Usos del Suelo y Transporte	23
Figura 3. Ritmo de Cambios en el Sistema Usos del Suelo y Transporte	27
Figura 4. Estructura Básica de los Submodelos de MARS (Pfaffenbichler, 2003)	28
Figura 5. CLD del Modelo de Transporte – Viajes “commuting” en Coche en MARS	29
Figura 6. CLD del Factor de Fricción del Coche – Modelo de Transporte, MARS (Pfaffenbichler, 2003).....	35
Figura 7. Emisiones de CO ₂ en Madrid	36
Figura 8. Uso del Coche en Madrid	37
Figura 9. Distancia Media de Viaje.....	39
Figura 10. Diagrama Causal Simple Con una Variable de Nivel y una Tasa de Flujo.....	47
Figura 11. Representación de un Flujo	50
Figura 12. Conexión de un Nivel N a los Flujos de Entrada FE y de Salida FS	50
Figura 13. La Variable B es una Función Lineal o Tabla de A.....	51
Figura 14. MARS, Modelo de Usos del Suelo y Transporte	54
Figura 15. MARS Data User Interface.....	56
Figura 16. Modelo Estratégico y Táctico de Transporte	60
Figura 17. Etapas de un Viaje en Transporte Público en MARS	64
Figura 18. Etapas de un Viaje en Coche en MARS	66
Figura 19. Diagrama de Redistribución de Zonas Residenciales	73
Figura 20. Estructura del Modelo de Transportes	79
Figura 21. Cálculo de la Fricción del Modo Coche	80
Figura 22. Cálculo de la Fricción del Modo Bus	80
Figura 23. Estructura del Modelo de Localización Residencial.....	81
Figura 24. Estructura del Modelo de Localización de Empleos	82
Figura 25. Zonas MARS Propuestas para Madrid.....	83
Figura 26. Calibración de la Tasa de Viajes r	86
Figura 27. Calibración de las Factores de Atractividad Viajes C-T.....	87
Figura 28. Modelo de Calibración MARS en Vensim (periodo peak).....	88
Figura 29. Modelo de Calibración MARS en Vensim (periodo off peak).....	89
Figura 30. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Viajes Totales.....	90
Figura 31. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Viajes Totales.....	90
Figura 32. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Slow Modes	91
Figura 33. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Slow Mode.....	92
Figura 34. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Coche	92
Figura 35. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Coche	93
Figura 36. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Bus	93
Figura 37. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Bus	94
Figura 38. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Rail.....	94
Figura 39. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Rail.....	95



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escenarios Finales a Evaluar	32
Tabla 2. Especificación de Escenarios Base	33
Tabla 3. Tasas de Crecimiento del Precio e Impuestos Según el Tipo de Combustible	34
Tabla 4. Parámetros de Fricción para Slow Modes.....	63
Tabla 5. Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Bus.....	65
Tabla 6. Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Rail	65
Tabla 7. Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Coche	67
Tabla 8. Zonas MARS.....	84
Tabla 9. Factores de Calibración Viajes Casa-Trabajo	89
Tabla 10. Comparación Viajes Observados y Viajes MARS.....	91
Tabla 11. Factores de Calibración Viajes Casa-Otros	95



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Evolución de la Variable de Nivel	49
Ecuación 2. Generación de Viajes.....	61
Ecuación 3. Tiempo Total de Viaje (C-T-C)	61
Ecuación 4. Presupuesto de Viaje (Otros de Viajes).....	61
Ecuación 5. Tiempo Total de Viaje (Otros Viajes).....	61
Ecuación 6. Distribución de Viajes.....	62
Ecuación 7. Acceso a Coche	63
Ecuación 8. Factor de Fricción Slow Modes.....	63
Ecuación 9. Factor de Fricción Transporte Público	64
Ecuación 10. Factor de Fricción para los Costes de Viaje de Transporte Público	65
Ecuación 11. Factor de Fricción para Transporte Privado.....	66
Ecuación 12. Factor Subjetivo Adicional para el Coche.....	67
Ecuación 13. Factor de Fricción para los Costes de Viaje en Coche.....	67
Ecuación 14. Submodelo de Desarrollo Residencial	68
Ecuación 15. Submodelo Residencia de Salida de Zona	69
Ecuación 16. Potencial de Residentes que Salen de la Zona	70
Ecuación 17. Oferta de Viviendas por Zona	70
Ecuación 18. Oferta Total de Viviendas	70
Ecuación 19. Demanda de Viviendas.....	71
Ecuación 20. Cambio en la Población en el Año 0.....	71
Ecuación 21. Factor de Demanda Vivienda.....	71
Ecuación 22. Restricción de la Demanda	71
Ecuación 23. Distribución de la Demanda por Viviendas	72
Ecuación 24. Redistribución de la Sobredemanda en Vivienda	74
Ecuación 25. Relación entre el Potencial de Construcción y el Factor de Demanda	74
Ecuación 26. Relación entre el Alquiler, el Factor de Demanda y el Tráfico	74
Ecuación 27. Relación entre el Precio del Suelo y las Zonas Verdes.....	74
Ecuación 28. Demanda Externa para la Iteración Siguiete.....	75
Ecuación 29. Porcentaje de Puestos de Trabajo que Salen de una Zona.....	75
Ecuación 30. Puestos de Trabajo que Salen de una Zona	75
Ecuación 31. Espacio Disponible para Puestos de Trabajo.....	76
Ecuación 32. Submodelos de Localización de Puestos de Empleo	76
Ecuación 33. Número Potencial de Puestos de Empleo a Ubicar	77
Ecuación 34. Cambio en los Puestos de Empleo por Zona	77
Ecuación 35. Espacio Disponible para Puestos de Empleo.....	77
Ecuación 36. Limitación al Desarrollo de Puestos de Empleo por Disponibilidad de Espacio	77
Ecuación 37. Redistribución de la Sobre Demanda para el Espacio de Puestos de Trabajo.....	78
Ecuación 38. Atractividad C-T.....	87
Ecuación 39. Factores de Calibración para la Distribución de Viajes.....	88



1. INTRODUCCIÓN

La planificación del transporte ya no consiste en expandir y desarrollar la red tanto y tan rápido como sea posible. En la actualidad, la tendencia es tratar de conseguir en lo posible, un equilibrio entre la oferta y la demanda, lo que trae como consecuencia inmediata que el espacio cobre un papel, primero, más diferenciado y de gran importancia.

Esta adaptación de oferta, demanda y espacio está generando una transformación acerca de las redes de transporte, los usuarios y la interacción con la estructura de urbana. Esta revolución en el conocimiento de los sistemas de transporte está revaluando la manera de desarrollar los modelos, de tal manera que éstos resulten más dinámicos en su uso para que se adapten mejor a los patrones de transporte. Los patrones generales de uso del espacio y del suelo influyen en el volumen de transporte y en los requisitos de la infraestructura de transporte en cuanto a los usos del suelo y de la misma manera, el sistema de transporte influye en el desarrollo del uso del suelo, aunque con un retraso en el tiempo. Este aspecto está relacionado con el creciente desarrollo de zonas residenciales periféricas y el crecimiento urbano descontrolado que son la causa de la cada vez mayor dependencia del coche y de que los trayectos realizados sean más largos (con un correspondiente aumento de emisiones de contaminantes), a su vez, el aumento del uso del coche tiene también que ver con la dispersión de las ciudades. En cuanto a la infraestructura, es necesario distinguir entre los diferentes medios de transporte, con sus propios requisitos en cuanto al uso del suelo. En las zonas urbanas las necesidades espaciales de la infraestructura de transporte son normalmente mayores que en las zonas rurales y suponen entre un 10% y un 15% del uso total del suelo.

Por otro lado, como regla general, las ciudades han tenido desde siempre una mezcla de usos, incluso dentro de zonas consideradas como netamente residenciales. Desde hace relativamente poco tiempo el transporte y los usos del suelo se vienen considerando como dos sistemas que se relacionan íntimamente y cambian de una manera dinámica. El transporte no se considera un fin en sí mismo, pero es un medio que las personas utilizan para poder realizar sus actividades diarias en cualquier lugar, ya sea trabajo o diversión. La ubicación de estos centros de actividades y de residencia definirán los patrones de éstos desplazamientos, generando más o menos viajes de personas y/o mercancías.

Teniendo en cuenta las nuevas tendencias de crecimiento urbano y pautas de movilidad y sus efectos asociados sobre las ciudades europeas, en la reciente comunicación del "Libro Verde, hacia una nueva cultura de la movilidad urbana" claramente se especifica que aunque todas las zonas urbanas tiene características propias, se enfrentan a retos afines tratando de encontrar soluciones similares para hacer nuestras ciudades más sostenibles (COM (2007) 551). Esto no es una tarea menor cuando en Europa más del 60% de la



población vive en áreas urbanas y son responsables del 85% del PIB (COM (2007) 551, Eurostat). A lo largo de toda Europa el incremento del tráfico rodado es un fenómeno común. Estas circunstancias crean una situación adversa en la que las externalidades creadas (congestiones, polución, estrés, inequidades sociales, etc.) conducen a las ciudades en una espiral de degradación. Al mismo tiempo, el cambio climático es reconocido como un problema. En el Protocolo de Kioto, los estados miembros acordaron compromisos importantes de reducción de su capacidad emisora de los gases de efecto invernadero. Bajo este objetivo, diversas políticas se han llevado a cabo de muy diversa índole, ya sea como respuesta a Directivas Europeas o a iniciativas individuales. La sensibilidad hacia entornos urbanos más “verdes” está creciendo y el transporte está en la agenda de todos, tanto a nivel nacional como local. El interés por la formulación de políticas de movilidad sostenible está creciendo de manera considerable. Algunas de las políticas quedan englobados bajo el título de políticas de gestión de la demanda (TDM, por sus siglas en inglés) y políticas como las impositivas sobre el combustible caerían también bajo dentro de este concepto. Si bien las implicaciones de este tipo de políticas parece claro que pueden influir sobre la elección modal, principalmente a corto plazo, la efectividad de la medida crece principalmente a largo plazo en el momento en que existan escenarios de mayor eficiencia tecnológica o se tenga en cuanto su implicación sobre las dinámicas urbanas de localización e interacción entre actividades.

Debido a la gran complejidad que existe en la interacción de los sistemas de transporte con los usos del suelo y la localización de actividades, es importante analizar de la mejor manera posible los problemas de las ciudades y ver, a largo plazo, el impacto de las estrategias implementadas. Por esta razón, es necesario contar con herramientas útiles para evaluar las políticas e inversiones, ya que en la mayoría de las veces no es posible contar con estudios detallados de transporte, que implican una toma de grandes y costosos volúmenes de información, lo que hace del proceso una tarea lenta y sin tener la seguridad que este nivel de detalle servirá para una planeación efectiva.

Esta situación dio paso el desarrollo de modelos estratégicos, los cuales trabajan con un nivel de agregación alto, con una zonificación relativamente pequeña, razón por la cual no es necesario un nivel de información muy detallado. Un modelo de este tipo está en capacidad de evaluar estrategias con mucha más rapidez que los modelos clásicos y además, tienen en cuenta sus efectos a largo plazo. Así, los modelos estratégicos de transporte y usos del suelo permiten analizar gran variedad de alternativas, para así posteriormente profundizar en las medidas puntuales requeridas.

Una parte de estos modelos estratégicos, son los modelos construidos con ayuda de los sistemas dinámicos (ver numeral 6). Estos se refieren al conjunto de interrelaciones que se producen en toda el área urbana o regional, tanto en el desarrollo de las actividades inherentes con el desarrollo de la ciudad, como a



sus sistemas de transporte. Los sistemas dinámicos sirven para entender cómo evolucionan los procesos de la naturaleza, en este caso una zona urbana. Un sistema dinámico es aquel donde las actividades predominantes del sistema provocan cambios en los atributos de las entidades del mismo. Cuando se modela matemáticamente un sistema, las variables del modelo que representan los atributos se controlan mediante funciones continuas. De manera general, en los sistemas dinámicos las relaciones describen las tasas a que cambian los atributos, de manera que el modelo está formado por ecuaciones diferenciales. Una explicación acerca de la dinámica de sistemas puede verse un poco más en detalles en el Anexo I.

Por las razones descritas anteriormente, el objetivo principal de esta comunicación es analizar cómo influye una política de impuestos sobre la energía en el ámbito del transporte bajo esta perspectiva. Si está asumido que mayores velocidades permiten a las personas recorrer mayores distancias para satisfacer sus necesidades dentro de sus condicionantes de tiempo y coste y por tanto una dispersión, indirectamente también se asume que el incremento del coste del desplazamiento puede producir un efecto gravitatorio que compacte las ciudades en subcentros de actividades.

Para ello se plantearán diferentes escenarios tecnológicos e impositivos a evaluar simulando sus efectos en un modelo de usos del suelo y transporte bajo un entorno de Sistemas Dinámicos. Se aplicará un modelo dinámico a la Comunidad de Madrid, comparándose los resultados obtenidos y la importancia del efecto regional sobre una misma política de transporte.

El modelo utilizado como herramienta en esta comunicación para medir los diferentes impactos, es conocido como MARS (Pfaffenbichler 2003) "Metropolitan Activity Relocation Simulator" y este documento también se enfocará en describir el proceso de su implementación en la Comunidad de Madrid, así como su desarrollo y calibración.



2. METODOLOGÍA

La metodología de este estudio se centrará en analizar cómo la implementación de una política de gestión de la demanda de transporte en Madrid obtendría un descenso en los niveles de contaminación, dando prioridad a modos de transporte diferentes al vehículo privado y fomentando la concentración de actividades para así evitar la tendencia cada vez más creciente de hacer viajes más largos, donde el transporte público es poco competitivo, es decir, una gestión enfocada hacia la sostenibilidad del transporte.

Múltiples y complejas son las causas de la descentralización de las ciudades modernas: aspectos socio demográficos, económicos y estructurales. En Madrid por ejemplo, entre los primeros cabe citar el aumento de la población, la estructura demográfica, en donde el grueso de la pirámide coincide con aquellos segmentos de edad que están en situación de conformar nuevos hogares así como en disposición de comprar y utilizar un coche; el tamaño de los hogares que desciende de forma continuada, mientras que el grado de motorización aumenta produciendo una mayor disponibilidad del vehículo privado, el aumento de la inmigración como segmento de usuarios con clara orientación hacia el transporte público, lo cual condiciona también su decisión de localización residencial, entre otros aspectos. Entre los aspectos económicos influye de manera decisiva un mercado inmobiliario con costes que influyen sobre la decisión de localización residencial. También hay elementos estructurales como la densidad de los desarrollos urbanísticos, la planificación de la localización de los usos del suelo, el diseño del desarrollo hacia el transporte público o el vehículo privado, la estructuración de los servicios de transporte público, las medidas fiscales o tarifarias, etc.

Las metrópolis europeas han experimentado en los últimos años una expansión sin precedentes. Se trata por lo tanto de un crecimiento superficial desproporcionado en relación a la evolución de la población. Las metrópolis crecen en extensión y sus límites son más inciertos que nunca. En conjunto las nuevas periferias metropolitanas de las ciudades occidentales se caracterizan por densidades residenciales bajas o medias asociadas a desarrollos de viviendas en edificaciones unifamiliares o en complejos residenciales de poca altura con equipamientos intersticiales (zonas ajardinadas, piscinas, pistas deportivas) y por la existencia de nuevas centralidades, nuevos núcleos de desarrollo, diferentes al tradicional centro de las ciudades. Áreas residenciales y piezas funcionales se sitúan de forma discontinua, dejando espacios intersticiales entre sí, de lo que resulta un paisaje fragmentado y disperso. El predominio de bajas densidades en las áreas residenciales y la dispersión de este tejido suburbano tienen el efecto conjunto de producir un territorio en el que también las bajas densidades de población son su nota característica.



Al mismo tiempo se produce una descentralización de equipamientos y empresas, que si bien tienden a compensar el déficit de la periferia, también contribuyen a la fragmentación del espacio y constituyen un factor de segregación y especialización funcional. La periferia atrae equipamientos y actividades que llegan después que la población y se localizan en los bordes de los espacios edificados o incluso en espacios exteriores (las nuevas centralidades de la periferia), pero siempre buscando una adecuada conexión con la red de carreteras. Parques empresariales y de oficinas, parques industriales, nuevos polígonos industriales, parques tecnológicos, universidades y centros comerciales y de ocio, con frecuencia salpican el territorio metropolitano, incrementando esa sensación de paisaje fragmentario.

Los principales rasgos que pueden apreciarse en estas estructuras espaciales en las periferias metropolitanas tiene que ver con:

- Alta rapidez de expansión
- Límites cada vez más difusos (cinturones verdes)
- Dispersión residencial en baja densidad
- Descentralización de actividades y nuevas centralidades
- Fragmentación del territorio. Especialización de actividades
- Redes de transporte basados en el coche
- Vías públicas como lugares de paso. Ausencia de "vida de barrio"

La influencia entre la estructura urbana y la infraestructura del transporte en la eficiencia económica está presente de forma continua en la definición de las políticas urbanas, sobretudo en un escenario de creación de "mega-ciudades". La dispersión y el uso intensivo del vehículo privado están normalmente asociados a altos niveles de servicio en las infraestructuras y, por tanto, a un alto consumo de recursos, lo cual conduce a un escenario de menor eficiencia económica (Kenworthy 1999).

Las estructuras urbanas monocéntricas, desde el punto de vista de organización del transporte, pueden ser modelos territoriales más eficientes, principalmente porque escenarios policéntricos en los que existe una multicentralidad de actividades y en las que la red de transporte está altamente dominada por el uso del coche, no aseguran la existencia de centros "autosuficientes" con el consecuente descenso en la demanda de transporte (como en la longitud de los desplazamientos como en el uso intenso del coche). Las políticas de desarrollo basadas en bajas densidades y dispersión de actividades conducen a cierto escenario desorganizado en los que el vehículo privado se presenta como la alternativa más favorable.



2.1.1. Relación a Largo Plazo

Con cada día que pasa, se va haciendo más difícil obtener una movilidad que satisfaga las necesidades de los usuarios de los sistemas de transporte de una zona urbana.

Existen numerosos efectos negativos por el principal "problema" que enfrenta cualquier zona urbana: el crecimiento. Los movimientos de personas dentro de las ciudades, las altas densidades, los cambios continuos en los usos del suelo, ocurren de una manera relativamente rápida que las administraciones no responden a tiempo ni eficazmente a estos cambios. El fenómeno de un área metropolitana en constante crecimiento es el resultado del desarrollo de autovías de gran capacidad, así como normas de urbanización no muy claras y de los intereses particulares de los urbanizadores.

Cuanto más se provee oferta de transporte para satisfacer la demanda, más demanda es generada, razón por la cual ya es bien sabido que no se puede volver a caer en este círculo vicioso. Conclusión: usar el suelo de una manera coordinada y más eficiente, teniendo en cuenta el diseño urbano y el diseño de los modos de transporte. Hay que ver el suelo urbano como una herramienta a largo plazo para que el transporte pueda adecuarse a las necesidades diarias de los habitantes de una ciudad.

El transporte es un parámetro causal en relación con los usos del suelo. Los sistemas de transporte tradicionalmente han sido diseñados de modo que respondan a las demandas de viajes creadas por el desarrollo de una zona. De esta manera, el proceso inverso, en donde los usos del suelo afectan la forma de los patrones de viaje y por medio del cual las infraestructuras de transporte afectan a su vez los usos del suelo es una relación más compleja y que tarda mucho más tiempo en mostrar sus efectos.

Las decisiones sobre la urbanización del suelo actúan como un insumo para la generación de demandas de viaje que deberán ser satisfechas por un sistema de transporte. Consecuentemente, es necesario entender las consecuencias de estas decisiones en relación con una política de transporte.

Los sistemas de transporte afectan también los patrones sociales directamente. Tradicionalmente éstos han funcionado con el objeto de mejorar el acceso geográfico entre dos localidades y por ende, mejorar el desarrollo económico.

La falta de políticas de transporte consistentes y la cada vez mayor dispersión de actividades han ocasionado en una serie de implicaciones sociales no necesariamente positivas. El impacto de los grandes sistemas de vías de gran capacidad para las personas que no disponen o no pueden disponer de un vehículo privado. También han contribuido a un mayor uso del coche en detrimento del transporte público. Por lo general, un sistema de transporte tiene las siguientes características:



- Una mayor oferta de infraestructura de carreteras, incentiva el mayor uso del coche.
- Al bajar el número de usuarios del transporte público, se suben las tarifas para tratar de alcanzar un nuevo equilibrio.
- Al aumentar las tarifas, muchos usuarios migran hacia el coche.
- Al descender el número de usuarios, se disminuye el número de servicios.
- Un nuevo aumento en las tarifas, empieza de nuevo el ciclo.

En el análisis final, nunca se debe separar la planeación del transporte de la planeación urbana. El objetivo principal es preservar la o mejorar la movilidad sostenible, pero a su vez reducir la necesidad del transporte para así mejorar la congestión, el consumo energético y las emisiones, entre otros factores.

Localizar una zona residencial cerca de los lugares de trabajo no debería causar aumentos de contaminación, ruido y paisaje. Construir escuelas, centros de ocio y de servicios accesibles, no debería interferir con los deseos que tenga la gente de mayor espacio, tranquilidad y zonas verdes.

2.1.2. Comportamiento Dinámico

Según el tamaño de la ciudad y sus condiciones demográficas y geográficas, el número de usuarios del sistema de transporte y su reparto modal dependen de la localización de actividades, de las necesidades de la población y del coste de transportarte (factores de fricción en el modelo). A su vez, la localización está relacionada con las actividades y las necesidades de las personas están relacionados con factores culturales y socio económicos. En resumen, los usos del suelo tienen un impacto significativo sobre el transporte.

Los sistemas de transporte tienen una gran influencia sobre las actividades que se desarrollan en las zonas urbanas, a la vez que ejercen un efecto estructural en el desarrollo espacial; planteamiento que funciona también a la inversa: la forma de urbanizar influye sobre el sistema de transporte. Además no hay que olvidar que una parte importante del área urbana está ocupada por la infraestructura de transporte, así que el transporte también es un uso del suelo.

El reconocer que las decisiones de viajar y de localización de actividades se determinan la una a la otra, ocasiona que la planificación de usos del suelo y transporte deba ser coordinada, lo que a su vez da como resultado un ciclo que se retroalimenta entre estos dos sistemas, según como se puede ver en la Figura 1. En esta figura se observa claramente cómo la distribución de los usos del suelo en el territorio urbano, determina la localización de las actividades humanas tales como residir, trabajar, estudiar, entre otras.

La distribución de las actividades en el área urbana requiere interacción entre los espacios físicos, lo que supone viajes ó desplazamientos en el sistema de transporte para superar las distancias entre la localización de tales actividades.

La distribución de las infraestructuras en el sistema de transporte crea oportunidades para las interacciones espaciales, que pueden medirse mediante su nivel de accesibilidad, por ejemplo. Y finalmente, los niveles de accesibilidad en el espacio también influyen en la decisión de la localización de las actividades, resultando así algunos cambios en el sistema de usos del suelo. Luego, el ciclo continúa.

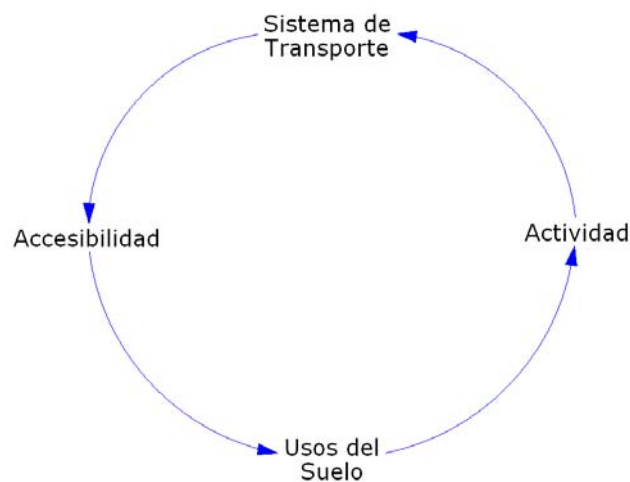


Figura 1. Ciclo de Retroalimentación de Usos del Suelo y Transporte

El comportamiento de un sistema de transporte urbano está condicionado por elementos externos a dicho sistema. Comprendiendo el funcionamiento del mercado de la vivienda, de las tendencias en la ubicación de zonas de empleo y los cambios demográficos y culturales y entendiendo como todos estos elementos se relacionan con el transporte, se podrán tener herramientas de decisión suficientes y válidas para llevar a cabo una mejor planeación urbana.

Sin embargo, otros factores que requieren la atención de los planificadores, han venido cobrando importancia en la actualidad.

- El aumento en los costes y en el consumo de la energía y su impacto sobre la vivienda, el empleo y el comercio en general.
- El envejecimiento de la población y su impacto sobre las necesidades del transporte, vivienda y servicios, como los de salud, por ejemplo.
- La dispersión de zonas de empleo y de viviendas. Baja concentración de actividades.



- Cambios en la estructura del hogar y del estilo de vida.

Generalmente, los modelos de transporte han sido utilizados para predecir el impacto de las políticas de transporte desde hace casi 30 años. Al mismo tiempo, el nivel de detalle en dichos modelos ha crecido rápidamente. En teoría la precisión de los resultados de estos modelos debería aumentar también, sin embargo, esto no necesariamente es cierto. En los modelos convencionales, el transporte y los usos del suelo tienen aún algunos inconvenientes que no se han solucionado del todo: la dispersión urbana, la contaminación, los accidentes, el consumo de bienes no renovables, entre otros. Para responder a preguntas estratégicas como la sostenibilidad, el comportamiento macroscópico de la estructura urbana es esencial, es decir, no es necesario ir a un gran nivel de detalle. Los problemas del transporte no son problemas de comportamiento individual, se deben a un comportamiento colectivo.

De esta manera y por las razones explicadas anteriormente, la metodología empleada en este estudio se basa en la evaluación de una política de gestión de la demanda en la Comunidad de Madrid, por medio de una herramienta (modelo) basada en sistemas dinámicos. Como se mencionó, un modelo estratégico basado en la dinámica de sistemas es el más conveniente debido a sus relaciones transporte y territorio que cambian con el tiempo.

En este caso, la alta integración agregada del modelo dinámico de usos del suelo y transporte MARS, fue desarrollada dentro de un marco centrado en la sostenibilidad. La hipótesis subyacente es que las ciudades son sistemas "auto organizables" y donde sus principales sinergias pueden aplicarse para describir su comportamiento colectivo. Un modelo cualitativo fue desarrollado basado en una investigación vienesa. El método de diagramas retroalimentados fue usado en este caso. Partiendo de la base de este modelo cuantitativo, se convirtió en un código. MARS, en sus inicios, se calibró para la ciudad de Viena. Un programa extensivo de pruebas del modelo se llevó a cabo utilizando información de 1981 a 2001. Pruebas de sensibilidad y de trazabilidad probaron la utilidad de MARS.



3. MODELOS DINÁMICOS TRANSPORTE - TERRITORIO

Como el planeamiento urbano cada vez es más complejo, la utilización de herramientas que nos ayuden a tomar decisiones acertadas para alcanzar el objetivo general de sostenibilidad, es muy importante. Investigaciones recientes muestran que estrategias y políticas aisladas no son suficientes para alcanzar la sostenibilidad, ya que dichas estrategias deben utilizar varios instrumentos para ser exitosas. El uso de modelos y métodos de optimización son recomendables para identificar la mejor estrategia de ejecución.

Las investigaciones de las últimas décadas han mostrado que los usos del suelo y la configuración de los sistemas de transporte están íntimamente relacionados de forma dinámica, por lo tanto es necesario integrar los usos del suelo y los modelos de transporte con el fin de determinar el funcionamiento de las estrategias y políticas urbanas. En la literatura existe una gran variedad de modelos de transporte y/o usos del suelo.

La tendencia actual en la modelación de usos del suelo y transporte está caracterizada por una gran desagregación, incluso por debajo del nivel de hogar. Este modelo tan detallado, independientemente de su atractivo teórico, es inapropiado para identificar estrategias sostenibles. A pesar de la mayor capacidad de procesamiento de datos de los ordenadores, la evaluación de los modelos puede tardar mucho debido al gran número de variables que deben ser consideradas. Por otro lado, es necesario disponer de una gran cantidad de información, incluso se debe recurrir a estimar datos para alimentar el modelo según su nivel de desagregación. Los requerimientos de información son una de las razones por las cuales el uso de modelos integrados de usos del suelo y transporte, no es tan extendido.

Existen varias referencias en la literatura que hablan acerca de la búsqueda de un nivel óptimo de impuestos con el fin de reducir emisiones y alcanzar un bienestar macroeconómico (Nordhaus (1991), Dean and Hoeller (1992)). Azar and Schneider (2002), Weber et al. (2005), Kunsch and Springael (2008), Piattelli, et al (2002)). Este estudio no busca tanto el determinar el óptimo sino el evaluar la efectividad de esta medida a largo plazo. Para ello se ha utilizado una aproximación por medio de sistemas dinámicos que tiene en cuenta la interacción dinámica de los sistemas de transporte con los usos del suelo. Esta interacción es modelada usando sistemas retro-alimentados entre los subsistemas de transporte y usos del suelo a lo largo de un periodo de 30 años.

3.1. El Modelo Territorial y el Transporte Urbano

El número de los viajes y el uso de los diferentes modos de transporte (sistema de transporte) dependerán de las características de las viviendas y demás locales y su ubicación dentro de la zona urbana (sistema de usos del suelo). Pero estos



viajes también dependerán de la distancia a recorrer, así como del coste de realizar dicho recorrido, según el modo en que se elija viajar. A su vez, la localización de los centros residenciales y de trabajo, por ejemplo, está relacionada con las actividades. Y estas actividades y necesidades de las personas dependen de factores culturales y socioeconómicos. En conclusión, la estructura urbana de una ciudad tiene una estrecha relación con los sistemas de transporte y viceversa.

Los sistemas de transporte ejercen una gran influencia sobre el grueso de las actividades que se desarrollan en las zonas urbanas, lo que a su vez ocasiona cambios en la estructura urbana. Este fenómeno también se presenta a la inversa: la estructura espacial urbana influye en los sistemas de transporte.

Es claro que las decisiones de viajar y la localización de actividades, están estrechamente relacionadas una a la otra conformando un ciclo continuo. Este sistema que se retroalimenta continuamente está conformado por varias relaciones:

- La distribución de usos del suelo determina la localización de las diferentes actividades humanas.
- Esta distribución de actividades supone la realización de viajes a través de un sistema de transporte para cubrir las distancias entre la localización de dichas actividades.
- Este sistema de transporte se distribuye por el suelo urbano modificando la estructura espacial de la ciudad y conectando las diferentes actividades que se desarrollan en ella.

El sistema de transporte al conectar las zonas urbanas, favorece ciertos sectores dándole un mayor grado de accesibilidad por encima de otros. Esta accesibilidad viene dada principalmente por el coste de ir de un punto a otro, así como en el tiempo empleado en ello.

Al presentarse cambios en los usos del suelo (vocación, intensidad), también se presentan cambios en las actividades humanas y en los flujos de personas y mercancías sobre dicha zona, lo que hace necesario ajustar la accesibilidad a las nuevas necesidades. Por ejemplo, al implementarse una gran infraestructura urbana de transporte (estación de tren, intercambiador, etc.), ésta generará una mayor accesibilidad a la zona, modificando de alguna manera los patrones de viaje. Los desarrollos urbanísticos (ya sean residenciales o comerciales) aumentarán y las personas realizarán más viajes desde y hacia este lugar. Como consecuencia de este desarrollo, el precio del suelo aumentará, así como la oferta de diferentes bienes y servicios, lo que a su vez, atraerá más viajeros. Este cambio en la estructura urbana de la zona en cuestión, depende de cuánto se mejore la accesibilidad, del aumento de



oferta de los bienes y servicios de la zona dada por la mejora del transporte y de las condiciones del mercado de la región.

De una manera similar, los cambios en los usos del suelo dependerán en gran medida de los cambios en los patrones de viaje. Si se construye un centro de gran atracción de público, éste cambiará el comportamiento habitual de los viajeros en su zona de influencia, debido a la nueva oferta de servicios disponibles. La magnitud del cambio en el comportamiento de los viajeros dependerá de su localización y de su atraktividad respecto a centros de atracción similares en la región.

Según Meurs H. y Haaijer R. (2001), la estructura espacial urbana puede tener efectos directos e indirectos en la movilidad y en la elección del modo de transporte: las características espaciales afectan directamente las características personales y de las familias de una cierta zona residencial y tienen un efecto indirecto, en términos de accesibilidad, sobre los diversos modos de transporte. Es decir, el sistema de transporte a implementar debe estar integrado, en lo posible, dentro del espacio urbano.

Lo anterior significa que si se produce un cambio en los usos del suelo, en el sistema de transporte, en la accesibilidad o en las actividades, puede haber un impacto en el sistema. Por ejemplo, cambios en los patrones de uso del suelo pueden cambiar los costes de transporte de un sitio a otro. La descentralización de las zonas de empleo lleva a viajes más largos, incentivando el uso del coche y a su vez, aumentando la congestión en las carreteras, así como la emisión de contaminantes.

Es bien conocido que en las zonas urbanas actuales se está presentando un problema de descentralización de las actividades. Se mejoraron considerablemente las autopistas exteriores y se potenciaron los sistemas férreos, haciendo que la gente prefiera vivir cada vez más en la periferia de las ciudades y a utilizar cada vez más el coche. La mejora de los ingresos de los hogares permite a las familias comprar más coches.

Este proceso de descentralización también ha sido beneficiado por las políticas de usos del suelo: los altos precios de las viviendas en los centros urbanos, así como la poca disponibilidad de espacio, hace más atractiva económicamente hablando la opción de vivir en los suburbios de las ciudades. También este fenómeno ha sido favorecido por el traslado de las empresas a polígonos industriales en las afueras, haciendo de las ciudades cada vez menos dependientes del centro.

Para tener un mejor conocimiento de la relación entre los usos del suelo y el sistema de transporte, es necesario conocer el contexto en que se toman las decisiones. Debido a las diferentes fases del proceso de toma de estas decisiones, es muy difícil medir, predecir y coordinar el transporte con los usos del suelo, ya que las inversiones sobre los usos del suelo generalmente son



realizadas por el sector privado, mientras que las infraestructuras de transporte están a cargo de los gobiernos.

El complejo y dinámico proceso del desarrollo urbano hace muy difícil la capacidad para predecir los cambios en la política de usos del suelo y transporte: los patrones de éstos cambian muy lentamente debido a las características propias de la urbanización y a su alto coste, además la gran flexibilidad de la demanda hace que los usuarios puedan cambiar sus horarios, rutas, destinos, modos de los viajes, así como la localización de las viviendas y empleos, haciendo mayor aún la incertidumbre.

Así mismo, la magnitud del impacto sobre la ciudad depende del tamaño de la inversión a realizar: el efecto de nuevos servicios en áreas poco consolidadas puede ser mayor. En una escala local, las autopistas pueden afectar tanto el precio del suelo como los patrones de desarrollo, pero a una escala metropolitana, éstas pueden asociarse a la descentralización de la población y a la disminución de la densidad de los desarrollos.

Por todo esto, las complejas relaciones entre los usos del suelo y el transporte dificultan las investigaciones relacionadas con la evaluación de los impactos en estas áreas, motivo por el cual es necesario revisar las tendencias históricas de los patrones de desarrollo y crecimiento regional.

3.1.1. Tendencias en la Relación entre Usos del Suelo y Transportes

Un principio fundamental sobre el que se construyen muchos análisis del transporte, es que éste se percibe como una demanda derivada y como si no tuviera un valor asociado directamente, ya que las personas solo se desplazan debido a los beneficios que se supone obtendrán una vez lleguen a su destino. De esta manera, en teoría los viajes deberán ser lo más cortos posible con el fin de minimizar sus costes.

En los últimos años la relación entre usos del suelo y transporte ha experimentado un nuevo auge involucrando las áreas de medio ambiente y sostenibilidad. Esta relación también ha sido ampliamente reconocida en otras disciplinas como la economía, la geografía y la planificación urbana y aunque históricamente el transporte ha sido muy bien documentado a través de los años, después de muchos debates científicos y políticos y del conocimiento de esta relación, aún no hay un consenso generalizado sobre el impacto de los usos del suelo en el transporte.

Hay muchas discrepancias entre los científicos acerca de esta relación: algunos concluyen que el uso del suelo puede causar un impacto significativo en el comportamiento del viajero, en cambio, otros no han encontrado nada. Algunos hablan acerca de la ilusión que es influir en los patrones de viaje a través de la planificación urbana, en fin, como se dijo al inicio, no hay conclusiones unánimemente aceptadas.



Por ejemplo, dentro de IV Programa Marco de la Unión Europea, se incluyó el proyecto TRANSLAND cuyo fin era crear políticas innovadoras y futuras necesidades de investigación en la planificación integrada del transporte y los usos del suelo a nivel urbano y regional. Algunas de las conclusiones fueron:

- Las políticas de usos del suelo y transporte solo tendrían éxito si se hacen los viajes en coche menos atractivos (más caros y lentos).
- Las políticas de usos del suelo que incentivan la densificación o el desarrollo mixto, no serán efectivas, a menos que se hagan los viajes en coche menos atractivos.
- Las políticas en contra del uso indiscriminado del coche son muy efectivas, pero dependen de una organización espacial no muy dispersa.
- Una estructura urbana cuyos centros de comercio y ocio no estén integrados, favorecerá el uso del coche debido al aumento en las distancias.
- Las políticas destinadas a mejorar la atractividad del transporte público, en general no conducen a una reducción del uso del coche. Solamente atraen un pequeño desarrollo alrededor de sus estaciones.

Al comparar las políticas de usos del suelo y transporte, estas últimas son mucho más eficientes a la hora de reducir la necesidad de viajar y de hacer una movilidad más sostenible. Pero hay que tener en cuenta que las políticas de usos del suelo son necesarias para hacer que una ciudad no sea enteramente dependiente del coche.

Hay muchas razones para decir que los usos del suelo influyen sobre el transporte y viceversa. Generalmente los mayores impactos son los negativos: congestión, seguridad, contaminación (del aire y ruido), etc. La sostenibilidad apunta hacia una planificación de usos del suelo tal que haya un cambio modal del coche al transporte público o a modos no motorizados.

3.1.2. Factores en la Relación Usos del Suelo – Transporte

Entre otros factores que influyen en la relación entre los usos del suelo y el transporte se encuentran la densidad urbana y de empleos, los desarrollos mixtos, la accesibilidad, el diseño urbano, el tamaño de la ciudad, el uso del coche y el coste del tiempo y del viaje.

La densidad se tiene en cuenta como un concepto más amplio: se puede describir como el número de oportunidades (locales, familias, viviendas, escuelas, etc.) por unidad de área. Es claro que una mayor densidad facilita a las personas llevar a cabo un mayor número de actividades en un menor tiempo, disminuyendo las distancias de desplazamiento, ahorrando tiempo y



dinero. Debido a distancias más cortas, puede alcanzarse un mayor número de destinos, incluso utilizando modos no motorizados.

Los desarrollos mixtos son aquellos en donde varias categorías de usos del suelo se localizan en una misma zona. En estos desarrollos se reducen las distancias medias entre viviendas y demás destinos, disminuyendo así el número de vehículos – kilómetro y potenciando modos de transporte alternativos al coche, debido a las menores distancias. Por otro lado, si los servicios se concentran en una determinada zona (por ejemplo el centro), aunque las distancias desde las zonas de residencia sean mayores, probablemente el uso del coche disminuya debido a la concentración de actividades en un solo sector, el número (y coste) restringido de plazas de aparcamiento y (de estar implementado, por ejemplo un peaje) el coste de poder acceder a dicha zona.

La accesibilidad es otro factor que tiene un gran impacto en esta relación, por ejemplo las distancias a conexiones con el transporte público. Cuantos más centros de trabajo y de vivienda se localicen cerca de estaciones de transporte público, los tiempos de acceso serán menores para una mayor cantidad de viajeros, resultando en una mayor utilización del transporte público en comparación con el coche. Por esto, una correcta ubicación de estaciones de transporte público puede influir de gran manera en el comportamiento de los viajeros y en el desarrollo urbanístico de la zona.

En el nivel más inferior del desarrollo de usos del suelo, se encuentra la forma en que se diseña cada urbanización, y que desde acá se distribuye el espacio para las diversas categorías de usos del suelo: desde la arquitectura de los edificios hasta el paisajismo. De esta manera, en zonas donde se proyecten parques o infraestructuras adecuadas y atractivas para, por ejemplo, peatones y ciclistas, el caminar y el uso de la bicicleta puede ser más atractivo que en otras zonas.

3.1.3. Impactos de la Distribución de los Usos del Suelo

En los últimos años se han tomado varias medidas en el mundo sobre los usos del suelo con la idea de solucionar algunos problemas causados por el alto índice de motorización, sin embargo, se presentan varios interrogantes respecto a la eficacia de dichas medidas. Varios autores han investigado este tema en particular (Stead, 2001; Greiving y Wegener, 2001; Meurs y Haijer, 2001; Cervero, 1996; entre otros) y algunas de sus ideas se describirán brevemente.

Muchos estudios al respecto de este tema no tienen en cuenta los factores socioeconómicos, siendo estos factores según algunos autores, más determinantes en la hora de influir en el comportamiento de los viajeros que los usos de suelo. Por ejemplo, se sugiere que las zonas con altas densidades favorezcan una menor cantidad de desplazamientos, pero éstos pueden ser consecuencia de la variación de la renta.



Desde de un punto de vista teórico, el impacto de una alta densidad en la reducción de la longitud de los viajes, puede ser prácticamente nulo si no se tienen en cuenta los costes asociados al viaje, mientras que la alta densidad de empleos está asociada con la longitud media del viaje. También se ha mostrado que la densidad residencial y de empleos, junto con las grandes aglomeraciones y una buena accesibilidad del transporte público, se asocian con un mayor porcentaje de utilización de dicho modo, mientras que el desarrollo mixto (donde las distancias son más cortas), favorece el transporte no motorizado.

También se debe tener en cuenta la localización de las empresas, por ejemplo, empleados cuyos sitios de trabajo se encuentran cerca de estaciones de transporte público, utilizan mucho menos el coche que personas de otras zonas. El uso del transporte público disminuye rápidamente conforme aumenta la distancia a la estación, aumentando los viajes en coche.

La planificación de las ciudades y su diseño, la densidad y el desarrollo mixto pueden tener un efecto directo o indirecto en la necesidad de viajar, en la distancia media de los viajes y en la elección del modo de transporte. Realizando una revisión de la literatura se puede decir que:

- Una alta densidad conduce a menos viajes, reducción del consumo energético y una mayor velocidad
- Aunque se cree que la mezcla de actividades reduce el uso del coche, aún falta investigar en este tema
- La descentralización y dispersión de las zonas de empleo, aumenta el uso del coche
- El aumento en la oferta de transporte público, lleva a un aumento en su uso en comparación con el coche
- Aunque también faltan datos concluyentes, una estructura urbana policéntrica parece ser más eficiente en cuanto al consumo energético y transporte
- Cuando más grande la ciudad, más largo el viaje

Según lo anterior, la relación y el impacto entre los usos del suelo y el transporte son claros, sin embargo, el impacto del transporte sobre los usos del suelo es menos conocido.

Una de la razones de esta falta de información, puede hallarse en que los cambios en los usos del suelo ocurren muy lentamente debido a sus características propias, mientras que los cambios en los patrones de viaje lo hacen rápidamente. Según Polzin (1999) hay tres formas en que las inversiones en el transporte pueden influir sobre los usos del suelo: la mejora en la



accesibilidad, fomentar políticas complementarias y promover el desarrollo de determinados usos de una zona.

La mejora de la accesibilidad puede considerarse como el principal contribuyente a aumentar la demanda del transporte y el desarrollo potencial. Las políticas complementarias hacen referencia al papel de la inversión y planificación del transporte a la hora de incentivar otras políticas, tales como:

- Reducción de los costes del desarrollo urbano, por medio de un aumento de densidad (o índice de ocupación), reducción de los impuestos ó reducción de las plazas de aparcamiento.
- Aumento de la atraktividad por medio de inversiones en redes de transporte público, aumento en seguridad, zonas peatonales, etc.

Por último, la promoción de desarrollo consiste en que las inversiones en transporte pueden ser catalizadores para desarrollar sectores próximos a dichas infraestructuras. Esto significa que el desarrollo atrae el desarrollo.

Por último, el mayor impacto del transporte sobre los usos del suelo es mediante un cambio en la accesibilidad del sector en cuestión. Cuanto mayor sea la accesibilidad, mayor será la atraktividad de la zona, aumentando así su desarrollo. Zonas más accesibles al empleo, al comercio, a la educación y a la recreación, serán más atractivas para el desarrollo residencial; de la misma manera que zonas con mayor accesibilidad a autopistas y centros y estaciones de transporte, serán más atractivas para el desarrollo de industrias y oficinas. En los dos casos el desarrollo será mayor con su consecuente aumento de precios del suelo.

3.1.4. Modelos del Usos del Suelo y Transporte

En los años 50 nació la idea de que los modelos computacionales de usos del suelo y transporte urbano podrían contribuir a una planificación urbana más racional. Esto podría haber representado el ambicioso deseo de entender más profundamente el complejo mecanismo del desarrollo urbano y de esta manera, poder predecir y tener un mayor control sobre el desarrollo de las ciudades.

Las relaciones del transporte con otros elementos del territorio llevaron a poner dentro de un modelo los flujos de personas y mercancías, considerando los viajes y su relación con su entorno territorial, como viviendas, servicios, empleos, entre otros. Estos modelos de tipo integral de predecir las cuatro etapas del modelo clásico de transporte, son capaces de predecir los usos del suelo, la evolución de la población y de la economía en el área de estudio.

Al referirse a un sistema "integrado", se hace referencia a un sistema de retroalimentación entre el sistema de transporte y el de sistemas de usos del suelo urbano, ver Figura 2.

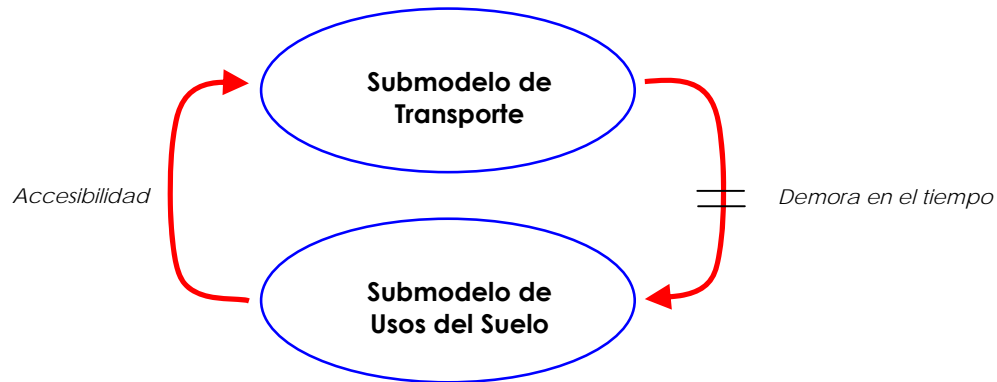


Figura 2. Diagrama Agregado de Usos del Suelo y Transporte

De acuerdo con la localización de las viviendas y de los puestos de trabajo, el sistema de usos del suelo alimenta al de transporte mediante el volumen de viajes que dichas zonas generan. El sistema de transporte representaría las infraestructuras físicas y los servicios proporcionados por los diferentes modos de transporte. El sistema de usos del suelo representa los tipos e intensidades de actividades localizadas en cada área de estudio, así como el área física de la ciudad y sus infraestructuras inherentes a dicho servicio. Los costes de los viajes entre cada par origen – destino, resultantes de la interacción entre estos dos sistemas, son necesarios para alimentar los modelos de localización residencial y de empleos. Esta interacción permite que los cambios producidos en el sistema de transporte afecten los usos del suelo, lo que a su vez retroalimenta el sistema.

Un paso más adelante en este tipo de modelos consiste en la generación de viajes basándose en las actividades, pero es necesario una información más detallada de la demografía y las características socioeconómicas, además, es necesario que los modelos predigan los impactos medioambientales de las políticas de usos del suelo y transporte aplicadas. En la actualidad, existen modelos que pueden responder gran parte de estos problemas. Los modelos varían en su nivel de sofisticación y tecnología y se están aplicando en las áreas metropolitanas con el propósito de evaluar estrategias de desarrollo urbano.

A continuación se presenta una breve descripción de algunos modelos y su evolución. Todos estos modelos se basan en la estructuración del sistema territorial que sustenta las infraestructuras, la localización de actividades y sus relaciones.

La teoría económica moderna de los usos del suelo urbano empezó con los trabajos de Wingo y Alonso en 1961. Este modelo propone el principio de



“complementariedad” entre los costes de transporte y la renta: “cualquiera que se la ubicación de un hogar, el dinero gastado en transporte y renta será el mismo”. Esta afirmación se basa en el supuesto que el territorio es homogéneo, que todos los hogares son iguales en renta y preferencias, que los empleos y servicios se concentran en el centro, que los precios de los bienes son los mismos en todo lugar excepto la renta y que el coste del transporte es una función lineal de la distancia al centro.

En 1964, la teoría de la localización de Alonso, dice que la localización residencial obedece a la maximización de la utilidad del individuo, sujeta a la restricción impuesta por su nivel de ingresos. También dice que los gastos de una persona dependerán de su localización.

Aunque estos modelos no estaban orientados a la planificación, su teoría ha conducido a modelos más innovadores. En 1960 el modelo de Herbert y Stevens fue el primero que se basó en los principios económicos aplicados a un área metropolitana real.

El modelo de Echenique en 1975 establece una estructura urbana con cuatro niveles de desagregación. El primer nivel lo forman las actividades humanas (trabajar, estudiar, comprar) y los stocks físicos (suelo con destinación a varios usos, edificios y canales de comunicación). En el segundo nivel se encuentra dos tipos de actividades: las que se desarrollan en un determinado lugar, llamadas localizadas (residir, trabajar) y las llamadas actividades de flujo (viajar) que se llevan a cabo entre lugares. En este mismo nivel, los stocks físicos se dividen en espacios adaptados (donde se desarrollan las actividades localizadas) y los canales de comunicación (donde se distribuyen los flujos). Los flujos producidos entre las actividades se pueden modelizar por medio de modelos sencillos como generación – atracción, sin embargo, para modelizar las complejas relaciones del tercer nivel, son necesarios modelos de tipo integral.

Uno de los modelos más usados en el área de integración espacial y localización de actividades, debido a su sencillez, es el modelo de metrópolis de Lowry desarrollado en 1964. Este modelo relaciona varios submodelos entre sí de forma iterativa, lo que permite modelar estructuras más complejas.

Aunque se han desarrollado diferentes versiones y expansiones de este modelo, Garin en 1966 mejoró este modelo en varios aspectos. Garin demostró que las relaciones entre empleo y residencia y entre residencia y servicios, son flujos de transporte, cuantificando dichos flujos. Este es un modelo operacional que logra reproducir distribuciones espaciales observadas de las distintas actividades y analizar los impactos de los cambios regionales.

A su vez, este modelo fue mejorado por Echenique en 1975 cuando desarrolló su modelo MEP (de stocks y actividades), el cual incluye un proceso de localización de stocks y se permite la desagregación de la población por su



nivel económico y sus modos de viajes. La última versión de este modelo se conoce como MEPLAN y se usa en la actualidad. Se caracteriza principalmente por:

- El transporte es una demanda derivada de las interacciones económicas entre las actividades.
- El transporte ejerce una influencia sobre la localización de actividades. De esta manera, los cambios en el transporte hacen que los lugares sean más accesibles, aumentando así la demanda de productos, servicios y trabajos producidos en dichos lugares.
- Los usos del suelo y el transporte son tratados como mercados donde la interacción entre la oferta y la demanda establece el precio del transporte y del suelo.

En 1997 se desarrolló una aplicación de MEPLAN en la Comunidad de Madrid, conocido como MECAM. Este modelo ha servido de herramienta de análisis económico y planificación territorial en varios estudios en Madrid, destacando las nuevas autopistas de peaje y el Plan Regional de Estrategia Territorial de la Comunidad de Madrid.

En general, todos los modelos integrales requieren algún nivel de agregación de las principales variables: grupos socioeconómicos, tipos de edificaciones, zonificación del área de estudio, tipos de actividades, periodos de tiempo, entre otros. Uno de los problemas de la modelización es cómo agregar la compleja información asociada con el patrón de viajes, teniendo en cuenta para cada viaje el beneficio de la interacción de las actividades en el destino y su coste final. La simplificación más generalizada es reducir a un único tipo de viaje, por ejemplo el viaje al trabajo.

Los modelos actuales incorporan los procesos más importantes del desarrollo espacial, incluyendo transporte y usos del suelo. Muchos de los submodelos de transporte no aplican técnicas avanzadas de modelización basadas en actividades, sino que utilizan el método tradicional del modelo de cuatro etapas, el cual no es muy conveniente para la modelización del comportamiento derivado de las diferentes políticas de gestión de la demanda usadas en la actualidad. Por otro lado, la resolución espacial de los modelos actuales es muy rudimentaria para modelizar las políticas y sus efectos a un nivel detallado.

3.1.5. Formulación del Sistema Dinámico de Usos del Suelo y Transporte

La justificación del uso de una plataforma de sistemas dinámicos para el caso de la modelización del transporte viene por el hecho de asumir, en primer lugar, la interacción entre ambos sistemas (transporte y territorio) expuesta en los



apartados anteriores. La interacción entre los usos del suelo y el transporte tiene implicaciones que solo pueden percibirse a largo plazo, lo cual hace que en un escenario temporal un concepto no pueda tenerse en cuenta sin el otro. Es decir, que es necesario una determinada accesibilidad para la generación de una actividad en un espacio dado, pero al mismo tiempo, un incremento de la accesibilidad crea una mayor atracción en la localización de actividades en dicha zona. Sin una conceptualización de esta interacción, nuestra visión quedaría estática, por tanto se asume que existe una interacción entre ambos sistemas.

Sin embargo, esa interacción tiene diferentes velocidades de cambio. Esto quiere decir que mientras el cambio en la configuración de los usos del suelo o en la red de infraestructuras de transporte es relativamente lento, éstos producen transformaciones en la localización de actividades algo más rápidas y a su vez, esta relocalización induce a cambios en las pautas de movilidad mucho más rápidas. En definitiva, las velocidades de cambio de un sistema y otro son diferentes. La velocidad de cambio del sistema de transporte, por lo menos en cuanto a la demanda se refiere, es rápida, mientras que la velocidad de relocalización de actividades derivadas de un cambio en las infraestructuras u oferta de transporte es mucho más lenta. Estas diferencias de velocidades de cambio es el principal argumento para el uso de sistemas dinámicos.

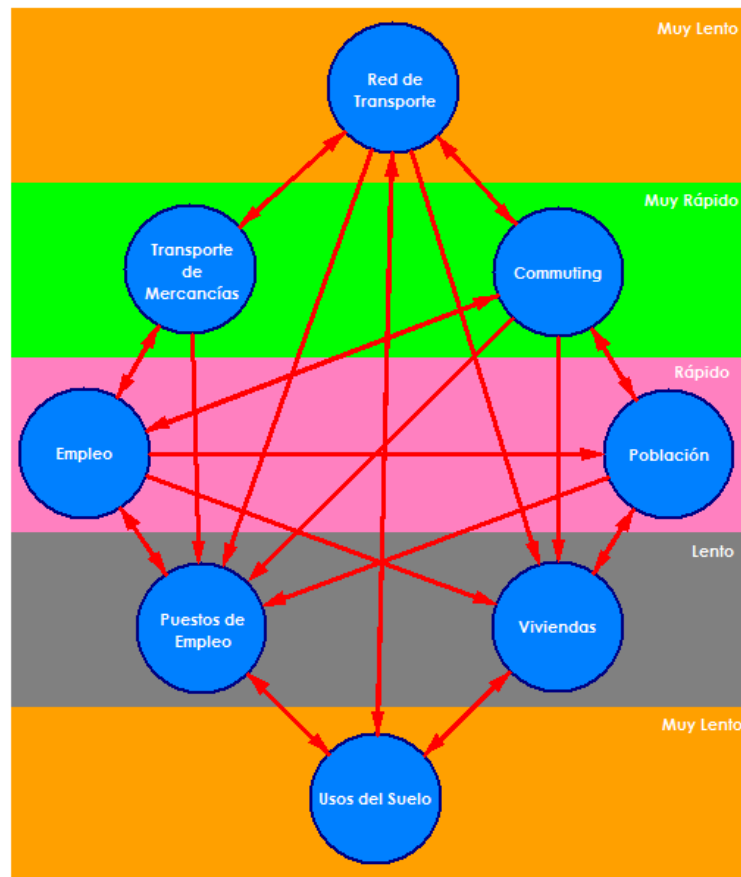


Figura 3. Ritmo de Cambios en el Sistema Usos del Suelo y Transporte
Fuente: Wegener, 1995

3.2. El Modelo MARS

MARS, es un rápido modelo de interacción entre el uso del suelo y el transporte que trabaja con un nivel de agregación importante. Este modelo incluye ciclos de retroalimentación entre los submodelos de transporte y usos de suelo. También incluye los más importantes modos de transporte. Una gran ventaja de este modelo en la actualidad es que trabaja bajo un software de sistemas dinámicos conocido como Vensim® lo que lo hace transparente y bajo una programación orientada a objetos que facilita su desarrollo y comprensión. Es importante aclarar que MARS no es un modelo de equilibrio.

El principio básico con el que trabaja el modelo consiste en que la población y las actividades son sistemas "auto organizables". MARS consta de dos submodelos: el de transporte y el de usos del suelo. Estas dos partes están relacionadas por un intervalo de tiempo lo que permite que cada submodelo

trabaje en dos escalas de tiempo diferentes. Esto significa que al haber cambios en el sistema de transporte, éstos tendrán un impacto sobre el sistema de usos del suelo después de un periodo de tiempo t ; a su vez, si hay cambios en el sistema de usos del suelo, estos causarán reacciones inmediatas en el sistema de transporte. El modelo de usos del suelo está conformado por un modelo de desarrollo y localización residencial y de sitios de empleo, también existe un modelo de consumo energético y de emisiones. Todos estos modelos están conectados entre sí y su interacción se muestra en la Figura 4.

El modelo de transporte está conformado por viajes de *commuting* y por los que no lo son, incluyendo modos no mecanizados. Los modelos de consumo energético y emisiones son dependientes de la velocidad. El modelo de usos del suelo considera criterios de localización residencial y de empleo, tales como la accesibilidad, el suelo disponible, el precio y la cantidad de zonas verdes.

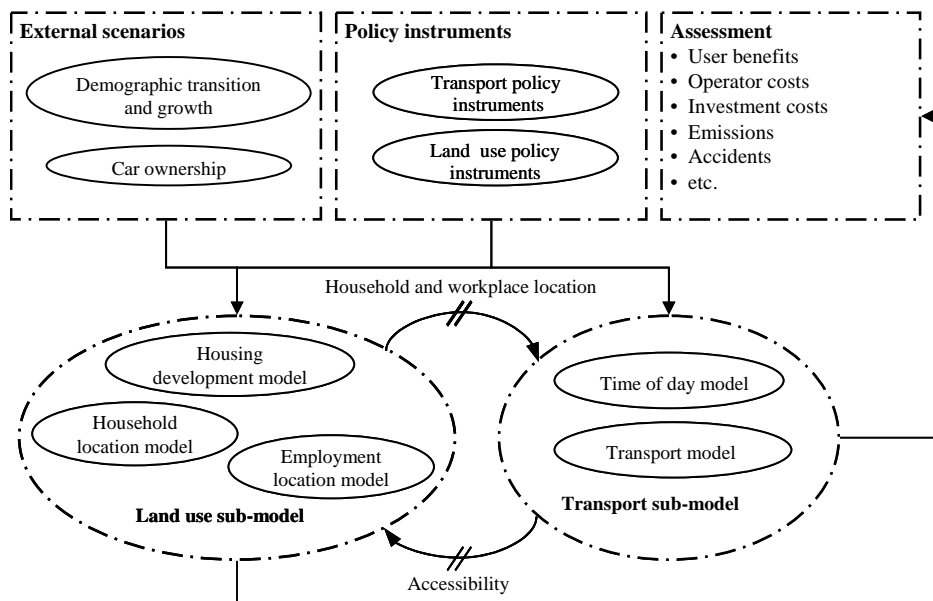


Figura 4. Estructura Básica de los Submodelos de MARS (Pfaffenbichler, 2003)

El concepto sobre el que se basa el modelo MARS, Diagramas de Flujo Causales o (Casual Loop Diagrams, CLD) es la base de la definición y explicación de las relaciones causa-efecto de las variables del modelo. Así, por ejemplo, en la Figura 5, se muestra parte del modelo de transporte en el que se pueden ver las variables que afectan al número de viajes en vehículo privado, generándose diferentes ciclos o bucles. Un bucle negativo (B1) indica que la generación de viajes en coche está vinculado con la atractividad de la zona para ir en coche, que a su vez depende del tiempo de búsqueda de aparcamiento en cada zona, el cual a su vez depende así mismo de la demanda existente en la zona. Este bucle negativo es un bucle de naturaleza equilibradora. El bucle B2



representa el efecto de la congestión y su influencia sobre la velocidad. El Bucle B3 actúa sobre el coste del desplazamiento. Estos bucles siguen teniendo una naturaleza que hace tender al sistema al equilibrio. Pero el bucle B4 sin embargo es de naturaleza desestabilizadora, puesto que el mayor uso del coche, aumentan la congestión también para otros modos de transporte que comparten vía con éste de tal forma que repercute en una desutilidad de los modos alternativos, y por tanto una mayor atractividad del coche, lo que a su vez causa un mayor uso del mismo. Relaciones CLD similares se han desarrollado para los diferentes subsistemas del modelo. Su simplicidad y familiaridad de uso han sido elementos importantes de cara a establecer un modelo transparente y escalable.

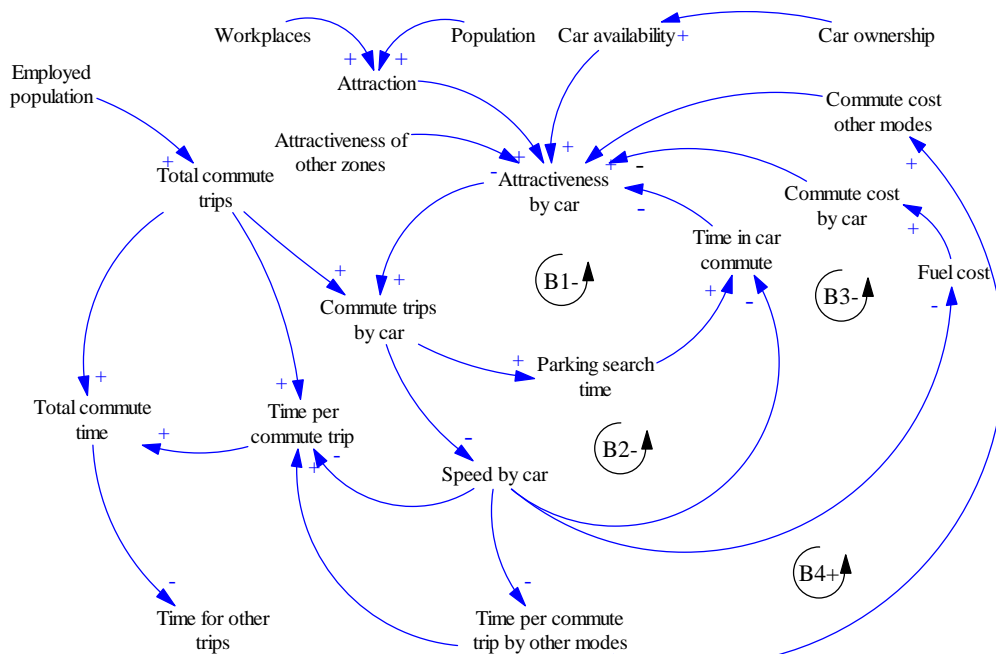


Figura 5. CLD del Modelo de Transporte – Viajes “commuting” en Coche en MARS

3.2.1. Características Principales del Modelo

La hipótesis principal de MARS es que la movilidad es sólo un medio de satisfacer unas necesidades, pero no es una necesidad en sí misma. Adicionalmente supone que la gente tiene un presupuesto de tiempo de viaje disponible para gastar en desplazarse, ya que estudios empíricos han demostrado que el tiempo destinado a viajar permanece constante a lo largo del tiempo y entre zonas. Bajo estos conceptos, el modelo trabaja además con los siguientes parámetros:

- MARS trabaja con dos grupos de personas: personas en hogares con y sin coche.



- Hay dos tipos de viajes: trabajo (commuting) y otros (resto de viajes).
- Tres o cuatro modos de transporte: "slow"¹, transporte público y coche; "slow", transporte público, coche y motos; "slow", bus, "rail"² y coche.
- El número de viajes totales de trabajo se distribuye por zonas y por modos de transporte.
- El tiempo empleado en los viajes de trabajo se extrae del presupuesto de viaje. El tiempo restante, MARS supone que queda libre para realizar el resto de actividades.

Como ya se mencionó, el modelo de transporte está conformado por viajes de commuting y por los que no lo son, incluyendo modos no mecanizados. Los modelos de consumo energético y emisiones son dependientes de la velocidad. El modelo de usos del suelo considera criterios de localización residencial y de empleo, tales como la accesibilidad, el suelo disponible, el precio y la cantidad de zonas verdes.

MARS permite la aplicación de diversas estrategias. Las estrategias pueden ser medidas o instrumentos políticos que se espera que tengan un significativo impacto sobre los indicadores u objetivos, o bien en un área importante de la ciudad.

Con el fin de implementar los escenarios anteriormente mencionados en el modelo, los valores del precio y la composición de la flota vehicular son variables exógenas. Estas variables han sido obtenidas utilizando los resultados del modelo del mercado mundial energético POLES (POLES, 2000) y de un modelo de transporte europeo ASTRA (ASTRA, 1999).

Para conocer más en detalle el funcionamiento y composición del modelo, así como su proceso y resultados de calibración, ver Anexo II. El Modelo MARS.

¹ MARS trabaja los peatones y las bicicletas de forma agregada bajo este modo.

² Bus se refiere a un sistema de transporte público de vías compartidas con el tráfico normal y "rail" es un sistema con plataforma reservada, por ejemplo, el metro y el bus VAO (carriles de alta ocupación).



4. POLÍTICAS Y ESCENARIOS ASUMIDOS

La política de implementar impuestos a los combustibles inicialmente no se concibió con fines ambientales, aunque sus consecuencias claramente si lo son. Históricamente, las externalidades han jugado un papel pequeño como motivación para los impuestos a los combustibles Parry and Small (2005)). Sin embargo, en la actualidad esta política puede jugar un papel mucho más relevante en la configuración de las políticas de movilidad sostenible, pese a posibles barreras políticas o electoralistas que pueden existir (Hammar et al. (2004)).

MARS permite la aplicación de diversas estrategias, así como la optimización de las mismas bajo un método simplex. Las estrategias pueden ser medidas o instrumentos políticos que se espera que tengan un significativo impacto sobre los indicadores u objetivos, o bien en un área importante de la ciudad.

En este caso en particular, se realizó una aplicación del modelo en la Comunidad de Madrid con el fin de evaluar escenarios con diferentes precios del combustible y sus impuestos. En estos escenarios se trató de determinar el impacto que el precio final del combustible tendría sobre el uso del coche y sobre sus emisiones.

Los impuestos sobre el combustible, como media, son mucho más altos en Europa que en Estados Unidos. Esta puede ser una de las razones que explica el mayor consumo energético y la mayor dependencia del coche en ese país. El consumo medio per cápita en Estados Unidos es aproximadamente de 1.300 l, mientras que la mayoría de países europeos utilizan menos de una tercera parte.

Combinando diferentes políticas y coyunturas de precios e impuestos del combustible, se crearon diferentes escenarios a evaluar con diferentes valores de precio e impuesto hasta el año 2030. Desde el punto de vista de disponibilidad energética, se crearon dos escenarios diferentes:

- Escenario A. Considerado como un escenario "optimista", consiste en los bajos precios del petróleo a lo largo del periodo de evaluación del modelo.
- Escenario B. Este escenario es considerado como "pesimista", en donde el petróleo escasea y su precio es alto.

De la misma manera, en cuanto a la demanda energética se tienen en cuenta otros dos grupos de evaluación:

- Estrategia 1. Esta estrategia se centra en un mejoramiento tecnológico del parque vehicular.



- Estrategia 2. Aquí, se tendrá en cuenta una política de implementación de impuestos sobre el combustible.

De forma complementaria y con el fin de explorar una política óptima de impuestos bajo diferentes supuestos (no solamente bajo los escenarios de demanda energética y mejora tecnológica), como la de medidas de gestión de la demanda, se propone una política integrada con medidas de gestión con el fin de buscar una estrategia balanceada teniendo como objetivo las metas planteadas en el protocolo de Kioto (escenario 3, medidas de gestión de la demanda, GD).

De esta manera, en la Tabla 1 se muestran los diferentes escenarios a evaluar utilizando el modelo MARS.

		Demanda Energética			
		Normal	Mejora Tecnológica	Regulación por Impuestos	Gestión Demanda
Disponibilidad Energética	Precios Bajos	A0	A1	A2	A3
	Precios Altos	B0	B1	B2	B3

Tabla 1. Escenarios Finales a Evaluar

Los escenarios de regulación vía impuestos, se asumieron teniendo en cuenta varias suposiciones. Debido a que no hay objetivos específicos en el sector transporte en cuanto a la reducción de emisiones de efecto invernadero, en este caso se asumieron algunas hipótesis con el fin de evaluar la viabilidad de este instrumento impositivo con el fin de tratar de acercarse a los compromisos adquiridos en el Protocolo de Kioto.

De esta manera, cada escenario tiene una política de impuestos sobre el combustible diferente, un precio base diferente y una flota vehicular también diferente (según los resultados del proyecto ASTRA-POLES), a lo largo de todo el periodo de evaluación.

El resumen de los escenarios propuestos se puede ver en la Tabla 2, el cual está basado en los resultados del proyecto STEP's. La flota vehicular fue construida con base en los resultados del modelo ASTRA utilizado en los escenarios STEP's.



Precio del Petróleo (cambio anual en %)		Escenario A	Escenario B
Precios Combustible	Gasolina/litro	+1.0% /	+4.0%
	Diesel / litro	+1.0% /	+4.0%
	Eléctrico/unidad	+0.0%	+0.0%
	Gas natural/unidad	+1.0%	+4.0%
	Híbrido/unidad	+1.0%/	+4.0%
	Hidrógeno/unidad	+1.0%	+1.0%
Subsistema Energía Transporte (cambio anual en %)		Escenario 1	Escenario 2
Mejora eficiencia de consumo	Consumo/Gas. coche	- 0,5%	- 2,0%
	Consumo/Diesel coche	- 1,0%	- 3,0%
Tecnología alt.	Factores de emisión	- 8,1%	- 16,0%
Flota Vehicular (crecimiento/participación)	Convencional (gas/ dsl)	-1% / 72%	-2,1% / 55%
	Híbridos	+12,5% / 15%/	+13,5% / 20%
	Gas natural	+10% / 10%	+2% / 15%
	Eléctricos	+3% / 1%	+7% / 5%
	Hidrógeno	+3% / 2%	7,8% / 5%
Plan de Transporte (Cambio final en %)		Escenario 3	
Accesibilidad TP	Tiempo acceso (min)	-30%	
Frecuencia TP	Tiempo espera (min)	+20%	
Tarifas TP	€	-50%	
Velocidad TP (carriles exclusivos...)	Tiempo recorrido (min)	+25	
Traffic Calming	Velocidad media	-10%	
Conexión intermodal	Tiempo transbordo	-15%	
Tarifas parking (almendra)	Corta duración (€)	> 5€	
	Larga duración (€)	> 12€	

Tabla 2. Especificación de Escenarios Base

Para el desarrollo de los diferentes escenarios, se hicieron varios supuestos. En lo referente a la política del cambio climático, se asumió que todos los países cumplen con sus metas individuales pactadas en Kioto de conformidad con el "Burden Sharing Agreement" en cuanto a los objetivos expresados en términos de emisiones de CO₂. En el caso español, el compromiso fue no sobrepasar el 15% de emisiones en 2004 respecto a 1990. Sin embargo y como ya se mencionó, no existen objetivos específicos de emisiones de CO₂ para el sector transporte y menos aún para una región, como en el caso de Madrid. El papel del transporte para reducir la emisión de gases de efecto invernadero debe ser determinado al igual que sus metas de reducción de emisiones.

Con el fin de determinar la contribución futura del transporte en las emisiones, se decidió usar la contribución media del transporte en emisiones de carbono en un contexto limitado. En el caso de España, en los sectores difusos (donde el transporte se encuentra), las proyecciones dicen que para el año 2012 las emisiones aumentarán cerca del 65% con respecto a los niveles de 1990, mientras que en otros sectores (como energía e industria), las proyecciones hablan de un incremento del 37%. Los sectores difusos son responsables de aproximadamente el 46-49% de las emisiones de gases de efecto invernadero, y el transporte, dentro de este sector, contribuyó con cerca del 42% de estas emisiones en 1990 y con 49% en 2004 (lo que implica un 24% del total de gases efecto invernadero en 2004, Real Decreto 1370/2006). Teniendo en cuenta que el transporte no podrá seguir con la curva de cumplimiento de reducciones de



emisiones que otros sectores sí podrán realizar en los próximos años, se propone una reducción de emisiones un poco menos exigente. Sin embargo, es necesario que aunque los objetivos son menos exigentes, aún es necesario una reducción significativa de los actuales niveles de emisión. En este caso en particular el nivel para las emisiones objetivo de CO₂ son: 2012, +71%; 2020, +61% y en 2030, +35%.

De manera más clara, en la Tabla 3 se muestran las diferentes tasas de crecimiento asumidas del precio e impuestos del combustible según su tipo. La diferencia entre los escenarios A/B0 y A/B1 es que los primeros incluyen un cambio tecnológico en su flota vehicular, lo que la hace menos contaminante.

Tipo Combustible	Tasas Precio Base						Tasas Impuestos					
	A0	B0	A1	B1	A2	B2	A0	B0	A1	B1	A2	B2
Diesel	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	1.5%	1.5%	1.5%	1.5%	4.7%	4.7%
Gasolina	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	4.7%	4.7%
Eléctrico	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Gas	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%
Híbridos	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	1.0%	4.0%	0.7%	0.7%	0.7%	0.7%	4.7%	4.7%
Hidrógeno	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Tabla 3. Tasas de Crecimiento del Precio e Impuestos Según el Tipo de Combustible

La región de Madrid es la mayor zona urbana de España y la tercera de Europa después de Londres y París. La demanda de viajes en Madrid crece continuamente. De acuerdo con la última encuesta de movilidad realizada (EDM04), el número de viajes en un día laborable normal es un poco más de 14 millones, lo que significa un crecimiento de más del 40% con respecto a la encuesta domiciliaria de 1996. Una explicación de este importante incremento de los viajes en la región es el aumento de la población, aunque no es la única, ya que por ejemplo, los viajes por persona al día también han aumentado cerca de 20%, pasando de 2,16 en 1996 a 2,60 viajes en 2004.

La importancia del centro de Madrid ha venido perdiendo relevancia a favor de las zonas periféricas, en un claro proceso de dispersión: el municipio de Madrid aumentó su población en 1,9 veces en la segunda mitad del siglo pasado, mientras que en la periferia, la población aumentó en 26,1 veces. Esta suburbanización genera una mayor dependencia del coche.

Existen varias referencias en la literatura que hablan acerca de la búsqueda de un nivel óptimo de impuestos con el fin de reducir emisiones y alcanzar un bienestar macroeconómico (Nordhaus (1991), Dean and Hoeller (1992)). Azar and Schneider (2002), Weber et al. (2005), Kunsch and Springael (2008), Piattelli, et al (2002)). Este estudio no busca tanto el determinar el óptimo sino el evaluar la efectividad de esta medida a largo plazo. Para ello se ha utilizado una aproximación por medio de sistemas dinámicos que tiene en cuenta la interacción dinámica de los sistemas de transporte con los usos del suelo. Esta



interacción es modelada usando sistemas retro-alimentados entre los subsistemas de transporte y usos del suelo a lo largo de un periodo de 30 años.

4.1. Estrategia Dentro del Modelo

Para implementar la estrategia planteada en este documento, en la Figura 6 se muestra el CLD (Casual Loop Diagrams) del cálculo de la fricción o impedancia del coche dentro del modelo MARS. Las variables marcadas "fuel duty" y "fuel resource cost" son variables exógenas al modelo y varían según los escenarios y valores de la Tabla 1 y Tabla 3, respectivamente. De esta manera según cada escenario, estas variables cambian y su efecto será diferente dentro de los resultados finales.

Estas variables tendrán un impacto directo dentro de la fricción del coche "f car ij". A su vez, esta fricción es utilizada por el modelo por medio de la Ecuación 6, para estimar el número de viajes atraídos y generados por cada zona según la fricción de cada modo y la atractividad de cada zona (ver numeral 7). De esta manera, al variar la fricción del coche, variará la distribución de viajes que el modelo hace por cada zona.

Friction factor car

Policy Input is marked in light blue.

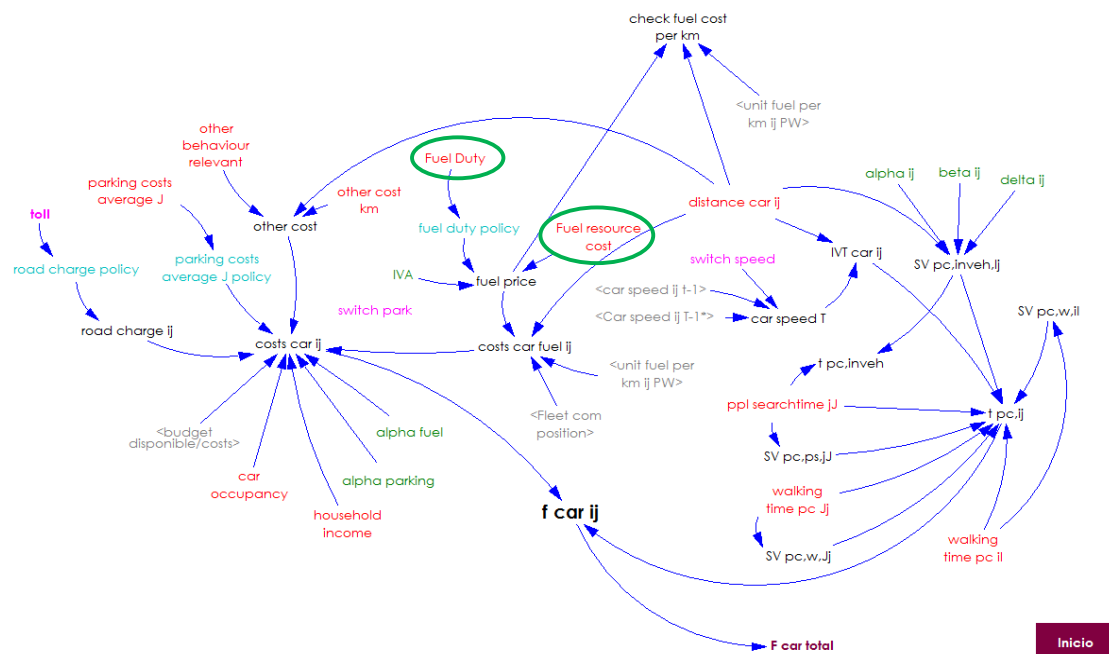


Figura 6. CLD del Factor de Fricción del Coche – Modelo de Transporte, MARS (Pfaffenbichler, 2003)



5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados presentados aquí, son un resumen de los resultados obtenidos a través del modelo MARS. Por medio de este modelo, no solamente se ha tratado de estudiar la implementación de una política impositiva sobre los combustibles como una política de transporte y de analizar su impacto sobre la reducción de emisiones de CO₂, sino también de estudiar el cambio a largo plazo de las pautas de movilidad y localización de actividades. En la Figura 7 se muestran los resultados de las emisiones totales de CO₂ para la ciudad de Madrid para los diferentes escenarios.

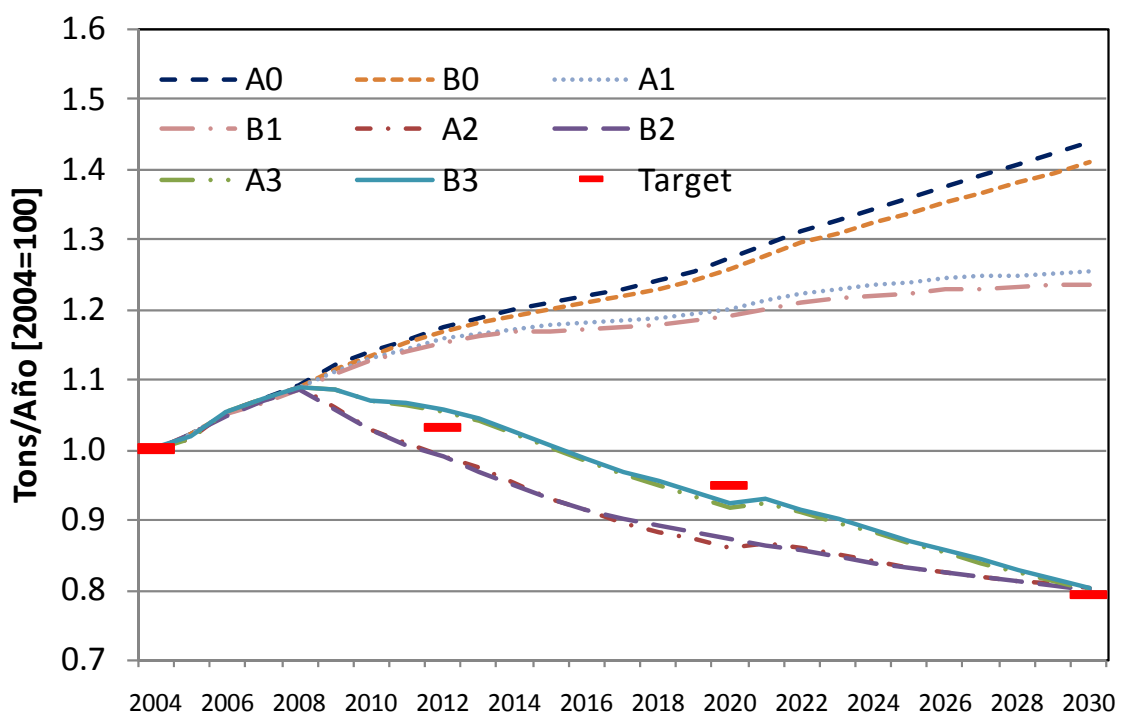


Figura 7. Emisiones de CO₂ en Madrid

Según los resultados anteriores, claramente es notorio que las mejoras tecnológicas (Escenarios tipo 1) generan un ahorro importante en emisiones y su impacto es mucho mayor en los escenarios de precios altos del combustible (B1). El efecto de los altos precios del combustible en el uso del coche en los escenarios B refuerza esta tendencia. Sin embargo, induce a una mayor movilidad en cuanto a viajes en coche y distancia media (escenarios 1).

Una vez el objetivo de CO₂ es determinado, se desarrolla un proceso de optimización con el fin de estimar las tasas a los combustibles necesarias para alcanzarlo (escenarios A3/B3). El nivel de los impuestos en los diferentes escenarios necesita de un crecimiento medio anual de entre 18 y 20% con el fin



de poder cumplir con los objetivos propuestos de emisiones de CO₂. Estas tasas tan altas son inviables económicamente, socialmente aceptables y políticamente muy impopulares, aunque beneficiosas con el medio ambiente. Sin embargo, lo que realmente estos resultados significan el profundo e importante cambio de dirección en las políticas de nuestras ciudades con el fin de llegar a tener sistemas de transporte `sostenibles` y segundo, que una estrategia de movilidad sostenible no puede basarse solamente en una medida aislada.

La distribución modal, se puede ver en la Figura 8. Este indicador es una compleja interacción entre la estructura urbana, densidad, el trazado de la ciudad, ingreso de los hogares, localización y la oferta de transporte, entre otros elementos. La interacción entre el transporte y el territorio se puede observar en este punto, donde un cambio en un coste de transporte puede causar un cambio en la estructura urbana.

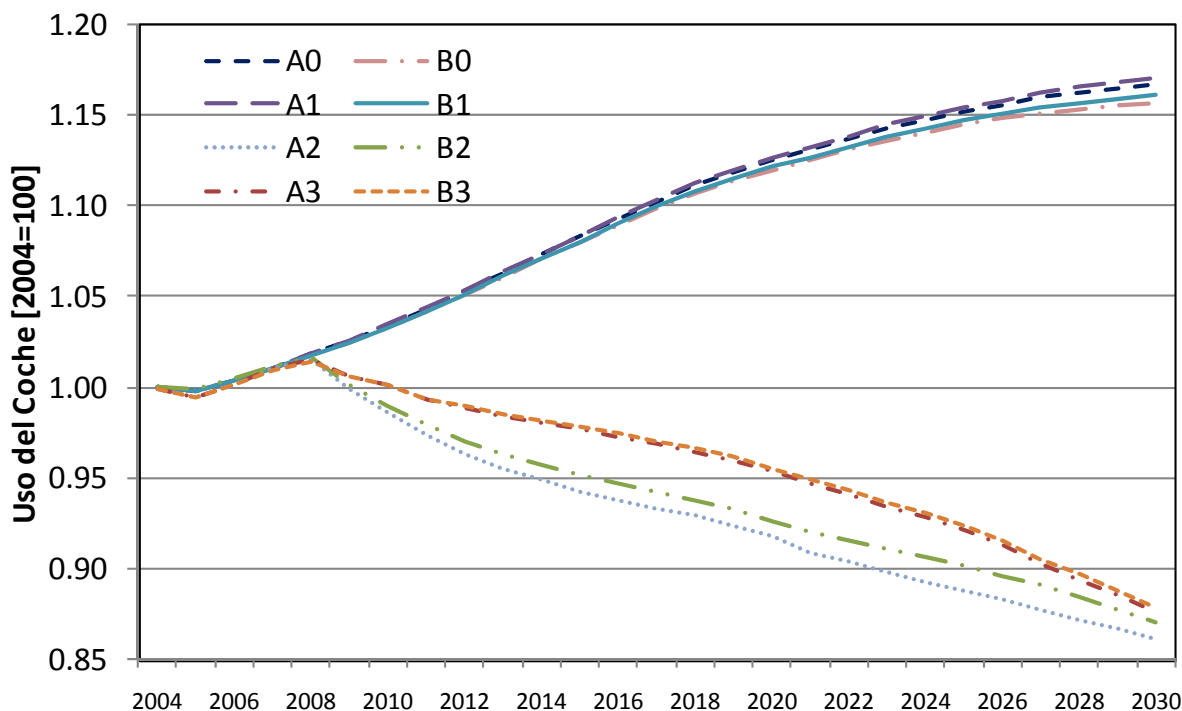


Figura 8. Uso del Coche en Madrid

Como se esperaba, el impacto en la distribución modal puede ser visto casi que por pares de escenarios. Según los resultados de la figura anterior, se observa que en los escenarios donde el coste del combustible es mucho mayor, el crecimiento en el uso del coche va creciendo lentamente con el tiempo, hasta que empieza a decrecer rápidamente.



La regulación de la demanda en los escenarios A2-B2 tiene un gran impacto sobre el uso del coche debido al aumento de los costes del combustible para el usuario. De forma similar, los escenarios A0-A1 y B0-B1 apenas sufren modificaciones, tal como se esperaba, ya que las mejoras tecnológicas no impactan lo suficiente o restringen el uso del vehículo privado. En cualquier caso mejoran los resultados de emisiones debido a la mayor eficiencia en el consumo de combustible.

En lo referente a los escenarios tipo 3 (optimización), también se agrupan sobre la misma línea de tendencia. Es obvia la manera en que el uso del coche cae en estos escenarios, ya que su nivel de impuestos es bastante alto. En Madrid, el uso del coche presenta un crecimiento continuo en los escenarios donde no se toman medidas importantes.

Otro aspecto importante es el cambio de tendencia para un determinado nivel impositivo que se alcance en el largo plazo y que hace que pese a que las distancias medias no hayan disminuido, el uso del transporte público aumenta significativamente. Este hecho puede ser fruto de una reorganización especial producida a largo plazo y merecería un estudio mucho más detallado.

Aunque es claro que la mejora tecnológica en el parque vehicular ayuda considerablemente a la disminución de emisiones, su efecto sobre la reducción del uso del coche no es muy significativo. En este caso, los resultados indican que una estrategia sobre la demanda de viajes como el impuesto al combustible, puede reducir la dependencia del coche, aunque sus efectos no se verían sino a largo plazo.

Desde el punto de vista ambiental, en los escenarios A2/B2, el alto coste del uso del coche parece ser una solución parcial para la alta dependencia del coche y para el cambio de comportamiento de los usuarios, pero es necesario ser muy cuidadosos en el diseño de una estrategia conjunta en coherencia con otras medidas, con el fin de llegar a un nivel óptimo de costes de explotación.

En cuando a la distancia media de recorrido, como se ve en la Figura 9, puede ser un indicador que puede ser visto como una medida de la estructura urbana y una respuesta de los viajeros en su búsqueda diaria de satisfacer sus necesidades. Al igual que en la figura anterior, en este caso parece que los resultados también se agrupan por pares.

Bajo el supuesto que un viajero trata de maximizar la utilidad de su viaje, es decir, minimiza sus costes de tiempo y dinero, al minimizar la distancia recorrida, esto generará diferentes impactos. En los escenarios de precios altos del combustible (A2 y B2), se presenta un menor crecimiento de la distancia media de viaje que en el resto de escenarios, sin embargo, esto no impide que dicho valor siga disminuya a largo plazo, contribuyendo a su vez la dispersión urbana, como mucho, en los escenarios más impositivos, las distancias muestran la



tendencia de volver a sus valores iniciales o si acaso (A3/B3) disminuir un 1 o 2% como máximo.

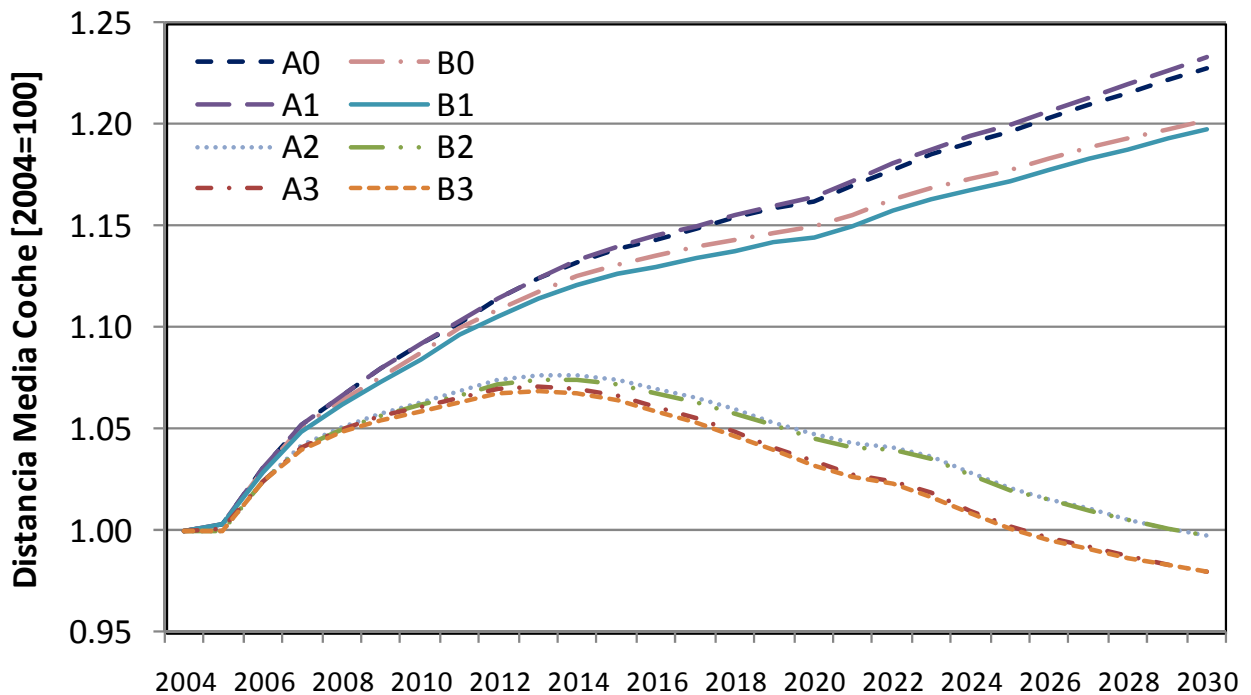


Figura 9. Distancia Media de Viaje

El tiempo ahorrado por el aumento de las velocidades medias de recorrido, producen un cambio en la movilidad, induciendo a la realización de más viajes. Sin embargo, el uso del coche disminuye en estos escenarios, lo que sugiere estas medidas afectan de una manera diferente a los usuarios según variables como el ingreso medio, por ejemplo, lo que podría llevar a fracasar estas medidas debido a lo inequitativo de dichas actuaciones.

En general, las distancias medias de recorrido aumentan tanto en coche como en transporte público. Esto puede deberse al desarrollo de zonas periféricas y al incremento del uso del coche. En el escenario A0 se observa un pequeño impacto sobre las distancias recorridas en coche, siendo ligeramente menores que en el escenario A1. Los escenarios de mejoras tecnológicas también tienen un pequeño impacto, pero muestran una leve tendencia a aumentar las distancias medias dadas su mejora de eficiencia de consumo energético.

Como era de esperarse, la regulación de la demanda en los escenarios A2-B2 tiene un gran impacto en esta variable, aunque no la reducen, por lo menos limitan su crecimiento y tienden a dejarlas igual que los valores iniciales.



En resumen, inicialmente el objetivo de la aplicación a Madrid del modelo MARS fue conocer cómo un modelo que relaciona los usos del suelo y sistemas de transporte, puede evaluar el impacto de la implementación de medidas de "pricing", en orden de determinar la contribución al cambio climático y la dispersión urbana del sistema de transporte de Madrid, bajo diferentes escenarios de mejoras tecnológicas y precios del combustible.

Los resultados obtenidos sugieren que desde el punto de vista de consumo energético y medio ambiente, la situación mejora cuando los precios aumentan, en todos los casos. La implementación de impuestos adicionales al combustible es una importante contribución para reducir la contaminación, así que si en el futuro este tipo de medidas no son tenidas en cuenta, es seguro que las emisiones producidas por los vehículos seguirán en un aumento constante. Este tipo de impuestos restringen el crecimiento de la demanda de combustibles fósiles, asociados directamente a las emisiones de carbono. Hasta que no se desarrolle en la práctica un sistema de energía más limpia, estas medidas deben jugar un papel importante en el transporte.

Lo que es claro es que el coste del uso del coche está subvalorado por parte de los usuarios, debido a externalidades que ellos no perciben directamente, como la congestión, la contaminación y el ruido, entre otras.

Existe una interacción muy cercana entre la demanda de viajes, el sistema de oferta de transporte y la estructura urbana, que hace que el uso del coche y los patrones de viaje se vean afectados por:

- Localización residencial
- Características sociales, demográficas y culturales respecto al uso del coche
- Características espaciales (tamaño de la ciudad, geografía, sistema de transporte, usos del suelo)

El objetivo principal de este documento era tener un primer acercamiento para estimar el impacto de la implementación de medidas regulatorias y fiscales sobre los combustibles, por medio de un modelo que relacione el transporte con el territorio, con el fin de determinar su efectividad bajo diferentes escenarios (análisis directo sobre un menor uso del coche menos eficiente = reducción de CO₂ y consumo energético, pero también desde la perspectiva de su impacto en las pautas de movilidad y relocalización de actividades a largo plazo). Otro objetivo paralelo era estudiar el modelo MARS, su funcionamiento y composición con el fin de adaptarlo a las condiciones de la Comunidad de Madrid.

Los resultados sugieren que desde un punto de vista de energía y medio ambiental, la situación de las ciudades mejora al incrementar los precios de los



combustibles. Los impuestos a los combustibles contribuyen a la protección del medio ambiente y si fuesen eliminados o reducidos en el futuro, las emisiones de contaminantes aumentarán con toda seguridad. Según los resultados obtenidos, se puede decir que:

- Los escenarios de regulación de precios y de mejoras tecnológicas pueden jugar un importante papel en la reducción de las externalidades.
- La regulación de la demanda reduce las externalidades asociadas a la congestión. No ocurre de la misma forma con las estrategias de desarrollo tecnológico.
- La interiorización de los costes que origina cada modo de transporte (por congestión, ambientales, otras externalidades) fomenta a largo plazo estructuras espaciales y territoriales no basadas en el vehículo privado.

Desde el punto de vista de movilidad, los resultados muestran que al incrementar los costes del uso del vehículo privado, reduce la probabilidad de hacer viajes tipo *commuting* en coche e impulsan a estos usuarios a un cambio en sus comportamientos de viaje (modos alternativos, longitudes de recorrido).

Por tanto, en términos de recomendaciones, se puede decir que tanto la regulación de precios y las innovaciones en tecnología, son importantes para reducir las emisiones de CO₂ en el transporte, pero solo la primera medida puede usarse para reducir la congestión asociada a las externalidades.

Por otro lado, al cruzar y comparar diferentes escenarios, se observa que en el resultado final influyen otras variables como la estructura urbana, la oferta de transporte, variables socioeconómicas, entre otras. Esto significa que la efectividad de una política europea, como por ejemplo, elevar el nivel mínimo de impuestos europeos a la energía (Directive 2003/96/EC), puede tener diferentes impactos regionales que se deben estudiar con mayor profundidad.

El debate acerca de cuál política es el instrumento más apropiado para ahorrar energía y reducir las emisiones de CO₂: la modificación de precios al combustible o el aumento de los impuestos, puede que no sea el enfoque correcto, ya que las dos son necesarias y complementarias. Sin embargo queda mucho espacio para debatir el alcance de cada una de ellas.

Con el fin de aumentar el beneficio ambiental de las políticas fiscales asociadas a los combustibles, se ideó una nueva política de impuestos que tenga como objetivo alcanzar un mínimo de emisiones de CO₂. Es evidente que el objetivo trazado en este documento representa un gran esfuerzo y requeriría en los años venideros, profundos cambios tanto en los modos actuales de transporte como en la forma en que el transporte es percibido y utilizado por personas y organizaciones (movilidad y comportamiento).



La evidencia de la efectividad de las medidas de *pricing* utilizadas en este estudio, como una política de transporte ambiental, es clara ya que se observan claramente los descensos en los niveles de emisiones de CO₂. Sin embargo, alcanzar estos niveles es económica, social y políticamente inviable debido a los altos costes y su rápido crecimiento. La efectividad de una medida mejora cuando hace parte de una estrategia conjunta.

Finalmente, las estrategias encaminadas a obtener una movilidad sostenible no pueden ser implementadas como acciones individuales: los resultados de los escenarios A3/B3 confirman esta afirmación ampliamente conocida. Con el fin de lograr mejoras en la eficiencia energética, en la reducción de emisiones de CO₂, en la reducción congestión y emisiones de contaminantes atmosféricos, un paquete de medidas conjuntas, coherentes y complementarias es necesaria.

Una sola medida seguramente no podrá alcanzar objetivos de sostenibilidad para la movilidad urbana. De esta manera, es necesario investigar mucho más a fondo, de tal manera que se evalúen muchas medidas, actuaciones y escenarios diferentes con el fin de encontrar una combinación óptima que lleve a la implementación de políticas que verdaderamente lleven a la sostenibilidad de las ciudades.

De esta manera, y ya que el transporte es un sector multifacético y un poco disperso, una futura línea de investigación es trabajar en crear, desarrollar e implementar una función objetivo que abarque diversos aspectos sociales, económicos y de movilidad. En esta línea de investigación se pretende incluir y evaluar políticas integrales y una serie de paquetes de diversas medidas, con el fin de encontrar una estrategia óptima que conduzca hacia la sostenibilidad.



6. ANEXO I. LA DINÁMICA DE SISTEMAS - DESCRIPCIÓN

Para empezar, es importante tener clara la definición acerca de lo que es un sistema. Un sistema es un conjunto de elementos relacionados entre sí, de forma tal que un elemento afecta el conjunto de todos ellos. Los elementos relacionados directa o indirectamente con el problema, y sólo estos, formarán el sistema en cuestión (García Juan Martín, 2007).

Existen varias clases de sistemas dinámicos, por ejemplo:

- Sistemas dinámicos de primer orden. Este tipo de sistemas posee un único nivel en su estructura y además pueden estar formados por bucles de realimentación positiva o por bucles de realimentación negativa.
- Sistemas de primer orden con realimentación positiva. Por ejemplo, relaciona fenómenos de crecimiento con comportamiento explosivo, el caso de un crecimiento desmedido en la población, es un ejemplo de un sistema de primer orden.
- Sistemas de primer orden con realimentación negativa. Estos sistemas se caracterizan por tener un comportamiento determinado por un objetivo. También son llamados sistemas autorreguladores. En su comportamiento está implícita la definición de un objetivo, el cual se determina externamente, por lo tanto, es una variable exógena. El nivel es el objeto de control que representa la acumulación de todas las acciones pasadas, además, éste solo puede ser variado por medio del flujo.

Los sistemas de primer orden no presentan oscilaciones, ya que este tipo de sistemas solo cuenta con un nivel en su estructura, esto significa que si el nivel con el que cuentan llega a un punto de equilibrio temporal difícilmente podrá salir de él. Para salir de esta situación es necesario que el flujo de salida del nivel dependiese de alguna otra variable que evolucione con el tiempo, lo que nos lleva a concluir que para que se produzcan oscilaciones se necesitan dos o más niveles; característica de los sistemas de segundo orden.

Estos fenómenos de segundo orden, tienen como característica principal y que comparten con los fenómenos impredecibles (no deterministas) y que las ecuaciones que los rigen son no-lineales. En la naturaleza, el crecimiento de una población es no-lineal: depende, entre otros factores, del tamaño actual de la población; el crecimiento del capital económico depende del capital actual. Como se ve, una singularidad de estos fenómenos es que el producto (la población, el capital) está interviniendo en el proceso que lo produce. Dicho en términos abstractos, la variable resultado está interviniendo en la producción del resultado (de sí misma).

Hay otras características de los fenómenos no-lineales. Primero, que insignificantes variaciones en el momento inicial pueden luego producir efectos



desmesurados. Esto se debe tener en cuenta al observar ciertas condiciones iniciales de un modelo para definir que éstas tengan o no, una gran influencia en el desarrollo de un sistema dinámico. Segundo, aunque entre los sistemas no lineales hay algunos que tienen un comportamiento periódico, pero los que realmente constituyen un enigma son no-periódicos.

El número de parámetros que caracterizan el estado de un sistema puede ser enorme. Una de las grandes dificultades para aplicar esta teoría de los sistemas dinámicos al comportamiento es que inicialmente se desconocen qué parámetros los determinan en sus diferentes modalidades. Ahora bien, la teoría puede predecir que, al situarse el sistema próximo a la frontera de su estado atractor, el número de parámetros que lo rigen se reduce en número. Unos pocos parámetros de control son suficientes para determinar el sistema. Un incremento (pequeño o grande) en uno rompe la cooperación entre ellos y el sistema se desequilibra. Se desplaza entonces erráticamente por "su espacio". Puede que caiga en una zona de equilibrio, caracterizada por otro haz de valores de los parámetros que definen un nuevo atractor. Es importante subrayar que no hay proporción entre el incremento que sufre un parámetro y el efecto que provoca en su relación con los restantes parámetros: pequeños incrementos pueden producir grandes impactos y viceversa, grandes incrementos no alteran el sistema. Depende de dónde se encuentra el sistema dentro de su región atractora y de la extensión de ésta.

La Dinámica de Sistemas es una metodología para la construcción de modelos de simulación para sistemas complejos, como los que son estudiados por las ciencias sociales, la economía o la ecología. Sin embargo, en su punto de mira están los problemas no estructurados, como los que aparecen en los sistemas socioeconómicos. Esto plantea dos tipos de dificultades:

- **Cuantificación:** en Dinámica de Sistemas se comienza por identificar las variables de interés y las relaciones que ligan entre sí a estas variables. A continuación, es imprescindible cuantificar dichas relaciones, lo que en ocasiones plantea dificultades insalvables.
- **Validación:** una vez construido el modelo hay que preguntarse si refleja razonablemente la realidad. Esta cuestión puede resolverse por ejemplo en caso de que se disponga de informaciones cuantitativas de la evolución del sistema real en el pasado. Si el modelo es capaz de generar los comportamientos característicos del sistema real, denominados modos de referencia, entonces obtendremos una cierta confianza en la validez del modelo

En Dinámica de Sistemas la simulación permite obtener trayectorias para las variables incluidas en cualquier modelo mediante la aplicación de técnicas de integración numérica. Sin embargo, estas trayectorias nunca se interpretan como predicciones, sino como proyecciones o tendencias. El objeto de los modelos de Dinámica de Sistemas es, como ocurre en todas las metodologías



de sistemas blandos, llegar a comprender cómo la estructura del sistema es responsable de su comportamiento. Esta comprensión normalmente debe generar un marco favorable para la determinación de las acciones que puedan mejorar el funcionamiento del sistema o resolver los problemas observados. La ventaja de la Dinámica de Sistemas consiste en que estas acciones pueden ser simuladas a bajo coste, con lo que es posible valorar sus resultados sin necesidad de ponerlas en práctica sobre el sistema real.

En resumen, el comportamiento de un sistema dinámico no es solo un elemento, sino un conjunto de relaciones. De los parámetros que intervienen, algunos son internos, inherentes al sistema en sí. Pero también los hay externos: variables exógenas.

6.1. Historia

A lo largo de los años cincuenta comenzó a fraguarse en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) una destacada metodología de sistemas, la Dinámica de Sistemas. Jay W. Forrester, ingeniero electrónico, había pasado del Laboratorio de Servomecanismos, donde inventó las memorias magnéticas de núcleos de ferrita, a coordinar un gran proyecto de defensa, el sistema SAGE (Semi-Automatic Ground Equipment). En la realización de este sistema de alerta en tiempo real se percató de la importancia del enfoque sistémico para concebir y controlar entidades complejas como las que surgen de la interacción de hombres y máquinas.

Tras esta experiencia, Forrester pasaría como profesor a la Sloan School of Management del MIT, donde observó que en las empresas se producían fenómenos de realimentación que podían ser causa de oscilaciones, igual que sucede en los servomecanismos. De esta forma, ideó la Dinámica Industrial, una metodología que permitía construir modelos cibernéticos de los procesos industriales. La peculiaridad de estos modelos residía en la posibilidad de simular su evolución temporal con la ayuda del ordenador. Posteriormente aplicaría su metodología a problemas de planificación urbana (Urban Dynamics, 1967 y 1976) y la generalizaría para cualquier tipo de sistema continuo, cambiando su denominación por la de Dinámica de Sistemas.

La Dinámica de Sistemas alcanzó gran difusión durante los años setenta al servir de base para los estudios encargados por el Club de Roma a Forrester y su equipo para valorar el efecto del crecimiento de la población y de la actividad humana en un mundo de recursos limitados. El propio Forrester dirigió la confección de un modelo inicial del mundo (World Dynamics, 1971) a partir del cual se realizaría más tarde el informe definitivo (The Limits to Growth, 1973), dirigido por D. L. Meadows y financiado por la Fundación Volkswagen. Un segundo informe, también utilizando Dinámica de Sistemas, sería encargado posteriormente a Mesarovic y Pestel.



6.2. Estructura General del Sistema

Antes de hablar acerca del sistema de interacción de transporte y usos del suelo en particular, se describirá primero la estructura básica que se encuentra en cualquier sistema dinámico. Para modelar el comportamiento dinámico de un sistema, existen unos elementos jerárquicos que componen la estructura:

➤ *Medio donde se encuentra el sistema*

- Límites del sistema
 - Diagrama causales (bucles o ciclos que se retroalimentan) como la estructura básica dentro de los límites del sistema
 - Variables de estado (niveles) que representan el estado actual del sistema
 - Flujos, que determinan las variaciones en los niveles

6.2.1. Límites del Sistema

Con el fin de poder desarrollar un concepto completo de un sistema, sus límites deben establecerse dentro de la zona donde las interacciones de dicho sistema estén trabajando y para separarlo del medio donde se encuentre inserto. Estos límites son escogidos para que contengan solo aquellos elementos que tengan una influencia razonable en el comportamiento del sistema.

El decir que un sistema tenga límites, no quiere decir que éste no puede llegar a ser afectado por elementos externos. Esto significa que estos elementos externos pueden verse como ocurrencias aleatorias que afectan el sistema y no como elementos dados por el propio sistema con características intrínsecas de crecimiento y equilibrio.

Los elementos que se encuentran fuera de los límites del sistema, están relacionado con los que se encuentran dentro de una manera muy diferente a la forma en que éstos elementos internos, se encuentran relacionados entre sí. Las relaciones causa – efecto entre el sistema y el medio que lo rodea son unidireccionales, mientras que los elementos dentro del sistema tienen una fuerte relación de retroalimentación ente ellos. Esto quiere decir que el medio está formado por todos los objetos fuera de los límites del sistema de tal manera que un cambio en ciertos atributos afecta al sistema y también se da el caso que otros atributos (diferentes a los del primer caso) sean afectados por el comportamiento del sistema. Es claro que un mismo atributo no puede afectar y ser afectado por el sistema, si esto llegara a suceder, significa que el atributo está dentro del sistema.

Para poder construir y simular un modelo de ordenador de un sistema cualquiera, se debe primer conocer los elementos que lo forman y las relaciones que existen entre ellos. Para comprender el funcionamiento de sistemas complejos es necesario prestar atención a las relaciones entre los elementos que forman dichos sistemas.

6.2.2. Elementos y Relaciones en un Modelo

Un modelo, teniendo en cuenta que puede considerarse como una representación abstracta de un sistema real, está compuesto por:

- Un conjunto de definiciones que permiten identificar los elementos que constituyen el modelo.
- Un conjunto de relaciones que especifican las interacciones entre los elementos que parecen en el modelo.

Las diferentes variables (o elementos) que intervienen en un modelo se clasifican en *endógenos* y *exógenos*. Las variables endógenas caracterizan los elementos cuyo comportamiento está completamente determinado por la estructura del sistema, sin posibilidad de que sea modificado directamente desde el exterior. Las variables exógenas describen los efectos sobre el sistema que pueden llegar a ser modificados desde el exterior. De cierta forma representan el medio que rodea al sistema.

6.3. Diagrama Causal y Ciclo

El comportamiento dinámico de un sistema es generado a través de los diagramas causales. Un diagrama causal es un diagrama que recoge los elementos clave del sistema y las relaciones entre ellos. En la Figura 10 el diagrama causal más simple. Este diagrama permite conocer la estructura de un sistema dinámico. Esta estructura viene dada por la especificación de las variables del sistema y de la relación entre ellas.

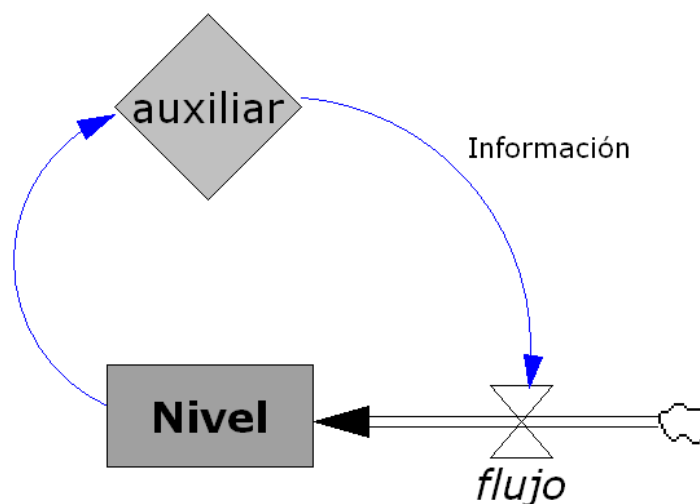


Figura 10. Diagrama Causal Simple Con una Variable de Nivel y una Tasa de Flujo



Un diagrama causal está compuesto por tres clases de variables: las variables de nivel, las auxiliares y las tasas de flujo, las cuales son necesarias y suficientes. La estructura de un diagrama causal tiene un punto de control de decisión (la ecuación de la tasa de flujo) de la acción que el sistema esté llevando a cabo en dicho punto. La acción se acumula generando una variable de nivel. Una vez conocidas las variables del sistema y las posibles relaciones causales existentes entre ellas, se pasa a la representación gráfica de las mismas. En dicho diagrama, las diferentes relaciones están representadas por flechas entre las variables afectadas por ellas. Esas flechas van acompañadas de un signo (+ ó -) lo que indica el tipo de influencia ejercida de una variable sobre otra. Un signo "+" significa que un cambio en la variable origen de la flecha producirá un cambio en el mismo sentido en la variable de destino. El signo "-" quiere decir que el efecto producido será en sentido contrario.

Por otro lado, un ciclo es una cadena cerrada de relaciones causales, el cual también se conoce como retroalimentación o "feedback". Los ciclos pueden definirse como positivos cuando el número de relaciones negativas es par y negativos, si es impar.

Los ciclos negativos llevan el modelo hacia una situación estable y los positivos lo hacen inestable, independientemente de la situación de partida. Todos los sistemas contienen ambos tipos de ciclos y su comportamiento final dependerá de cual ciclo es el dominante en un momento determinado.

El concepto de ciclo es muy útil porque nos permite partir desde la estructura del sistema que analizamos y llegar hasta su comportamiento dinámico. Si un sistema oscila persistentemente o se halla en equilibrio, o decae rápidamente, podemos identificar las razones estructurales y decidir como modificar los ciclos causales que lo van a modificar.

La utilidad más importante de este concepto es comprender cómo la estructura de los sistemas influye en su comportamiento. Por ejemplo, en un mismo mercado, en un mismo año, varias empresas ofrecen el mismo producto pero presentan resultados económicos muy diferentes. Para saber el porqué de este comportamiento se debe mirar la estructura del sistema que cada empresa controla.

En la construcción de un diagrama causal debe procederse con gran cuidado con el fin de evitar posibles errores. Para esto, deben tenerse en cuenta estas recomendaciones:

- Evitar ciclos ficticios
- Usar elementos que sean fáciles de caracterizar con números
- No emplear dos veces la misma relación en un mismo modelo
- Evitar ciclos redundantes



- No usar el tiempo como un factor causal

El concepto de Diagramas de Flujo Causales son la base de la definición y explicación de las relaciones causa-efecto de las variables de un modelo dinámico. Ver Figura 5.

Con el fin de implementar los escenarios anteriormente mencionados en el modelo, los valores del precio y la composición de la flota vehicular son variables exógenas. Estas variables han sido obtenidas utilizando los resultados del modelo del mercado mundial energético POLES (POLES, 2000) y de un modelo de transporte europeo ASTRA (ASTRA, 1999).

6.3.1. Niveles

La evolución de las variables de nivel es muy importante para el estudio de un sistema. Los niveles representan magnitudes que acumulan los resultados de acciones tomadas en el pasado. Esta función de acumulación puede asimilarse a la del nivel alcanzado por un líquido en un depósito; de ahí proviene la denominación de nivel.

Este tipo de variables, equivalen a las variables de estado en la teoría de sistemas, es decir, el estado de un sistema se representa por medio de variables de nivel. La elección de los elementos que se representan por niveles depende del problema específico que se esté considerando. En la elección de estas variables juega un papel primordial la experiencia del diseñador del modelo. Una característica común a todos los niveles es que cambian lentamente en respuesta a las variaciones de otras variables.

En un diagrama, los niveles se representan por medio de rectángulos (ver Figura 10). La variación de un nivel se produce gracias a las variables de flujo. A cada nivel N se le puede asociar un flujo de entrada FE y un flujo de salida FS , de manera que la ecuación que representa la evolución del nivel sea la siguiente:

$$N(t) = N(0) + \int_0^T (FE - FS)dt$$

O lo que es lo mismo,

$$\frac{dN}{dt} = FE - FS$$

Ecuación 1. Evolución de la Variable de Nivel

6.3.2. Variables de Flujo

Las variables de flujo determinan las variaciones en los niveles del sistema. Estas variables caracterizan las acciones que se toman en el sistema, las cuales

quedan acumuladas en los correspondientes niveles. Determinan cómo se convierte la información disponible en una acción dentro del sistema.

Debido a sus características particulares, este tipo de variables no son medibles en sí, sino por los efectos que producen en los niveles con los que están relacionadas. Se representan por medio de los símbolos como se indican en la Figura 11. Estos símbolos están inspirados en un símil hidrodinámico, según el cual las variables de flujo se pueden asociar a válvulas que regulen los caudales que alimentan determinados depósitos, cuyos niveles materializan el estado del sistema.

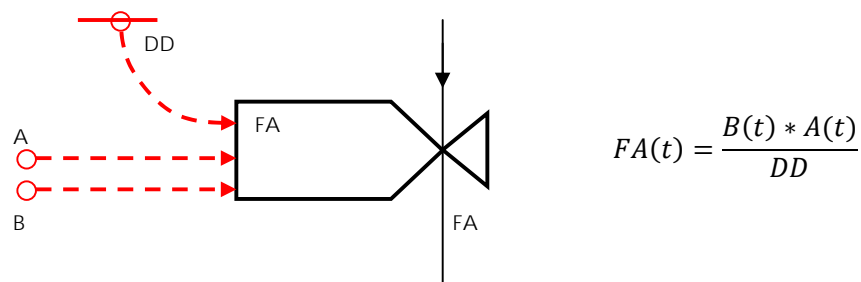


Figura 11. Representación de un Flujo
 Fuente: Introducción a la Dinámica de Sistemas

A las variables de flujo se asocian ecuaciones que definen el comportamiento del sistema. El bloque representativo de un flujo admite como señal de entrada, la información proveniente de los niveles o de variables auxiliares. Como salida suministra el flujo que alimenta un nivel. Por ejemplo, en la Figura 12 se tiene un bloque que representa un flujo, al que se puede asociar una ecuación de la forma que se muestra en la Figura 11. Donde $A(t)$ y $B(t)$ son dos variables de nivel o auxiliares. Las ecuaciones asociadas a una variable de flujo se conocen como *ecuaciones de flujo*. La ecuación de flujo calcula en cada instante la abertura de la válvula, o sea el flujo.

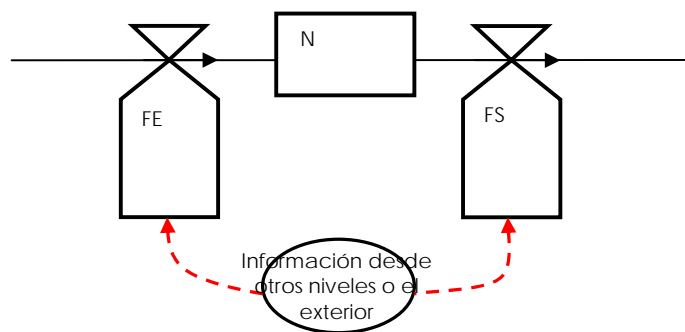


Figura 12. Conexión de un Nivel N a los Flujos de Entrada FE y de Salida FS
 Fuente: Introducción a la Dinámica de Sistemas



A todo nivel se asocia al menos una variable de flujo, lo que gráficamente se puede representar como la Figura 12. Una forma que tima muy frecuentemente la ecuación de un flujo es la que se representa en la Figura 10.

Las decisiones que parecen en una ecuación de flujo pueden ser abiertas si implican la intervención de un agente externo al sistema, o implícitas, si están completamente determinadas por las variables internas al sistema.

Las unidades en que se miden las variables de flujo deben ser consistentes con las variables con que se relacionan. En particular, una variable de flujo vendrá siempre medida por la unidad del nivel al que alimenta, por unidad de tiempo.

Las variables de flujo tienen como entradas exclusivamente a niveles y variables auxiliares. Es decir, dos variables de flujo no pueden conectarse entre sí. La evolución del sistema en el tiempo comporta variaciones en los distintos niveles. Estas variaciones se deben no solo a la acción de factores externos (variables exógenas) sino, y especialmente, a decisiones en un sentido amplio, tomadas en el interior del sistema, las cuales se interpretan con ayuda de las ecuaciones de flujo. En este sentido es como deben entenderse que el sistema genere su propio comportamiento y la existencia de unos límites para el mismo.

6.3.3. Variables Auxiliares

Las variables auxiliares representan pasos o etapas en que se descompone el cálculo de una variable de flujo a partir de los valores tomados por los niveles. Las variables auxiliares unen los canales de información entre variables de nivel y de flujo, pero en realidad son parte de las variables de flujo. Sin embargo, se distinguen de ellas en la medida en que tengan un significado real por sí mismas y también porque hacen más fácil la comprensión de las ecuaciones de flujo.

Este tipo de variables son de gran ayuda para representar las no linealidades que aparecen en el sistema. Si las variables A y B están ligadas por una expresión de la forma $B=f(A)$, en donde $f(A)$ es una expresión no lineal, entonces se emplea una variable auxiliar que describe esta relación.

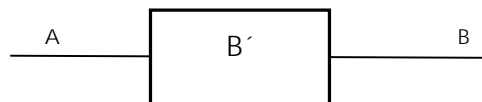


Figura 13. La Variable B es una Función Lineal o Tabla de A
Fuente: Introducción a la Dinámica de Sistemas



6.4. Las Ecuaciones del Modelo y su Programación

El proceso de construcción de un modelo de un determinado sistema se inicia con la construcción de un diagrama causal. En un principio, el diagrama causal no tendrá especificados el carácter de los distintos elementos que en él se relacionan, es decir, en esta etapa no se sabe si se trata de niveles, flujos o variables auxiliares. De hecho, la asignación de tipos a las variables es uno de los puntos más importantes en la construcción de un modelo y en el que cobra importancia la experiencia y conocimientos del diseñador del modelo.

La diferenciación entre niveles y variables auxiliares, a partir del diagrama causal, no siempre es clara y a veces es difícil decidir si una variable debe ser una o la otra. Una regla aceptable para decidir qué tipo de variable debe definirse, consiste en considerar la respuesta en el tiempo de la variable en discusión a un cambio en el sistema, ya que los niveles varían lentamente acumulando los flujos. Las variables auxiliares varían instantáneamente en respuesta a los valores que toman los niveles a lo largo del sistema. Puede suceder que una variable, representada por una variable auxiliar cuando se emplea un horizonte temporal muy grande, deba ser representada como un nivel cuando el horizonte temporal sea menor.

Una vez identificadas las variables de nivel, las de flujo y las auxiliares, se construye el diagrama, disponiendo los bloques y sus ecuaciones. El proceso de modelamiento del comportamiento dinámico de un sistema puede resumirse diciendo que se procede de forma secuencial y progresiva al establecimiento de:

- Los límites del sistema (variables endógenas y exógenas)
- Los ciclos de retroalimentación
- Las variables de nivel (estado) que representan las acumulaciones de los ciclos
- Las variables de flujo que representan la actividad dentro de los ciclos

Del diagrama realizado se puede obtener el modelo matemático del sistema en forma analítica. Para ello lo único que se requiere es tener las no linealidades que parecen en el sistema de forma analítica. A partir del diagrama se puede escribir:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

En donde x es un vector que representa todos los niveles que aparecen en el diagrama, es decir, $x^T = [N_1, N_2, \dots, N_k]$, y u representa el conjunto de variables exógenas al sistema. Las variables de flujo y las auxiliares se han eliminado, dejando solamente las variables de nivel y las exógenas. Si se prefiriera escribir las ecuaciones en tiempo discreto, en lugar de en tiempo continuo, se tiene:



$$x(t + \Delta t) = \Phi[x(t), u(t)]$$

En donde el significado de x y de u es el mismo que se describió anteriormente.

En general, cuando se va a simular un modelo matemático no tiene interés la forma analítica, ya que lo que interesa es escribir el modelo de una forma fácilmente programable en un ordenador. Sin embargo, la forma analítica si es de gran importancia en ciertos problemas de optimización y de estimación de parámetros por ajuste de datos. En cualquier caso, la forma analítica tiene el interés de que permite aplicar la teoría moderna del control a los modelos matemáticos de los sistemas.

A partir de las ecuaciones que rigen el comportamiento de las distintas variables que intervienen en un modelo se obtiene la evolución del sistema, lo que puede hacerse por cualquier procedimiento.

7. ANEXO II. EL MODELO MARS

Como se ha descrito anteriormente, MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator), que se empezó a desarrollar a partir del año 2000, es un rápido modelo de interacción entre el uso del suelo y el transporte que trabaja con un nivel de agregación importante (inicialmente solo era posible trabajar hasta con 34 zonas). Este modelo incluye ciclos de retroalimentación entre los submodelos de transporte y usos de suelo. También incluye los más importantes modos de transporte. Una gran ventaja de este modelo en la actualidad es que trabaja bajo un software de sistemas dinámicos conocido como Vensim® donde es posible cambiar sus ecuaciones de ser necesario. Es importante aclarar que MARS no es un modelo de equilibrio.

El principio básico con el que trabaja el modelo consiste en que la población y las actividades son sistemas "auto organizables", tal como se puede apreciar en la Figura 14.

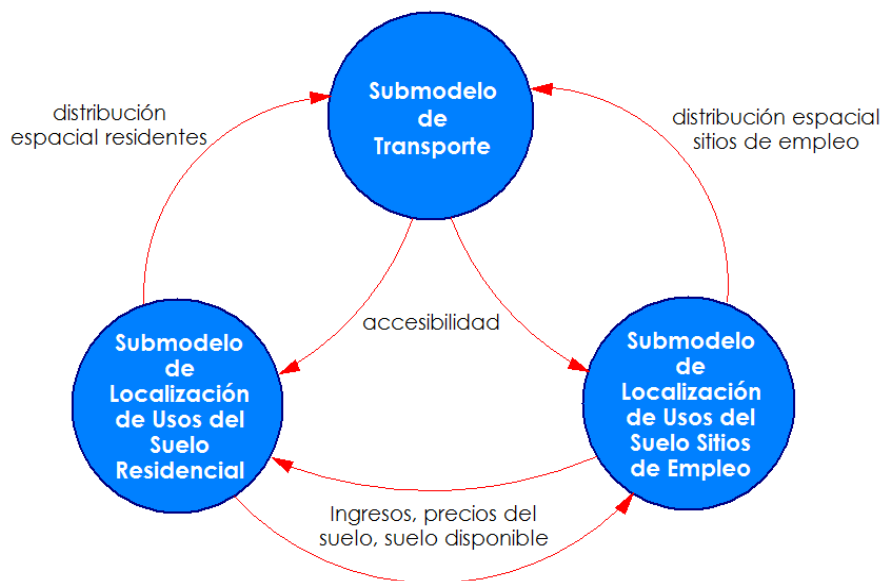


Figura 14. MARS, Modelo de Usos del Suelo y Transporte

Fuente: The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS, Pfaffenbichler (2003)

Como se ve en el diagrama, MARS consta de dos submodelos: el de transporte y el de usos del suelo. Estas dos partes están relacionadas por un intervalo de tiempo (time lag), lo que permite que cada submodelo trabaje en dos escalas de tiempo diferentes. Esto significa que al haber cambios en el sistema de transporte, éstos tendrán un impacto sobre el sistema de usos del suelo después de un periodo de tiempo t ; a su vez, si hay cambios en el sistema de usos del suelo, estos causarán reacciones inmediatas en el sistema de transporte.



El modelo de usos del suelo a su vez, se divide en dos partes: el modelo de localización residencial y el de localización de puestos de trabajo (empresas).

En general, estos modelos son de tipo LOGIT o gravitacional. El modelo de transporte implica decisiones diarias, mientras que en el de usos del suelo, según el tipo de ciudad, éstas pueden tardar hasta 15 años.

7.1. Características Principales del Modelo

La hipótesis principal de MARS es que la movilidad es sólo un medio de satisfacer unas necesidades, pero no es una necesidad en sí misma. Adicionalmente supone que la gente tiene un presupuesto de tiempo de viaje disponible para gastar en desplazarse, ya que estudios empíricos han demostrado que el tiempo destinado a viajar permanece constante a lo largo del tiempo y entre zonas. Bajo estos conceptos, el modelo trabaja además con los siguientes parámetros:

- Usa ratios de viajes constantes para los desplazamientos de trabajo.
- MARS trabaja con dos grupos de personas: personas en hogares con y sin coche.
- Hay dos tipos de viajes: trabajo (commuting) y otros (resto).
- Tres o cuatro modos de transporte: "slow"¹, transporte público y coche; "slow", transporte público, coche y motos; "slow", bus, "rail"² y coche.
- El número de viajes totales de trabajo se distribuye por zonas y por modos de transporte.
- El tiempo empleado en los viajes de trabajo se extrae del presupuesto de viaje. El tiempo restante, MARS supone que queda libre para realizar el resto de actividades.

Como ya se mencionó anteriormente, MARS trabaja sobre la plataforma Vensim® y a su vez éste trabaja con libros de Excel. El módulo inicial del modelo en Excel se muestra en la Figura 15.

¹ MARS trabaja los peatones y las bicicletas de forma agregada bajo este modo.

² Bus se refiere a un sistema de transporte público de vías compartidas con el tráfico normal y "rail" es un sistema sobre vías exclusivas, por ejemplo, el metro y el bus VAO.

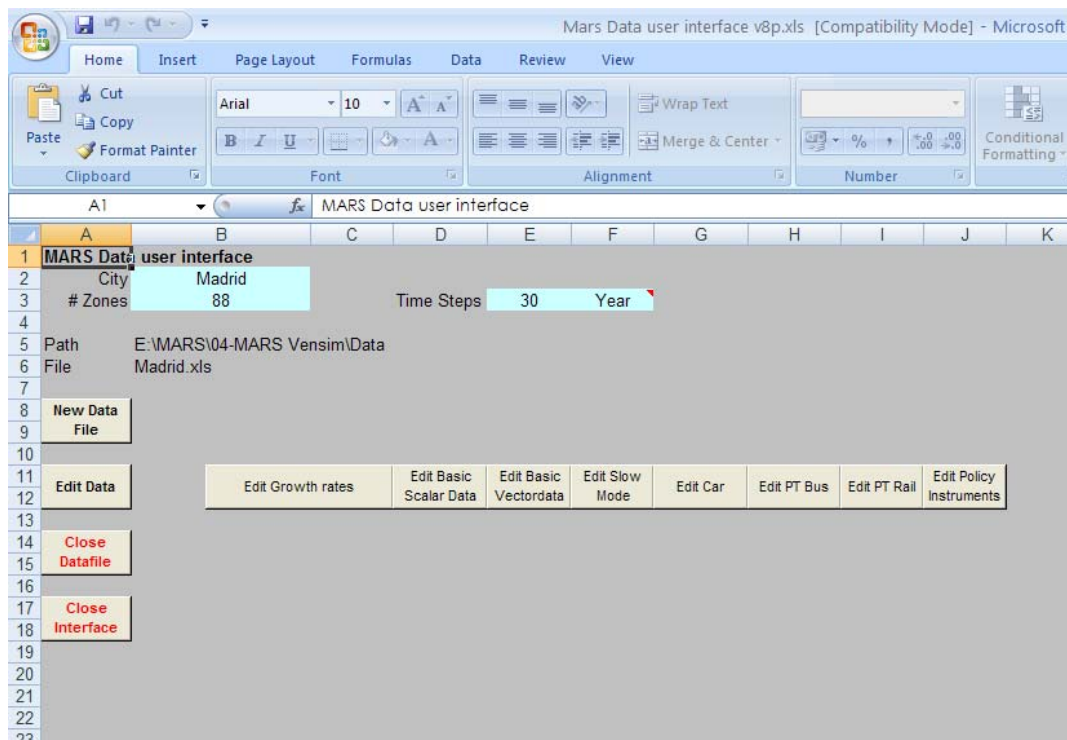


Figura 15. MARS Data User Interface

Como se observa en la figura anterior, el módulo de inicio consta de 8 libros en donde se introducirá la información correspondiente. A continuación se realizará una breve explicación de cada uno de ellos.

- Edit Growth Rates. Se definen las tasas de crecimiento en porcentaje (%) para:
 - Población residente
 - Puestos de trabajo en el sector de servicios
 - Puestos de trabajo en el sector de de producción
 - Crecimiento de la motorización (coches)
 - Crecimiento de la motorización (motos)
- Edit Basic Scalar Data. Se requiere información particular relacionada con diferentes campos del modelo.
 - Número medio de viajes por empleado al día
 - Presupuesto de viaje (tiempo medio para toda la Comunidad) [min]



- o Tiempo medio de permanencia en una vivienda [años]
 - o Número de viviendas a construir en el año base (en este caso, 2004)
 - o Velocidad media de los peatones en hora punta [Km/h]
 - o Velocidad media de los peatones en hora valle [Km/h]
 - o Valores límites para el aumento de la capacidad vial¹ (porcentaje de cambio en nuevos desarrollos y velocidad mínima del coche)
 - o Factor de ocupación del coche en hora punta y en hora valle
 - o Porcentaje de empleados que tienen carnet de conducir
 - o Porcentaje de residentes que tienen carnet de conducir
 - o Coste del combustible² [€/Km]
 - o Vehículos-Km de transporte público en el año base en hora punta y en hora valle.
- Edit Basic Vector Data. En este punto se requiere información de hogares, vivienda, empleos, suelo, entre otras cosas:
 - o Número de residentes por zona
 - o Número de empleados por zona³
 - o Ingreso medio por hogar y por zona [€/mes]
 - o Tamaño medio del hogar por zona
 - o Valor medio del alquiler por zona [€/m²]
 - o Tamaño medio de un piso por zona [m²]
 - o Ratio entre el espacio habitable y el espacio del terreno por zona⁴
 - o Número medio de pisos vacíos por zona
 - o Número de puestos de trabajo por zona

¹ Actualmente MARS aumenta su capacidad vial automáticamente si los nuevos desarrollos en la zona *i* cumplen estas dos condiciones (por ejemplo si el cambio en el nuevo desarrollo es mayor que 15% y la velocidad cae por debajo de 40 Km/h).

² Precio del combustible en la estación de servicio.

³ De ser posible, se deben incluir los autónomos y los informales.

⁴ Por ejemplo si se tiene un terreno de 100 m² y un edificio cuya superficie ocupa es de 50 m² y éste tiene 5 plantas, entonces la variable es aproximadamente $5 \cdot 50 / 100 = 2.5$.



- Participación del sector de servicios y de producción por zona¹ [%]
- Número medio de puestos de trabajo por sector y por unidad productiva
- Superficie media por sector y por unidad [m²]
- Índice de motorización (coches y motos) por cada 1.000 habitantes
- Área de cada zona [Km²]
- Suelo no desarrollado [%]
- Suelo desarrollable para zonas residenciales, de producción o protegidas² [%]
- Posibilidad de desarrollo de cada sector por zona
- Precio del suelo [€/m²]
- Edit Slow Mode. Se debe introducir la matriz de distancias de caminata entre zonas, en este caso, una matriz de 88 x 88 [Km].
- Edit Car. Se requiere la siguiente información relacionada con los recorridos en coche:
 - Car Distance. Matriz de distancias en coche [Km]
 - Car Vector Data. Información relacionada con el aparcamiento en hora punta y en hora valle.
 - Distancia media de caminata del punto de origen al punto de aparcamiento [min]
 - Tiempo medio de búsqueda de aparcamiento en el lugar de destino [min]
 - Distancia media de caminata del punto de aparcamiento de destino al destino principal [min]
 - Tarifa de aparcamiento de larga duración [€/duración]
 - Ratio entre los aparcamientos de larga duración ocupados en la zona
 - Tarifa de aparcamiento de corta duración [€/duración]

¹ En MARS esta información debe sumar 100%. La producción equivale aproximadamente a la producción de productos no agrícolas. En el sector de servicios, puede tomarse el comercio.

² Por ejemplo, una zona tiene una superficie de 100 Km². De ese total, 30% ya está desarrollado (construido) en el año base, así que quedan 70 Km² para desarrollar (suelo no desarrollado). De esos 70 Km², pueden por ejemplo, destinar 50% a zonas residenciales, 10% a producción y 40% a zonas protegidas. Estas zonas protegidas también incluyen bosques, montañas, ríos, etc.



- Ratio entre los aparcamientos de corta duración ocupados en la zona
- Ratio de viajes que usan aparcamiento de larga duración
- Car Free Flow Speed. Matriz de velocidades a flujo libre del coche [Km/h]
- Car Speed Off Peak. Matriz de velocidades de recorrido del coche en hora valle [Km/h]
- Car Speed Peak. Matriz de velocidades de recorrido del coche en hora punta [Km/h]
- Car Road Charge Off Peak. Matriz de costes adicionales (peajes) entre zonas en hora valle [€/viaje]
- Car Road Charge Peak. Matriz de costes adicionales (peajes) entre zonas en hora punta [€/viaje]
- Edit PT Bus. Se requiere la siguiente información relacionada con el transporte público en vía compartida (bus):
 - PT Bus Distance. Matriz de distancias en transporte público de vía compartida [Km]
 - PT Bus Distance PT Bus Stop. Matriz de distancias desde el punto de origen hasta la parada más próxima [min]
 - PT Bus Headway Time Off Peak. Frecuencia del transporte público de vía compartida en hora valle [min]
 - PT Bus Headway Time Peak. Frecuencia del transporte público de vía compartida en hora punta [min]
 - PT Bus Changing Time Off Peak. Tiempo medio de transbordo del transporte público de vía compartida en hora valle [min]
 - PT Bus Changing Time Peak. Tiempo medio de transbordo del transporte público de vía compartida en hora punta [min]
 - PT Bus Share Metro Peak. Ofrece la posibilidad de considerar que un parte de los viajes en bus y en tren está independiente de la velocidad de la circulación de los coches y otro no, en hora punta. Por ejemplo si X% de la longitud de las líneas de autobús tienen carriles-bus entonces el valor en la hoja es X% entre cada zona [%]
 - PT Bus Share Metro Offeak. Igual que el punto anterior, pero en hora valle [%]

- o PT Fare Off Peak. Tarifa entre zonas en hora valle [€]
- o PT Fare Peak. Tarifa entre zonas en hora punta [€]
- Edit PT Rail. Para este libro se requiere la misma información del punto anterior. La diferencia es que acá se debe tener en cuenta solo el transporte público en vía exclusiva (metro y cercanías, por ejemplo).

7.1.1. El Modelo de Transporte

En este aparte se pretende describir brevemente el funcionamiento del modelo de transporte bajo el cual funciona MARS. Este modelo está formado por dos elementos: el generador de viajes y la distribución zonal y modal de los mismos.

Los modelos estratégicos de transporte utilizan una red de transporte muy simplificada, como es el caso del MARS, donde la red es agregada, de forma que sólo existe un arco por cada par de origen-destino (OD). La consecuencia es que no existe la etapa de asignación de rutas (como muestra la Figura 16), puesto que se supone que existe una única ruta entre cada par de zonas.

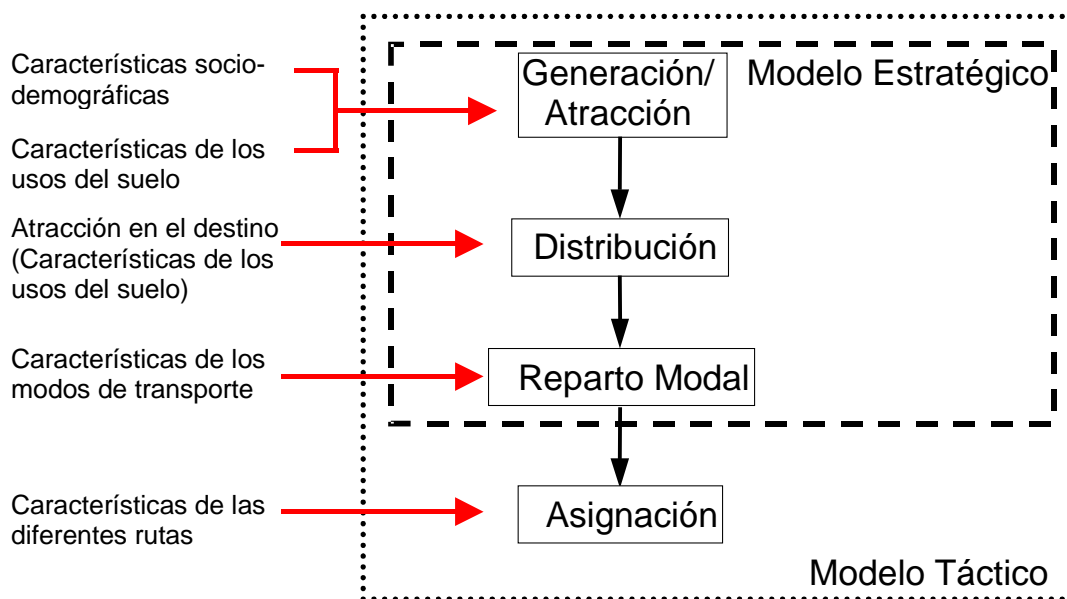


Figura 16. Modelo Estratégico y Táctico de Transporte

Fuente: The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS, Pfaffenbichler (2003)

El método de generación de viajes se utiliza para estimar el número medio de viajes/día que hace cada persona empleada en el modelo, es decir, estima el número de viajes/día que están compuestos por los recorridos casa – trabajo – casa (C-T-C). En este caso, el número de residentes empleados en la zona i es afectado por un valor constante (que es la tasa de viajes) para obtener como



resultado el número total de viajes de dicha zona realizados por motivos de trabajo. Esta expresión se puede ver en la Ecuación 2.

$$P_{iC-T-C} = r_{C-T-C} * E_i$$

Ecuación 2. Generación de Viajes

- P_i = Viajes producidos en el origen i
 r_C = Tasa de viajes/día (casa-trabajo-casa)
 E_i = Número de empleados residentes en la zona i

El tiempo total empleado por los viajes casa-trabajo-casa es estimado por la expresión dada en la Ecuación 3. Posteriormente, el tiempo que queda del presupuesto total de viaje es calculado según la Ecuación 4. El tiempo total por zona disponible para realizar los viajes casa-trabajo-casa se calcula multiplicando el presupuesto de viaje por el número de residentes en dicha zona (Ecuación 5).

$$t_{C-T-C} = \sum_{ijm} T_{ij}^m * t_{ij}^m$$

Ecuación 3. Tiempo Total de Viaje (C-T-C)

- t_{C-T-C} = Tiempo total de viaje (casa-trabajo-casa) [min]
 T_{ij} = Viajes de i a j en el modo m (casa-trabajo-casa)
 t_{ij} = Tiempo de viaje de i a j en el modo m (casa-trabajo-casa)

$$t_{POTROS} = \frac{(t_P * N - t_{C-T-C})}{N}$$

Ecuación 4. Presupuesto de Viaje (Otros de Viajes)

- t_{POTROS} = Presupuesto de viaje (motivo diferente a casa-trabajo-casa) [min]
 t_P = Presupuesto de viaje por persona [min]
 N = Número de residentes en la zona de estudio

$$P_{iOTROS} = t_{POTROS} * N_i$$

Ecuación 5. Tiempo Total de Viaje (Otros Viajes)

- P_{iOTROS} = Tiempo total de viaje con motivo distinto a casa-trabajo-casa [min]
 N_i = Número de residentes en la zona i



Para el modelo de distribución zonal y modal del modelo, se utiliza una combinación de la analogía de la ley de la gravedad y de la ley de Kirchoff's de la ingeniería eléctrica (Ecuación 6). La producción de viajes P_i descrita anteriormente, es distribuida entre las zonas disponibles j y los modos m de acuerdo con la relación entre la atractividad de cada zona (A_j), la impedancia de cada par O-D y la sumatoria de la atractividad de todos los destinos y sus impedancias.

$$T_{ij}^m = \left[P_i \frac{\frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}}{\sum_{m,j} \frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}} \right]_{C-T-C} + \left[P_i \frac{\frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}}{\sum_{m,j} \frac{A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)}} \right]_{OTROS}$$

Ecuación 6. Distribución de Viajes

- $T_{ij}^m =$ Número de viajes en el modo m que van del origen i al destino j
- $P_i =$ Producción de viajes en el origen i
- $A_j =$ Atractividad de una zona en el destino j
- $t_{ij}^m =$ Tiempo de viaje en el modo m para ir de i a j [min]
- $c_{ij}^m =$ Coste del viaje en el modo m para ir de i a j [€]
- $f(t_{ij}^m, c_{ij}^m) =$ Factor de fricción en el modo m para ir de i a j [min]
- $C-T-C =$ Viajes con motivo casa-trabajo-casa
- $OTROS =$ Resto de viajes

La atractividad de cada zona depende de las actividades que se realicen en ella. Para los viajes con motivo casa-trabajo-casa la atractividad de una zona es igual al número de puestos de trabajo que existan en ella. Para el resto de viajes, la atractividad está definida por el número de residentes y la cantidad de puestos de trabajo en el sector de servicios.

Las impedancias o factores de fricción, son indicadores que tratan de medir el esfuerzo percibido en tiempo y en dinero por un viajero al tratar de ir de un origen i a un destino j . Las matrices de viajes de casa-trabajo-casa se deben calcular independientemente de la de resto de viajes.

La distribución zonal y modal considera dos grupos diferentes: los que tienen coche a su disponibilidad y los que no. Los que pertenecen al primer grupo, al momento de realizar un viaje tienen la opción de decidir entre viajes no motorizados¹, coche o transporte público; mientras que el segundo grupo solo podrá elegir entre los viajes no motorizados y el transporte público. La estimación de la disponibilidad de coche en cada zona depende de los índices de motorización, las tasas de crecimiento de dichos índices, los factores de ocupación y los porcentajes de tenencia de carné de conducir (Ecuación 7).

¹ En MARS los viajes no motorizados (en bicicleta y a pie) se conocerán como "slow modes".



$$Acc^c = \frac{I_{mot}^c * F.O * P_c}{1000}$$

Ecuación 7. Acceso a Coche

Acc^c = Porcentaje de población que tiene acceso a coche
 I_{mot}^c = Índice de motorización [coches/1.000 residentes]
 $F.O.$ = Factor medio de ocupación del coche [personas/coche]
 P_c = Porcentaje de licencias de conducir

Factores de Fricción

Los factores de fricción son funciones que dependen de los tiempos de viaje, incluido las percepciones subjetivas de los usuarios del sistema según las diferentes partes del viaje y sus costes. Los parámetros de fricción usados en MARS fueron desarrollados por el Institute of Transport Science, Aachen University of Technology y tienen una forma exponencial.

Slow Modes

En la Ecuación 8 se muestra el factor de fricción para este modo de transporte usado en MARS.

$$f_{slow} = \alpha * t_{ij} * e^{\beta * t_{ij}}$$

Ecuación 8. Factor de Fricción Slow Modes

(Walther K. et al., 1997) utilizó la distancia de recorrido para estimar diferentes parámetros en función de ella. Luego, usando esos resultados y la Ecuación 8, obtuvo los siguientes parámetros.

Parámetro	Valor
α	0.2060
β	0.0463

Tabla 4. Parámetros de Fricción para Slow Modes

Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

Transporte Público

Un viaje en transporte público consta de las siguientes etapas (Figura 17):

- Tramo de caminata desde el origen hasta la parada del transporte público
- Recorrido desde la parada hasta el destino

- Tiempo de transbordo
- Tramo de caminata desde la parada del transporte público hasta el destino final

Cada una de estas etapas es percibida y evaluada diferente por cada usuario del sistema. De esta manera, cada etapa de un viaje de este tipo se ve afectada por un valor que le asigna cada usuario según su propia percepción.

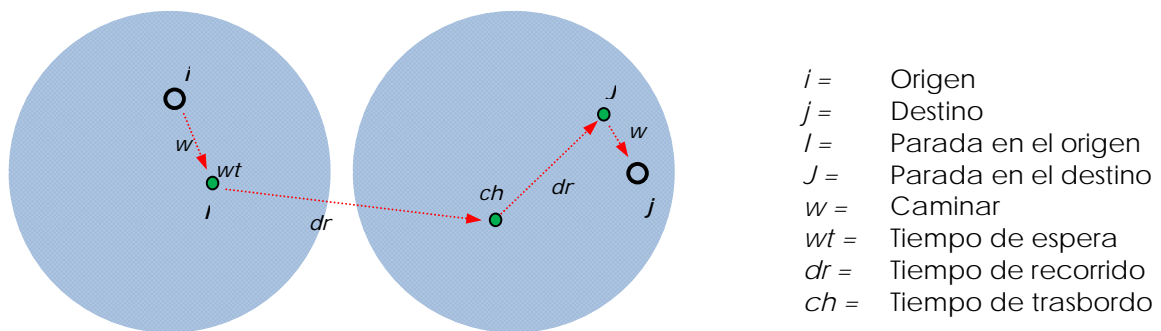


Figura 17. Etapas de un Viaje en Transporte Público en MARS

Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

Entonces, el factor de fricción para un viaje de transporte público deberá incluir los aspectos inherentes al viaje, como tiempos y costes y la percepción de los usuarios. En la Ecuación 9 se muestra la expresión para calcular el valor de la fricción entre un par i - j .

$$f(t_{ij}^{TP}, c_{ij}^{TP}) = t_{il}^w * FS_{il}^w + t_l^{wt} * FS_l^{wt} + \sum t_{ij}^{dr} + \sum t_{ij}^{ch} * FS_{ij}^{ch} + t_{jj}^w * FS_{jj}^w + Z_{ij}$$

Ecuación 9. Factor de Fricción Transporte Público

- t_{ij}^w = Tiempo de caminata del origen i a la parada l [min]
- FS_{il}^w = Valor subjetivo de tiempo desde el origen i a la parada l
- t_l^{wt} = Tiempo de espera en la parada l [min]
- FS_l^{wt} = Valor subjetivo de tiempo de espera en la parada l
- t_{ij}^{dr} = Tiempo de recorrido desde la parada l hasta la parada J [min]
- t_{ij}^{ch} = Tiempo de transbordo [min]
- FS_{ij}^{ch} = Valor subjetivo del tiempo de transbordo
- t_{jj}^w = Tiempo de caminata de la parada J hasta el destino j [min]
- FS_{jj}^w = Valor subjetivo del tiempo desde la parada J hasta el destino j
- Z_{ij} = Costes de viaje desde i hasta j [min]



Los factores subjetivos de percepción de los tiempos tienen la forma $\alpha + \beta * \exp(\delta * t)$, donde t es el tiempo en cuestión.

MARS diferencia el transporte público si este circula por vía exclusiva o no. Si el sistema comparte la infraestructura con el tráfico vehicular, en el modelo se conoce como el modo "bus"; pero si el sistema tiene vía exclusiva (como un metro o un carril-bus exclusivo), se conoce como "rail". Así, según la expresión característica de los factores subjetivos, en la Tabla 5 se muestran las constantes de los factores subjetivos según cada caso.

Constante	Acceso _{II}	Espera _I	Trasbordo _{IJ}	Salida _J
α	0,569179	0,787590	0,4985169	0,569179
β	0,274495	0,511118	0,5577460	0,274495
δ	0,34236	0,341750	0,317002	0,34236

Tabla 5. Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Bus
 Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

En la Tabla 6 se muestran las mismas constantes, pero en este caso para el modo conocido como rail.

Constante	Acceso _{II}	Espera _I	Trasbordo _{IJ}	Salida _J
α	0,572903	0,342126	0,194192	0,572903
β	0,299241	1,043380	0,926407	0,299241
δ	0,282115	1,043380	0,226000	0,282115

Tabla 6. Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Rail
 Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

$$Z_{ij}^{TP} = \frac{c_{ij}}{\alpha * Ing_i}$$

Ecuación 10. Factor de Fricción para los Costes de Viaje de Transporte Público
 Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

- c_{ij} = Coste de ir del origen i hasta el destino j [€/viaje]
- α = Factor de valor del tiempo (0.17)
- Ing_i = Ingreso por hogar [€/min]

Transporte Privado

Un viaje en transporte privado consta de las siguientes etapas (Figura 25):

- Tramo de caminata desde el origen hasta el lugar de aparcamiento

- Recorrido desde el aparcamiento hasta el destino
- Tiempo de búsqueda de aparcamiento
- Tramo de caminata desde el lugar de aparcamiento hasta el destino final

Al igual que en el transporte público, cada etapa del viaje en coche es percibido de forma diferente por los usuarios.

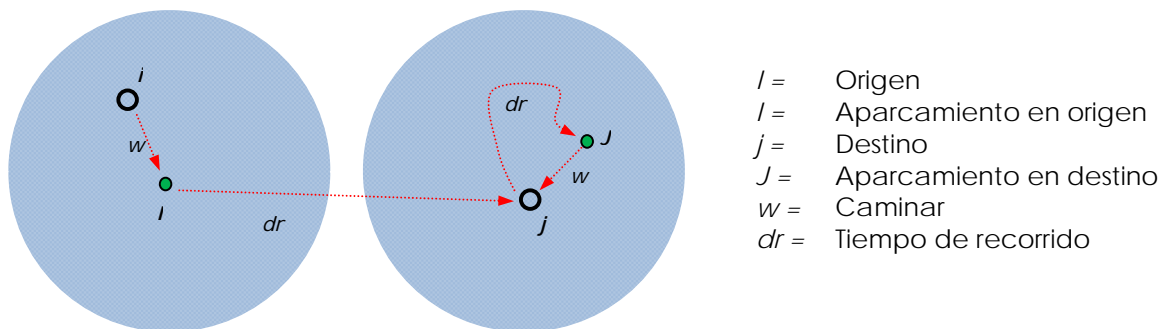


Figura 18. Etapas de un Viaje en Coche en MARS

Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

El factor de fricción para el coche viene dado por la expresión mostrada en la Ecuación 11.

$$f(t_{ij}^C, c_{ij}^C) = (t_{il}^w * FS_{il}^w + t_{lj}^{dr} + t_{jj}^{ps} * FS_{jj}^{ps} + t_{jj}^w * FS_{jj}^w) * FS_{ij}^C + {}^kZ_{ij}^C$$

Ecuación 11. Factor de Fricción para Transporte Privado

t_{ij}^w =	Tiempo de caminata del origen i al aparcamiento l [min]
FS_{il}^w =	Valor subjetivo de tiempo desde el origen i al aparcamiento l
t_{lj}^{dr} =	Tiempo de recorrido desde el aparcamiento l hasta el destino j [min]
t_{jj}^{ps} =	Tiempo de búsqueda de aparcamiento J [min]
FS_{jj}^{ps} =	Valor subjetivo del Tiempo de búsqueda de aparcamiento J
t_{jj}^w =	Tiempo de caminata el aparcamiento J hasta el destino j [min]
FS_{jj}^w =	Valor subjetivo del tiempo desde el aparcamiento J hasta el destino j
FS_{ij}^C =	Valor subjetivo adicional por percepción del tiempo de i a j
${}^kZ_{ij}$ =	Costes de viaje desde i hasta j causados por el componente k [min]

¹ Estos componentes son: costes de combustible, otros costes de operación, costes de aparcamiento, peajes urbanos, entre otros.



La expresión de los valores subjetivos es la misma que para el transporte público. De esta manera, en la Tabla 7 se muestran los valores de las constantes de dichos factores.

Constante	Acceso _{ii}	Búsqueda _j	Salida _j
α	1,00	2,00	2,00
β	0,0001	0,0001	0,0001
δ	0,800	0,800	0,800

Tabla 7. Constantes de los Valores Subjetivos de Percepción de Usuario – Coche
 Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

Para el factor subjetivo adicional, en la Ecuación 12 se muestra la expresión con la que se calcula.

$$FS_{ij}^C = 0.8507 * (1 - 0.7318e^{-0.1879 * D_{ij}})$$

Ecuación 12. Factor Subjetivo Adicional para el Coche

D_{ij} = Distancia de recorrido entre i y j [Km]

En lo referente a los costes que componen el factor de fricción (Ecuación 11), éstos están compuestos principalmente por los costes de operación y de aparcamiento tal como se muestra en la Ecuación 13. También se pueden adicionar otros costes de viaje, por ejemplo un peaje urbano.

$${}^kZ_{ij} = \frac{\text{parking } c_{ij}}{\alpha_{fuel} * \alpha_{parking} * Ing_i * F.O} + \frac{\text{operación } c_{ij}}{\alpha_{fuel} * Ing_i * F.O}$$

Ecuación 13. Factor de Fricción para los Costes de Viaje en Coche

${}^kC_{ij}$ = Costes por ir de i a j [€/viaje]
 Factor de disponibilidad a pagar
 ${}^k\alpha$ = (0.43 para el combustible y 0.769 para el aparcamiento)
 Ing_i = Ingreso por hogar [€/min]
 $F.O.$ = Factor de ocupación del coche [personas/coche]

7.1.2. El Modelo de Usos del Suelo

El modelo de usos del suelo consiste en dos submodelos de tipo LOGIT o gravitacional: el de localización residencial y el de localización de puestos de



trabajo. Cada uno de estos submodelos está a su vez conformado por cuatro partes:

- Un modelo de desarrollo
- Un modelo de disponibilidad a salir de una zona
- Un modelo de disponibilidad a entrar en una zona
- Un modelo de redistribución de oferta y demanda

Modelo de Localización Residencial

En este modelo en primera instancia, los posibles urbanizadores deciden cuándo y dónde construirán nuevas viviendas. La decisión dependerá de:

- El precio del alquiler de las viviendas una vez estén listas para ser ocupadas
- El precio del suelo en el año de la toma de la decisión de construir
- La disponibilidad de suelo en el año de la toma de la decisión de construir

Submodelo de Desarrollo de Viviendas

El desarrollo de nuevos domicilios (unidad de vivienda familiar) se describe según la Ecuación 14. Este modelo se basa en la premisa básica que hay un potencial general para desarrollar una cierta cantidad de viviendas $P^D(t-T)$ dentro de una zona en la iteración t . La cantidad inicial de viviendas a construir en la iteración 0 se debe definir externamente. En las siguientes iteraciones, el cálculo de nuevas viviendas se hace utilizando la Ecuación 25. La distribución espacial depende primero, del precio del alquiler, el cual se paga en el momento $(t-T)$ y como el precio del alquiler cambia según la Ecuación 26, éste será diferente del precio del año t . Segundo, la decisión de construir depende del precio del suelo en el momento $(t-T)$ (que es el momento en donde se toma la decisión). El precio del suelo también cambia de forma endógena, según la Ecuación 27. El número de viviendas es controlado por la disponibilidad de suelo, ya que si no hay suelo disponible, la decisión no se tomará. Se asume que los costes de construcción y mantenimiento son homogéneos por cada zona.

$$\Delta D_j(t) = P^D(t-T) * \frac{a^D * \frac{R_j^D(t-T)}{LP_j(t-T)} + b^D}{\sum_j a^D * \frac{R_j^D(t-T)}{LP_j(t-T)} + b^D}$$

Ecuación 14. Submodelo de Desarrollo Residencial



- $\Delta D_j(t)$ = Número de nuevas viviendas construidas disponibles en el mercado en la zona j en el tiempo t
 $P^D(t)$ = Cantidad de viviendas demandadas en el tiempo t y percibidas por los urbanizadores en el año $t-T$
 T = Periodo de tiempo en planear y construir las nuevas viviendas
 $R_j^D(t-T)$ = Alquiler mensual de una vivienda en la zona j en el tiempo $t-T$ [€]
 $LP_j(t-T)$ = Precio del suelo en la zona j en el tiempo $t-T$ [€/m²]
 a^D, b^D = Constates (obtenidas de análisis de regresiones de datos observados)

Submodelo de Oferta Residencial

El número de residentes que emigran de una zona j en la iteración t es calculado por la Ecuación 15. El número total de personas que se van de su lugar de residencia (ya sea por mudanza o por muerte) en la iteración t es estimada al dividir la población total por el tiempo medio de permanencia en una vivienda (Ecuación 16). La distribución espacial de estas personas que se mueven depende de la accesibilidad en coche, la cantidad de zonas verdes y el precio de la vivienda en la zona j . La accesibilidad en coche intenta reflejar la poca utilidad para el residente de vivir cerca a las grandes infraestructuras viales. Las zonas verdes son utilizadas como un indicador que aumenta la calidad de vida en dicha zona. El precio de la vivienda¹, obviamente, mide el coste de vivir en la zona de estudio. La forma básica de la Ecuación 15, fue obtenida con base en información recolectada en la ciudad de Viena.

$$N_j^{mv}(t) = P^{mv}(t) * \frac{a^{mv} * e^{b^{mv} * {}^{wp}Acc_j^C(t) + c^{mv} * ShGr_j(t) + d^{mv} * R_j^D(t)}}{\sum_j a^{mv} * e^{b^{mv} * {}^{wp}Acc_j^C(t) + c^{mv} * ShGr_j(t) + d^{mv} * R_j^D(t)}}$$

Ecuación 15. Submodelo Residencia de Salida de Zona

- $N_j^{mv}(t)$ = Número de residentes que se mueven de la zona j en el tiempo t
 $P^{mv}(t)$ = Potencial de movimiento de residentes en el tiempo t
 ${}^{wp}Acc_j^C$ = Accesibilidad a los puestos de trabajo en coche desde la zona j en el tiempo t
 $ShGr_j(t)$ = Zonas verdes en la zona j en el tiempo t
 $R_j^D(t)$ = Alquiler mensual (o hipoteca) de una vivienda en la zona j en el año t [€]
 $a^{mv}, b^{mv}, c^{mv}, d^{mv}$ = Constates (obtenidas de análisis de regresiones de datos observados y calibrados)

¹ MARS asume que la gente escoge una vivienda por el precio.



$$P^{mv}(t) = \frac{N^R(t)}{\Delta T^{mv}}$$

Ecuación 16. Potencial de Residentes que Salen de la Zona

$N^R(t)$ = Residentes en la zona de estudio en el tiempo t
 T^{mv} = Tiempo medio de permanencia en una vivienda

La cantidad de residentes que se mudan, las nuevas viviendas construidas y las viviendas desocupadas, vienen de la iteración anterior $t-1$, lo que da como resultado la oferta total de viviendas para la iteración t .

$$S_j^D(t) = \Delta D_j(t) * n_j^{HH}(t) + N_j^{mv}(t) + S_j^D(t-1) - N_j^{in}(t-1)$$

Ecuación 17. Oferta de Viviendas por Zona

$S_j^D(t)$ = Oferta de vivienda en la zona j en el tiempo t
 $n_j^{mv}(t)$ = Número de residentes por vivienda en la zona j en el tiempo t
 $N_j^{in}(t-1)$ = Número de gente que se mueve en la zona j en el tiempo t

$$S^D(t) = \sum_j S_j^D(t)$$

Ecuación 18. Oferta Total de Viviendas

$S^D(t)$ = Oferta total de vivienda en el tiempo t

Submodelo de Demanda Residencial

Inicialmente, el número total de persona que necesitan una vivienda en una zona en el año t es igual al número de personas que se mudan (Ecuación 16) más la población debida a la migración y al crecimiento natural (Ecuación 19). Las tasas de crecimiento de la población se definen como una variable exógena al modelo (Ecuación 20). Si la oferta de viviendas no es suficiente para satisfacer la demanda debida a las tasas de crecimiento externas, entonces, éstas tasa de crecimiento se verán restringidas (Ecuación 21 y Ecuación 22). La sobre demanda en la iteración t es almacenada y se acumula con el crecimiento externo de la iteración $t+1$ (Ecuación 28). Un aumento en el potencial de personas que se mudan dentro de la zona de estudio, estimula el desarrollo de nuevas actividades en las siguientes iteraciones (Ecuación 25).



$$P^{in,d}(t) = P^{mv}(t) + N^{gr}(t) = \sum_j N_j^{mv}(t) + N^{gr}(t)$$

Ecuación 19. Demanda de Viviendas

$P^{n,d}(t)$ = Cantidad total de viviendas requeridas en el tiempo t
 $N^{gr}(t)$ = Cambio en la población en el tiempo t

$$N^{gr}(0) = p^{gr}(0) * N^R(0)$$

Ecuación 20. Cambio en la Población en el Año 0

$p^{gr}(0)$ = Porcentaje en el cambio de población en el tiempo 0

$$DF^D(t) = \frac{P^{in,d}(t)}{S^D(t)}$$

Ecuación 21. Factor de Demanda Vivienda

$DF^D(t)$ = Factor de demanda de viviendas en el tiempo t

$$\text{Si } DF^D(t) > 1 \text{ entonces, } P^{in}(t) = \sum_j S_j^D(t) \text{ ó } P^{in}(t) = P^{in,d}(t)$$

Ecuación 22. Restricción de la Demanda

$P^n(t)$ = Demanda total de viviendas que se puede cubrir en el tiempo t

La distribución espacial de la gente que se muda dentro de nuevas zonas residenciales depende de la accesibilidad conjunta de coche y transporte público, de las zonas verdes y del precio de las viviendas (Ecuación 23). La accesibilidad en transporte público y coche refleja la utilidad de acceder a más oportunidades de empleo. Las zonas verdes, al igual en el submodelo anterior, indican la calidad de vida en una zona. El precio de la vivienda, mide el coste de vivir en una zona. La forma básica de la Ecuación 23, también fue obtenida de un análisis realizado en la ciudad de Viena.



$$N_j^{in}(t) = P^{in}(t) * \frac{\frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))}}{\sum_j \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))}}}$$

$$= P^{in}(t) * \frac{a^{in} * e^{b^{in} * wp Acc_j^{C,TP}(t) + ShGr_j(t) * (c^{in} * ShGr_j(t) + d^{in}) + e^{in} * R_j^D(t)}}{\sum_j a^{in} * e^{b^{in} * wp Acc_j^{C,TP}(t) + ShGr_j(t) * (c^{in} * ShGr_j(t) + d^{in}) + e^{in} * R_j^D(t)}}$$

Ecuación 23. Distribución de la Demanda por Viviendas

- $M_j^{in}(t)$ = Número de residentes que requieren una vivienda de la zona j en el tiempo t
- $A_j^{in}(t)$ = Atractividad para mudarse a la zona j en el tiempo t
- $f(Z_j^{in}(t))$ = Factor de fricción para moverse a la zona j en el tiempo t , causada por la impedancia Z
- $wp Acc_j^{C,TP}$ = Accesibilidad conjunta (coche y transporte público) a los puestos de empleo de una zona j en el tiempo t
- $ShGr_j(t)$ = Zonas verdes en la zona j en el tiempo t
- $R_j^D(t)$ = Alquiler mensual (o hipoteca) de una vivienda en la zona j en el año t [€]
- $a^{in}, b^{in}, c^{in}, d^{in}, e^{in}$ = Constates (obtenidas de análisis de regresiones de datos observados y calibrados)

Submodelo de Redistribución

La redistribución de las personas que se mudan es necesaria en el caso en que más gente quiera irse a una determinada zona donde la oferta de vivienda ya está copada. La Figura 19 y la Ecuación 24 muestran el proceso iterativo de la redistribución de la sobre demanda hacia zonas con oferta disponible.

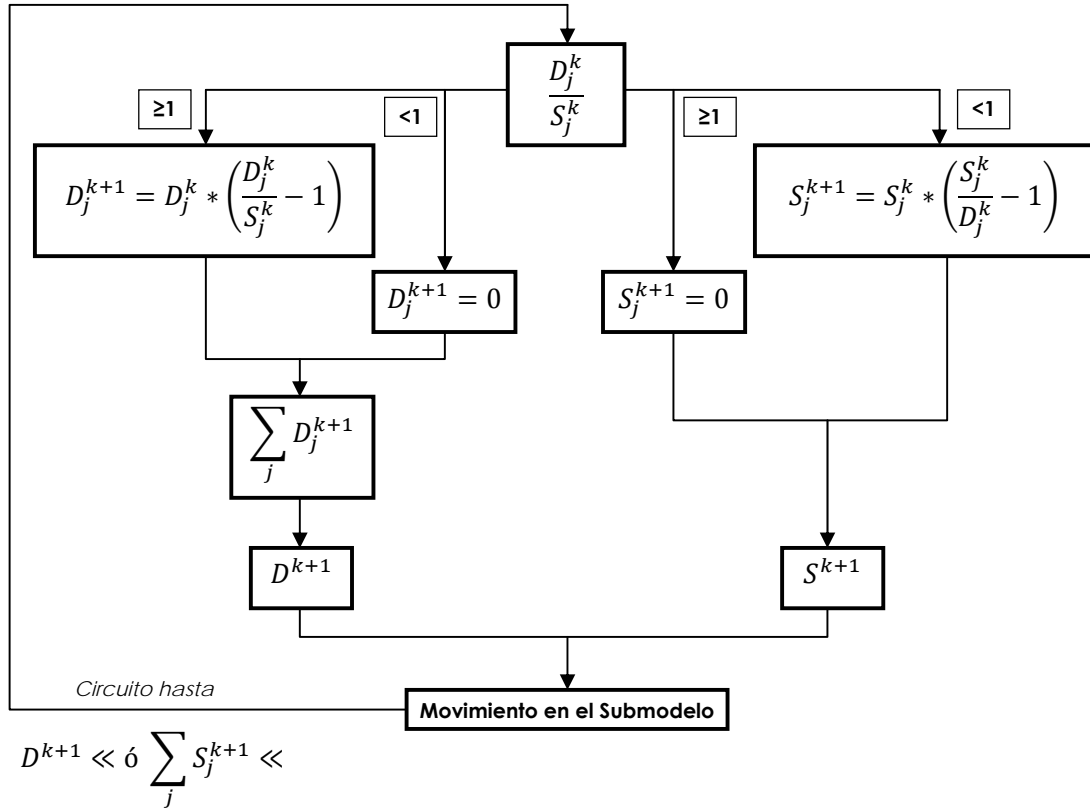


Figura 19. Diagrama de Redistribución de Zonas Residenciales

Fuente: The strategic, Dynamic and Integrated Urban Land Use and Transport Model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator)

- $k =$ Número de iteraciones en el proceso de redistribución
- $j =$ Subíndice de la zona
- $D =$ Cantidad de demanda de vivienda
- $S =$ Cantidad de oferta de vivienda

Calcular hasta $\forall N_j^{in}(t)_k \leq S_j^D(t)_k$

Si $N_j^{in}(t)_k > S_j^D(t)_k$ entonces,

$$P_j^{in}(t)_{k+1} = N_j^{in}(t)_k - S_j^D(t)_k \text{ y } \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))_{k+1}} = 0 \text{ ó}$$



$$P_j^{in}(t)_{k+1} = 0 \quad y \quad \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))_{k+1}} = \frac{A_j^{in}(t)}{f(Z_j^{in}(t))_k}$$

Siguiente k

Ecuación 24. Redistribución de la Sobredemanda en Vivienda

$k =$ Número de iteraciones en el proceso de redistribución

Después de cada iteración t , la cantidad de viviendas demandadas, así como su precio se adaptan de acuerdo a la situación de oferta/demanda (Ecuación 25 y Ecuación 26).

$$P^D(t + 1) = (P^D(t) + a) * (DF^D(t))^2$$

Ecuación 25. Relación entre el Potencial de Construcción y el Factor de Demanda

La evolución del precio de la vivienda depende del ratio de la demanda con la oferta del mercado inmobiliario residencial y los cambios en las intensidades de tráfico vehicular (Ecuación 26). Esta última tiene como objeto tratar de mostrar que el valor de las viviendas disminuye cuando se incrementan la polución y el ruido en la zona debido al tráfico vehicular.

$$R_j^D(t + 1) = R_j^D(t) * \frac{\alpha}{\beta + \gamma * e^{-\delta * DF_j^D(t) * \frac{\sum_i T_{ij}^C(t-1) + \sum_j T_{ij}^C(t-1)}{\sum_i T_{ij}^C(t) + \sum_j T_{ij}^C(t)}}$$

Ecuación 26. Relación entre el Alquiler, el Factor de Demanda y el Tráfico

$\alpha, \beta, \gamma, \delta =$ Constantes

Si una zona de estudio tiene poco suelo para desarrollar, su precio aumenta (Ecuación 27).

$$LP_j(t + 1) = LP_j(t) * e^{\left(\frac{ShGr_j(t-1)}{ShGr_j(t)} - 1\right)}$$

Ecuación 27. Relación entre el Precio del Suelo y las Zonas Verdes

La demanda externa sin satisfacer se acumula (Ecuación 28) y estimula la construcción debido al factor de demanda de viviendas.



$$N^{gr}(t + 1) = p^{gr}(t + 1) * N^{Res}(t) + (P^{in}(t) - S^D(t))$$

Ecuación 28. Demanda Externa para la Iteración Siguiete

Modelo de Localización de Puestos de Trabajo

Este modelo está dividido en dos partes: el sector de producción¹ y el de servicios². Su estructura básica es similar al modelo de localización residencial, excepto que acá no hay explícitamente un modelo de desarrollo. Negocios y empresas son vistos como sus propios desarrolladores, en este caso, de empleos. Los submodelos para el sector de servicios y producción son iguales con excepción de los parámetros en las ecuaciones de distribución. Los negocios de servicios se implementan más rápido que los del sector de producción.

Submodelo de Oferta de Espacio

MARS usa un modelo simple para estimar el movimiento de los puestos de empleo. La vida media de una empresa en una ubicación determinada se utiliza para estimar el porcentaje de negocios que cambian su sede en cada iteración (Ecuación 29). Este porcentaje se usa para calcular el número de empresas y puestos de empleo que se mueven a una zona (Ecuación 30). Al multiplicar la media de espacio disponible por los puestos de empleo dados, se tiene el espacio disponible por sector económico (Ecuación 31).

$$P_{mv}^s = \frac{1}{T_{mv}^s}$$

Ecuación 29. Porcentaje de Puestos de Trabajo que Salen de una Zona

- P_{mv}^s = Porcentaje de puestos de empleo por sector económico s que salen de una zona cada año
- T_{mv}^s = Media de tiempo en años en que una empresa por sector económico s se relocaliza o va a la bancarrota

$$\Delta N_j^{s,mv}(t) = N_j^s(t - 1) * p_{mv}^s$$

Ecuación 30. Puestos de Trabajo que Salen de una Zona

- $\Delta N_j^{s,mv}$ = Número de puestos de empleo en el sector s saliendo de la zona j en el tiempo t
- $N_j^s(t)$ = Puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo $t-1$

¹ Minería, manufacturas, energía, agua y construcción.
² Comercio en general, transporte, comunicaciones, servicios financieros, sector real, administración pública, educación, salud.



$$F_j^{s,u}(t) = \Delta N_j^{s,mv}(t) * F_j^s + F_j^{s,u}(t-1)$$

Ecuación 31. Espacio Disponible para Puestos de Trabajo

$F_j^{s,u}(t)$ = Espacio disponible para puestos de trabajo en el sector s en la zona j en el tiempo t

F_j^s = Espacio disponible por puesto de trabajo en el sector s en la zona j

Submodelo de Desarrollo y de Demanda de Espacio

El submodelo de movimiento de puestos de empleo hacia una zona es similar al residencial. El número potencial de nuevas empresas y de nuevos puestos de trabajo son variables exógenas que se definen para cada año. Las tasas de crecimiento se limitan si no existiese espacio para desarrollar las nuevas actividades. La distribución espacial de los nuevos puestos de trabajo depende de la disponibilidad de suelo, de su precio y de la accesibilidad en coche (Ecuación 32). El espacio en el cual se desarrollarán las nuevas actividades es calculada para cada zona por medio de la Ecuación 33.

$$\Delta N_j^{s,in}(t) = P^s(t) * \frac{\frac{A_j^{s,in}(t)}{f(Z_j^{s,in}(t)})}{\sum_j \frac{A_j^{s,in}(t)}{f(Z_j^{s,in}(t))}}$$

$$= P^s(t) * \frac{e^{(a^s + b^s * AvLd_j(t) + c^s * {}^{wp}Acc_j^C(t) + d^s * LP_j(t))} - 1}{\sum_j e^{(a^s + b^s * AvLd_j(t) + c^s * {}^{wp}Acc_j^C(t) + d^s * LP_j(t))} - 1}$$

Ecuación 32. Submodelos de Localización de Puestos de Empleo

- $\Delta N_j^{s,in}(t)$ = Número de puestos de empleo en el sector s moviéndose a la zona j en el tiempo t
- $A_j^{s,in}(t)$ = Atractividad de un el sector s moviéndose a la zona j en el tiempo t
- $f(Z_j^{s,in}(t))$ = Factor de fricción del sector s moviéndose a la zona j en el tiempo t causada por la impedancia Z
- $AvLd_j(t)$ = Suelo disponible en la zona j en el tiempo t
- ${}^{wp}Acc_j^C(t)$ = Accesibilidad en coche a los puestos de empleo en la zona j en el tiempo t
- $LP_j(t)$ = Precio del suelo en la zona j en el tiempo t
- a^s, b^s, c^s, d^s = Constantes



$$P^s(t+1) = N^s(t) * (p^s(t) - p_{mv}^s)$$

Ecuación 33. Número Potencial de Puestos de Empleo a Ubicar

$P^s(t+1)$ = Puestos de empleo potenciales a localizar en el sector s en el tiempo $t+1$
 $P^s(t)$ = Porcentaje del cambio externo de los puestos de empleo en el sector s en el tiempo t

$$\Delta N_j^s(t) = \Delta N_j^{s,in}(t) - \Delta N_j^{s,mv}(t)$$

Ecuación 34. Cambio en los Puestos de Empleo por Zona

$\Delta N_j^s(t)$ = Cambio en los puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo t

$$F_j^{s,dv}(t) = \Delta N_j^{s,mv}(t) * F_j^s - F_j^{s,u}(t)$$

Ecuación 35. Espacio Disponible para Puestos de Empleo

$F_j^{s,dv}(t)$ = Espacio a desarrollar para puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo t

Si $F_j^{s,av}(t) < \Delta N_j^s(t) * F_j^s$, entonces

$$\Delta N_j^{s,in}(t) = \frac{F_j^{s,dv}(t)}{F_j^s} \quad y \quad F_j^{s,dv} = 0 \quad y \quad \left(\frac{A_j^{s,in}(t)}{f(Z_j^{s,in}(t))} \right)_k = 0$$

$$F_j^{s,av}(t)_k = F_j^{s,av}(t)_{k-1} - \Delta N_j^{s,in}(t) * F_j^s$$

Ecuación 36. Limitación al Desarrollo de Puestos de Empleo por Disponibilidad de Espacio

k = Número de la iteración
 $F_j^{s,av}(t)$ = Espacio disponible para ser desarrollado para puestos de empleo en el sector s en la zona j en el tiempo t
 $F_j^s(t)$ = Espacio disponible para puestos de empleo en el sector s en la zona j

$$\text{Calcular hasta } P^s(t) - \sum_j \Delta N_j^{s,in}(t)_k < 100 \quad \text{ó} \quad \sum_j \Delta N_j^{s,dv}(t)_k = 0$$

$$P^{s,re}(t)_{k+1} = P^s(t) - \sum_j \Delta N_j^{s,in}(t)_k \quad y$$



Calcular ecuaciones 31 a 34

$$\Delta N_j^{s,in}(t) = \Delta N_j^{s,in}(t)_k + \Delta N_j^{s,in}(t)_{k-1}$$

Hacer de nuevo (loop)

Ecuación 37. Redistribución de la Sobre Demanda para el Espacio de Puestos de Trabajo

$P_{s,re}(t)_k =$ Número de puestos de empleo a redistribuir en el sector s en el tiempo t

En resumen, en MARS se trabaja con una tasa constante de generación de viajes con motivo casa-trabajo-casa y un presupuesto de tiempo de viaje constante. La distribución zonal y modal de estos viajes se hace simultáneamente.

El modelo de usos del suelo está formado por dos partes principales: el de zonas residenciales y el de puestos de empleo. Ambos comparten la misma estructura básica. Esta estructura consiste en un submodelo de desarrollo, uno de actividades y otro de redistribución. En general, estos modelos son del tipo LOGIT.

7.2. El Modelo en el Entorno Vensim®

Vensim es una herramienta gráfica de creación de modelos de simulación que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de Dinámica de Sistemas. Vensim permite crear modelos de simulación, sean con diagramas causales o con diagramas de flujos.

Las relaciones entre los elementos del sistema representan las relaciones causales, que se muestran mediante la conexión de palabras con flechas. Esta información se usa después por el Editor de Ecuaciones para crear el modelo de simulación. Se puede analizar el modelo en el proceso de construcción teniendo en cuenta las causas y el uso de las variables, y también estudiando los ciclos relacionados con una variable.

Este aparte tiene como fin la introducción al modelo MARS funcionando sobre programa Vensim, mostrando las características fundamentales del modelo, donde se puede construir, examinar y modificar las ecuaciones del modelo, según la necesidad que se tenga. MARS puede modificarse, mejorarse y adaptarse si es necesario, para mostrar un nivel distinto de detalle y complejidad.

Vensim muestra las salidas de la simulación en un solo paso, permitiendo ver los resultados de la simulación al instante, para todas las variables del modelo. Durante la simulación, el comportamiento dinámico de todas las variables del



modelo se va guardando en una base de datos con el nombre que se le haya dado a la simulación. También se puede seleccionar cualquier variable y analizarla con las herramientas de análisis.

En las páginas siguientes se muestran algunos de los desarrollos realizados en Vensim del modelo MARS. Las variables del modelo están construidas según los criterios vistos en el numeral 6.

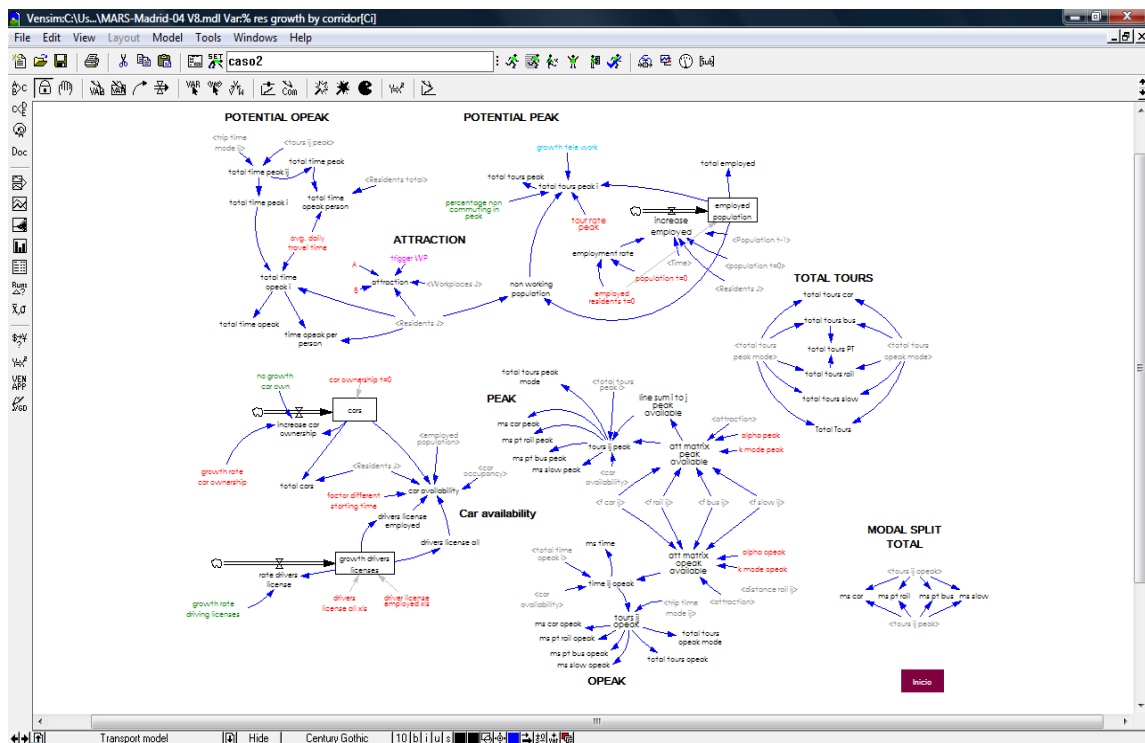


Figura 20. Estructura del Modelo de Transportes

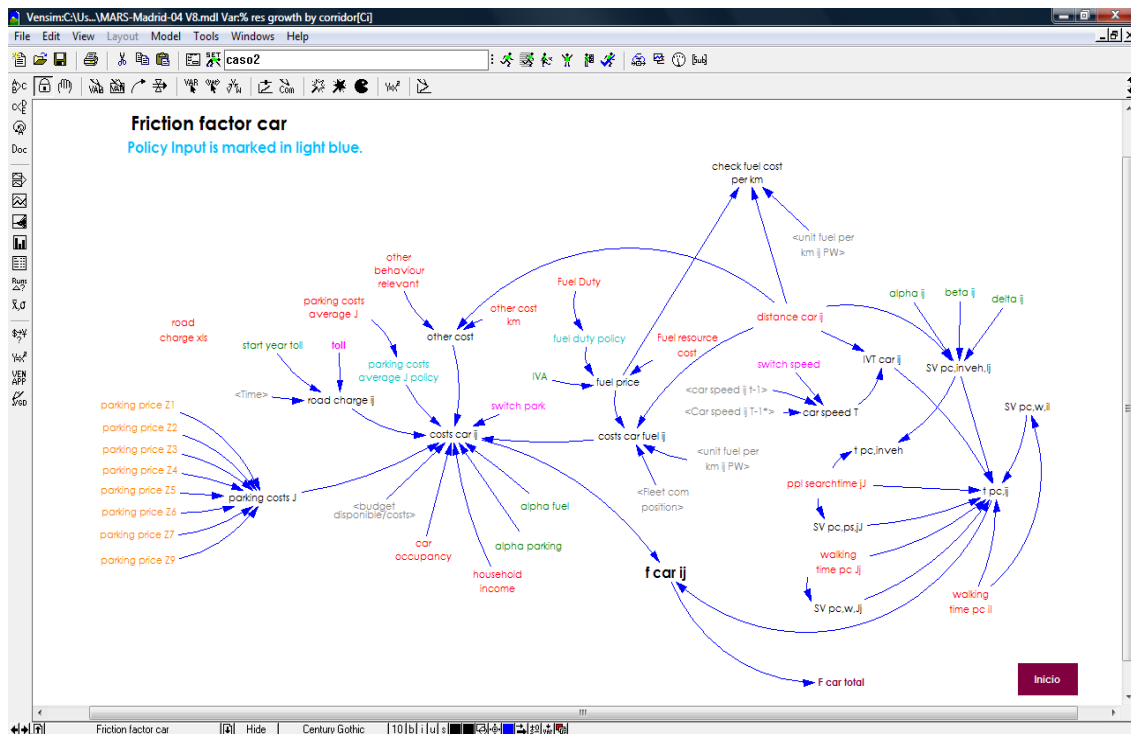


Figura 21. Cálculo de la Fricción del Modo Coche

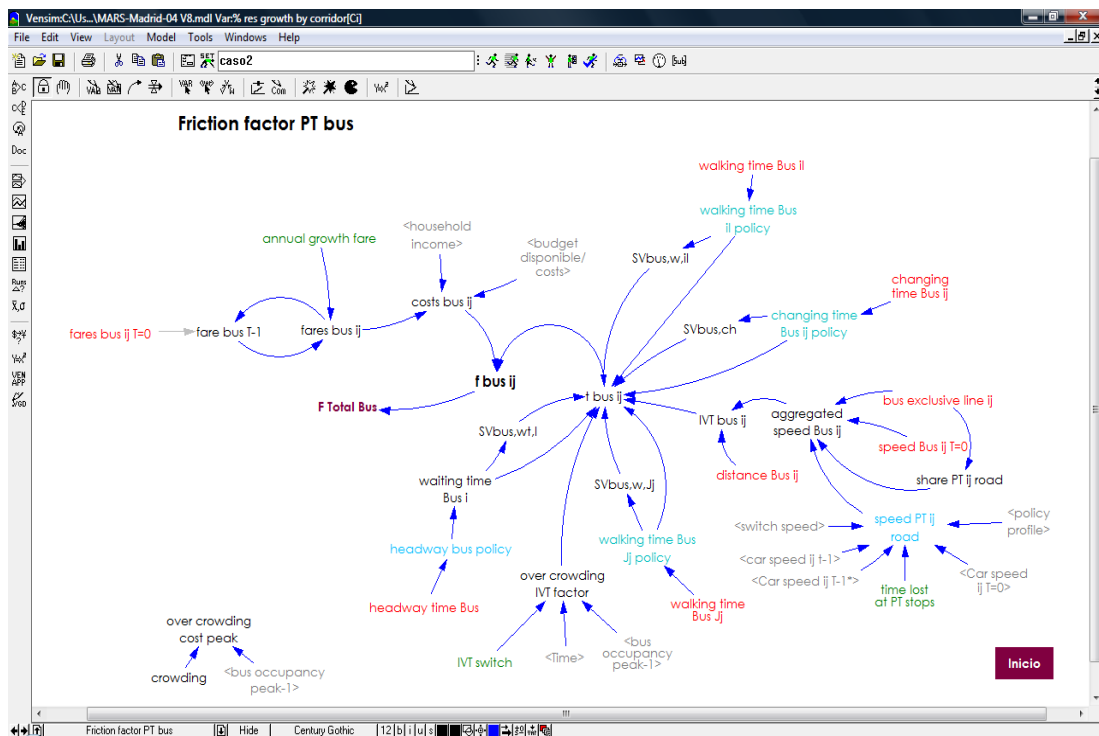


Figura 22. Cálculo de la Fricción del Modo Bus

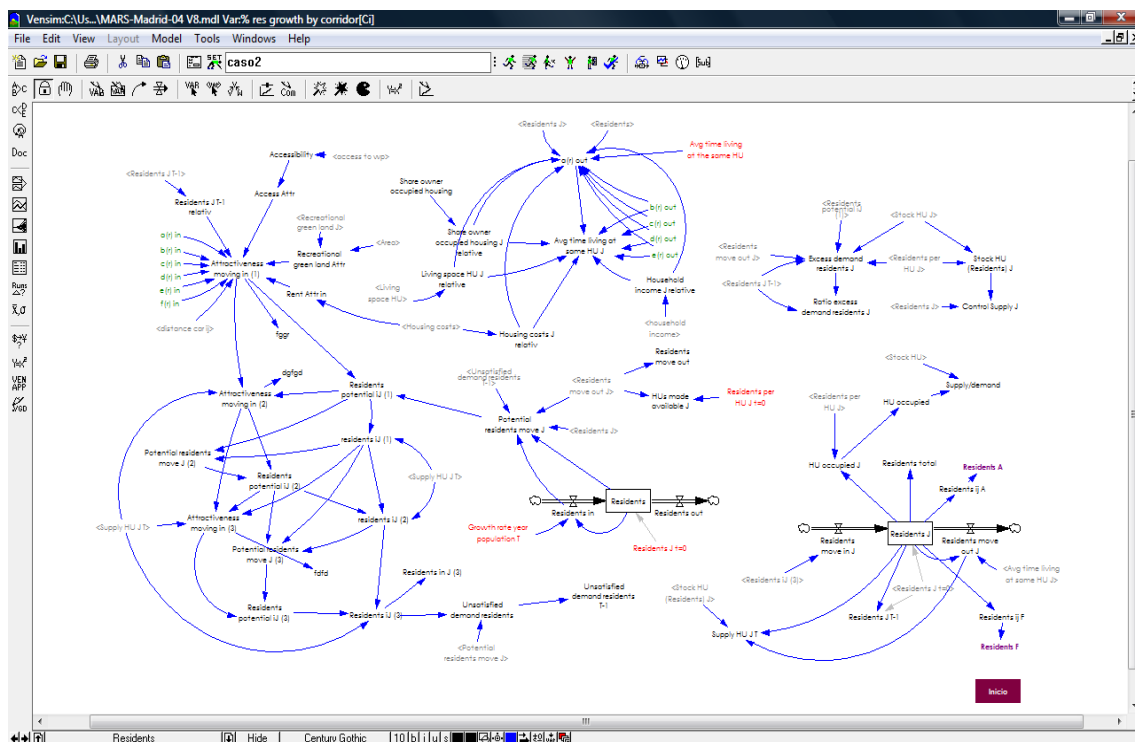
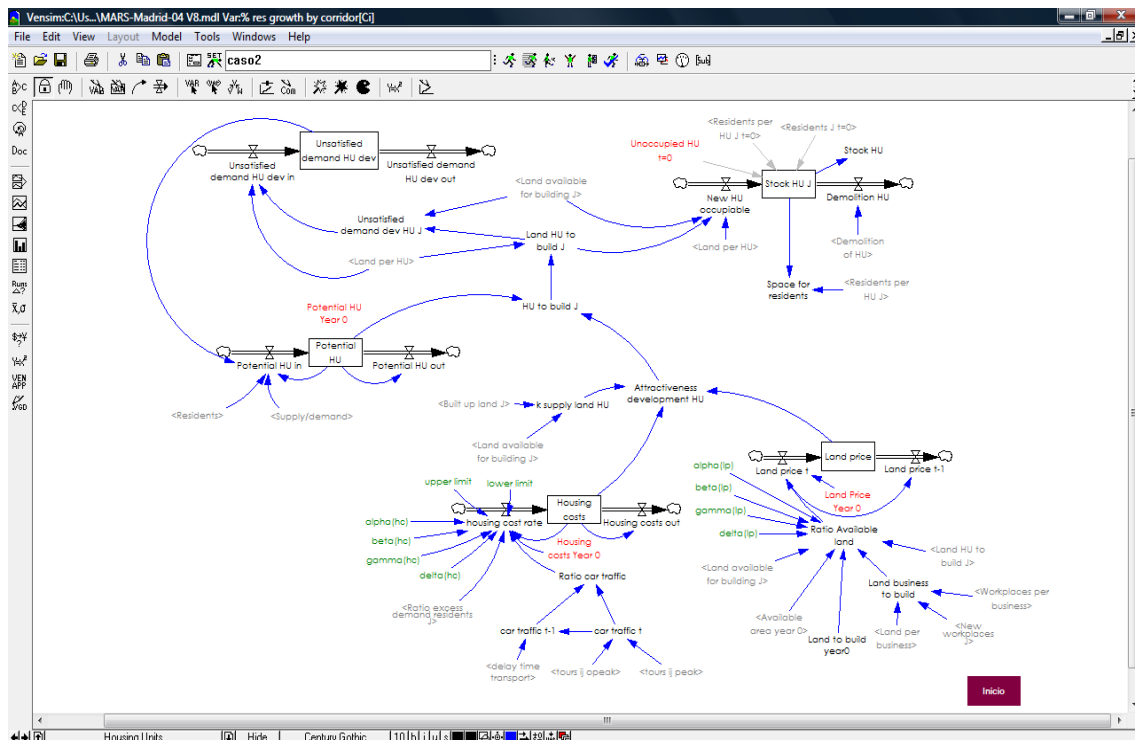


Figura 23. Estructura del Modelo de Localización Residencial

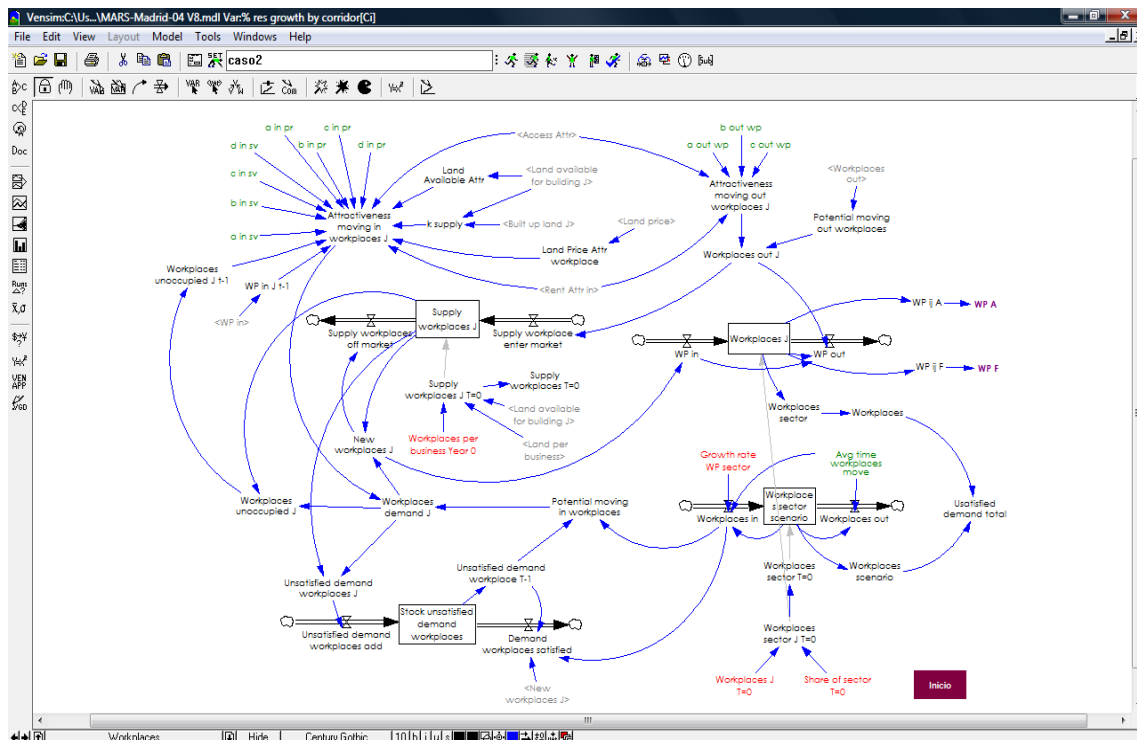


Figura 24. Estructura del Modelo de Localización de Empleos

7.3. MARS en Madrid

Una vez conocido el funcionamiento básico del modelo, el paso siguiente es aplicarlo y adaptarlo al caso que interesa, en este caso la Comunidad de Madrid.

Para empezar, se realizó la zonificación de Madrid necesaria para poder utilizar el modelo. En la Figura 25 se muestra la zonificación propuesta. Esta zonificación se realizó tratando de agrupar las zonas bajo territorios homogéneos en cuando a población, condiciones socioeconómicas, territorio y movilidad. Un factor también muy importante fue la disponibilidad de información, así como su nivel de agregación, así que en lo referente al municipio de Madrid se trabajó como unidad básica los distritos. Fuera de este ámbito, se trabajó a nivel de municipios y en zonas alejadas y poco pobladas se trabajó con una agregación de municipios.

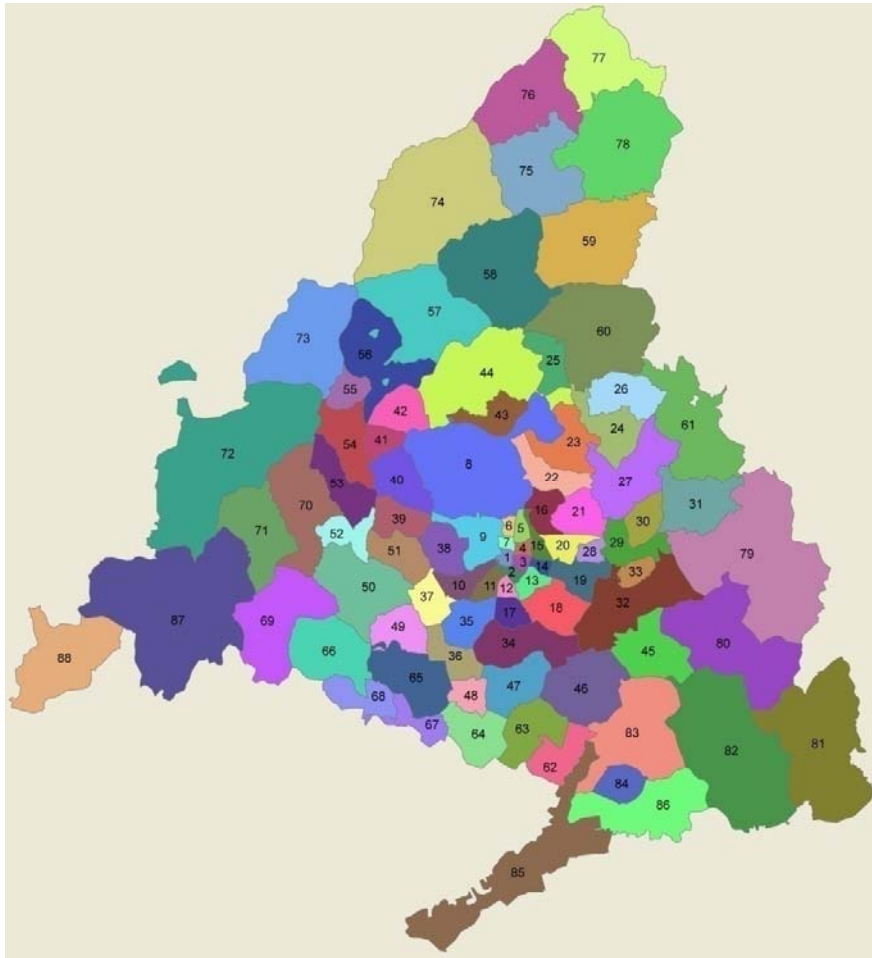


Figura 25. Zonas MARS Propuestas para Madrid
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se muestra una tabla donde se encuentran la zonificación propuesta para el modelo MARS.



NOMBRE	EDM04	CORONA	MARS	NOMBRE	EDM04	CORONA	MARS	NOMBRE	EDM04	CORONA	MARS
Centro	1001	1	1	Manzanares el Real	1093	4	57	Lozoyuela-Navas-Sieteiglesias	1122	4	75
Arganzuela	1002	1	2	Soto del Real	1111	4	57	La Acebeda	1071	4	76
Refiro	1003	1	3	Bustarviejo	1078	4	58	Braojos	1076	4	76
Salamanca	1004	1	4	Guadalix de la Sierra	1087	4	58	Gascones	1086	4	76
Chamartín	1005	1	5	Miraflores de la Sierra	1094	4	58	Navarredonda	1098	4	76
Tetuán	1006	1	6	Navalafuente	1097	4	58	Piñuecar	1102	4	76
Chamberí	1007	1	7	Valdemanco	1115	4	58	Serna del Monte	1109	4	76
Fuencarral-El Pardo	1008	2	8	El Berrueco	1075	4	59	Villavieja de Salvanés	1121	4	76
Moncloa-Aravaca	1009	2	9	Cabanillas de la Sierra	1079	4	59	La Hiruela	1088	4	77
Lafina	1010	2	10	La Cabrera	1080	4	59	Horcajo de la Sierra	1089	4	77
Carabanchel	1011	2	11	Patones	1099	4	59	Horcajuelo de la Sierra	1090	4	77
Usera	1012	2	12	Redueña	1106	4	59	Madarcos	1092	4	77
Puente Vallecas	1013	2	13	Torreaguna	1113	4	59	Montejo de la Sierra	1096	4	77
Moratalaz	1014	2	14	Torremocha del Jarama	1114	4	59	Robregordo	1108	4	77
Ciudad Lineal	1015	2	15	Venturada	1120	4	59	Somosierra	1110	4	77
Hortaleza	1016	2	16	El Molar	1095	4	60	El Atazar	1073	4	78
Villaverde	1017	2	17	Pedrezuela	1100	4	60	Berzosa del Lozoya	1074	4	78
Villa de Vallecas	1018	2	18	Talamanca del Jarama	1112	4	60	Cervera de Buitrago	1082	4	78
Vicálvaro	1019	2	19	Valdepiélagos	1117	4	60	Prádena del Rincón	1103	4	78
San Blas	1020	2	20	Valdetorres de Jarama	1118	4	60	Puebla de la Sierra	1104	4	78
Barajas	1021	2	21	El Vellón	1119	4	60	Robledillo de la Jara	1107	4	78
Alcobendas	1022	3	22	Camarma de Esteruelas	1150	4	61	Puentes Viejas	1123	4	78
San Sebastián de los Reyes	1027	3	23	Fresno de Torote	1157	4	61	Ambite	1146	4	79
Algete	1023	3	24	Meco	1159	4	61	Anchuelo	1147	4	79
Cobeña	1024	3	24	Ribatejada	1167	4	61	Corpa	1154	4	79
San Agustín de Guadalix	1026	3	25	Valdeavero	1173	4	61	Nuevo Baztán	1161	4	79
Fuente el Saz de Jarama	1083	4	26	Ciempozuelos	1031	3	62	Olmeda de las Fuentes	1162	4	79
Valdeolmos-Alalpardo	1116	4	26	Valdemoro	1045	3	63	Pezuela de las Torres	1165	4	79
Ajalvir	1046	3	27	Torrejón de la Calzada	1043	3	64	Sanторcaz	1168	4	79
Daganzo de Arriba	1050	3	27	Torrejón de Velasco	1044	3	64	Santos de la Humosa	1169	4	79
Paracuellos	1053	3	27	Arroyomolinos	1030	3	65	Torres de la Alameda	1171	4	79
Coslada	1049	3	28	Griñón	1034	3	65	Valverde de Alcalá	1176	4	79
San Fernando de Henares	1055	3	29	Humanes	1035	3	65	Villalbilla	1177	4	79
Torrejón de Ardoz	1056	3	30	Moraleja de En Medio	1037	3	65	Villar del Olmo	1179	4	79
Alcalá de Henares	1047	3	31	Navalcarnero	1039	3	66	Campo Real	1151	4	80
Loeches	1051	3	32	Casarrubuelos	1129	4	67	Carabaña	1152	4	80
Rivas-Vaciamadrid	1054	3	32	Cubas de la Sagra	1132	4	67	Orusco de Tajuña	1163	4	80
Velilla de San Antonio	1057	3	32	Serranillos del Valle	1138	4	67	Pozuelo del Rey	1166	4	80
Mejorada del Campo	1052	3	33	El Álamo	1124	4	68	Valdilecha	1175	4	80
Getafe	1033	3	34	Botres	1127	4	68	Brea de Tajo	1149	4	81
Leganés	1036	3	35	Sevilla la Nueva	1139	4	69	Estremera	1156	4	81
Fuenlabrada	1032	3	36	Villamanta	1143	4	69	Fuentidueña de Tajo	1158	4	81
Alcorcón	1029	3	37	Villamanilla	1144	4	69	Valdaracete	1172	4	81
Pozuelo de Alarcón	1065	3	38	Villanueva de Perales	1145	4	69	Belmonte de Tajo	1148	4	82
Majadahonda	1064	3	39	Quijorna	1193	4	70	Perales de Tajuña	1164	4	82
Las Rozas de Madrid	1066	3	40	Valdemorillo	1198	4	70	Tielmes	1170	4	82
Torreleadones	1067	3	41	Fresnedillas del Valle	1187	4	71	Valdelaguna	1174	4	82
Hoyo de Manzanares	1063	3	42	Navalagamella	1192	4	71	Villamanrique de Tajo	1178	4	82
Tres Cantos	1028	3	43	El Escorial	1186	4	72	Villarejo de Salvanés	1180	4	82
Colmenar Viejo	1025	3	44	Robledo de Chavela	1194	4	72	Chinchón	1155	4	83
Arganda del Rey	1048	3	45	San Lorenzo del Escorial	1195	4	72	Morata de Tajuña	1160	4	83
San Martín de la Vega	1042	3	46	Santa María de la Alameda	1196	4	72	Villacanejos	1141	4	84
Pinto	1041	3	47	Valdeanueva	1197	4	72	Aranjuez	1126	4	85
Parla	1040	3	48	Zarzalejo	1199	4	72	Titulcia	1140	4	85
Móstoles	1038	3	49	Alpedrete	1181	4	73	Colmenar de Oreja	1153	4	86
Brunete	1059	3	50	Cercedilla	1184	4	73	Aldea del Fresno	1125	4	87
Villaviciosa de Odón	1070	3	50	Collado Mediano	1185	4	73	Colmenar de Arroyo	1131	4	87
Boadilla del Monte	1058	3	51	Guadarrama	1188	4	73	Chapinería	1133	4	87
Villanueva de la Cañada	1068	3	52	Los Molinos	1189	4	73	Navas del Rey	1134	4	87
Colmenarejo	1060	3	53	Navacerrada	1191	4	73	Pelayos de la Presa	1135	4	87
Villanueva del Pardillo	1069	3	53	Alameda del Valle	1072	4	74	San Martín de Valdeiglesias	1137	4	87
Galapagar	1062	3	54	Canencia	1081	4	74	Villa del Prado	1142	4	87
Collado Villalba	1061	3	55	Lozoya	1091	4	74	Cadalso de los Vidrios	1128	4	88
Becerril de la Sierra	1182	4	56	Pinilla del Valle	1101	4	74	Cenicientos	1130	4	88
El Boalo	1183	4	56	Rascafría	1105	4	74	Rozas de Puerto Real	1136	4	88
Moralzarzal	1190	4	56	Buitrago del Lozoya	1077	4	75	Fuera de la Comunidad	1200	5	100
Manzanares el Real	1093	4	57	Garganta de los Montes	1084	4	75				
Soto del Real	1111	4	57	Gargantilla del Valle	1085	4	75				

Tabla 8. Zonas MARS
Fuente: Elaboración propia.



7.3.1. Información Requerida por el Modelo

El modelo MARS necesita una gran cantidad de información socioeconómica, de movilidad y estadística de la Comunidad de Madrid para su funcionamiento. De la calidad de ésta dependerá la fiabilidad de los resultados.

En general, esta es la información básica necesaria para alimentar el modelo, en algunos casos se han hecho supuestos y estimaciones debido a que no se disponen de ciertos datos muy específicos, sin embargo, a medida que avance el proceso de calibración se irá ajustando los valores.

Adicionalmente y como una herramienta de gran utilidad para alimentar MARS, se está trabajando con un modelo completo de toda la red de transporte principal de la Comunidad de Madrid bajo el modelo Visum. Esta red incluye las vías principales (con sus rutas de buses urbanos e interurbanos) y toda la red de metro y cercanías. Este modelo nos proporciona información muy útil relacionada con los tiempos de viaje y de espera, las distancias recorridas por modo, entre otros datos. El modelo Visum está mucho más desagregado que MARS, razón por la cual realizamos un proceso de agregación de la información basados en la población de cada zona y en las distancias de recorrido.

7.4. Calibración del Modelo de Transporte

El proceso de calibración consiste en ajustar los valores que el modelo utiliza como variables externas. En primer lugar, MARS considera el viaje casa-trabajo como un desplazamiento y lo calcula en función del número de puestos de trabajo de cada zona. De esta manera, el primer dato a calibrar es la tasa de viajes por persona con motivo casa-trabajo.

Otros aspectos de la calibración consisten en los parámetros de fricción de los cuatro modos de transporte considerados dentro del modelo, sus costes de tiempo y de operación (en el caso de modos motorizados), disponibilidad de coche, así como los factores de hora punta por modo, tal como se vio en el numeral 7.1.1.

7.4.1. Generación de Viajes

Según la Ecuación 2, la tasa de generación de viajes que utiliza MARS depende del número de empleados de la zona i . De esta manera al disponer de los datos de viajes realizados (EDM04) con motivo trabajo y de las personas empujadas por zona MARS (EDM04); por el método de los mínimos cuadrados, en Excel se minimiza la suma de la diferencia de los errores al cuadrado y por medio de la función "buscar objetivo" se obtiene un valor para r . Esta constante estima los viajes/día por persona que tendrá en cuenta MARS para generar los viajes. El resultado en este caso fue $r=0,9901$. En la Figura 26 se muestra la dispersión de los datos y su línea de tendencia.

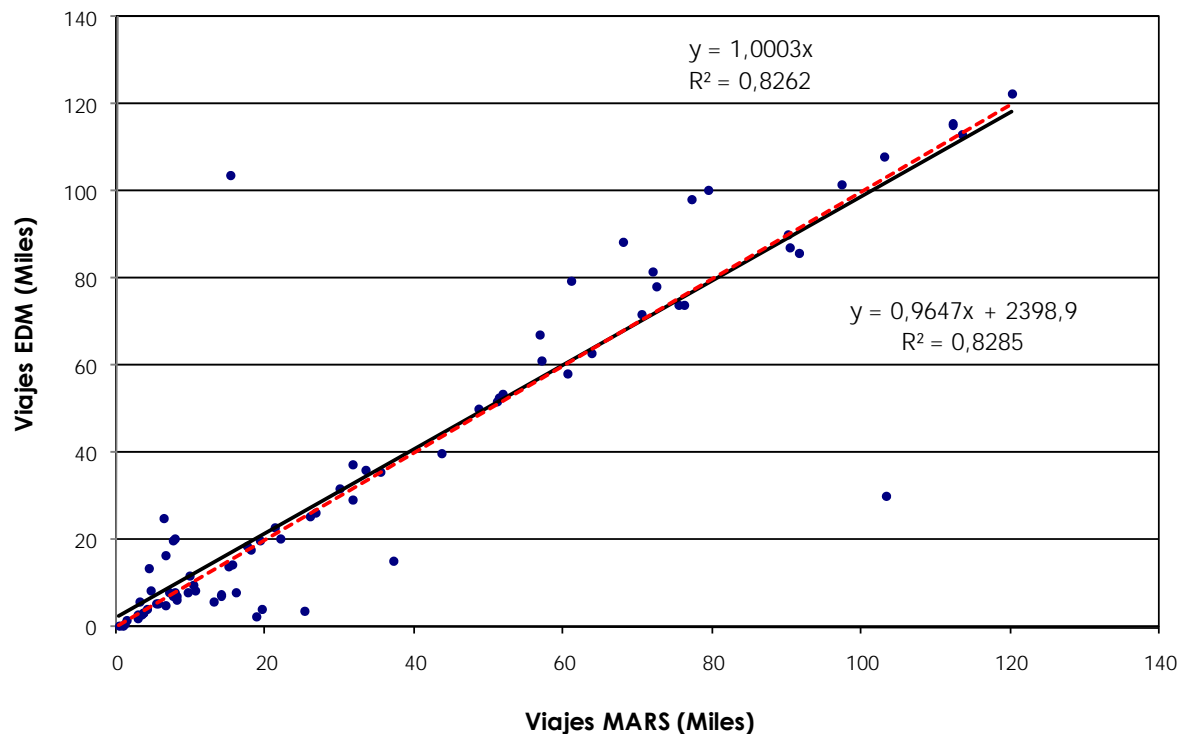


Figura 26. Calibración de la Tasa de Viajes r
Fuente: Elaboración propia.

Al comparar para cada zona los viajes reales observados por la encuesta de movilidad del 2004 con los viajes generados por el modelo (r^*E_i), se observa que se obtiene un resultado bastante aceptable, donde el gradiente de 0,96 es una cifra satisfactoria y el coeficiente de correlación R^2 , también es bastante bueno (83%).

Esta tasa de generación de viajes r , es utilizada por MARS para generar los viajes realizados por motivo casa-trabajo-casa en cada una de sus iteraciones. Para los otros viajes, se utiliza el tiempo restante que le quedaría a cada usuario después, según el presupuesto de viaje, de que éste haya realizado sus recorridos al trabajo.

7.4.2. Atractividad

Para los viajes con motivo casa-trabajo-casa, la atractividad consiste en el número de puestos de empleo que tenga cada zona. El modelo con el que se estima la atractividad es una expresión lineal (Ecuación 38) y para obtener los parámetros α y β , se realizó una regresión lineal tal como se muestra en la Figura 27.



$$A_j = \alpha * PE_j + \beta$$

Ecuación 38. Atractividad C-T

A_j = Atractividad de la zona j
 PE_j = Cantidad de puestos de empleo en la zona j
 α, β = Constantes

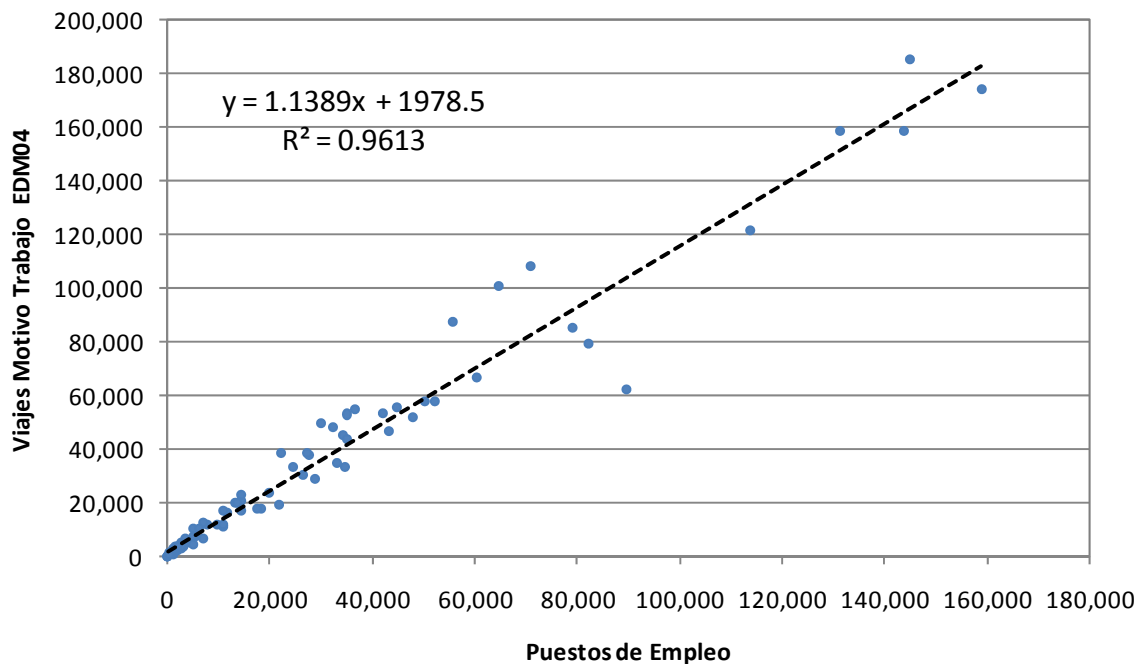


Figura 27. Calibración de las Factores de Atractividad Viajes C-T
 Fuente: Elaboración propia.

De la figura se obtienen los siguientes datos: $\alpha=1,139$ y $\beta=1.978$.

7.4.3. Distribución de Viajes

La distribución de viajes el modela la hace según la Ecuación 6 vista anteriormente. Esta ecuación reparte los viajes por zonas y por modos simultáneamente. Sin embargo, esta distribución debe calibrarse para que los patrones de viaje del modelo sean lo más parecidos a los observados en la encuesta de movilidad (EDM04). De esta manera, se introdujeron los factores k y α , con el fin de afinar la distribución modal y la distancia media recorrida, respectivamente, por cada modo de transporte. Los factores a calibrar se muestran en la Ecuación 39.



$$T_{ij}^m = P_i \left[\frac{\frac{m_k * A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)^{m_\alpha}}}{\sum_j \frac{m_k * A_j}{f(t_{ij}^m, c_{ij}^m)^{m_\alpha}}} \right]$$

Ecuación 39. Factores de Calibración para la Distribución de Viajes

- m_k = Factor de distribución modal
- m_α = Factor de distribución zonal

Calibrar esta ecuación es una tarea complicada debido a la gran variación que se presenta en la sumatoria del denominador, lo que hace la fórmula bastante sensible a cualquier cambio, especialmente a los valores de α . Por esta razón, se construyeron dos pequeños modelos adicionales en Vensim con el fin de calibrar los parámetros α y k en los periodos peak y off peak, respectivamente. En la Figura 28 y la Figura 29 se pueden ver esos modelos.

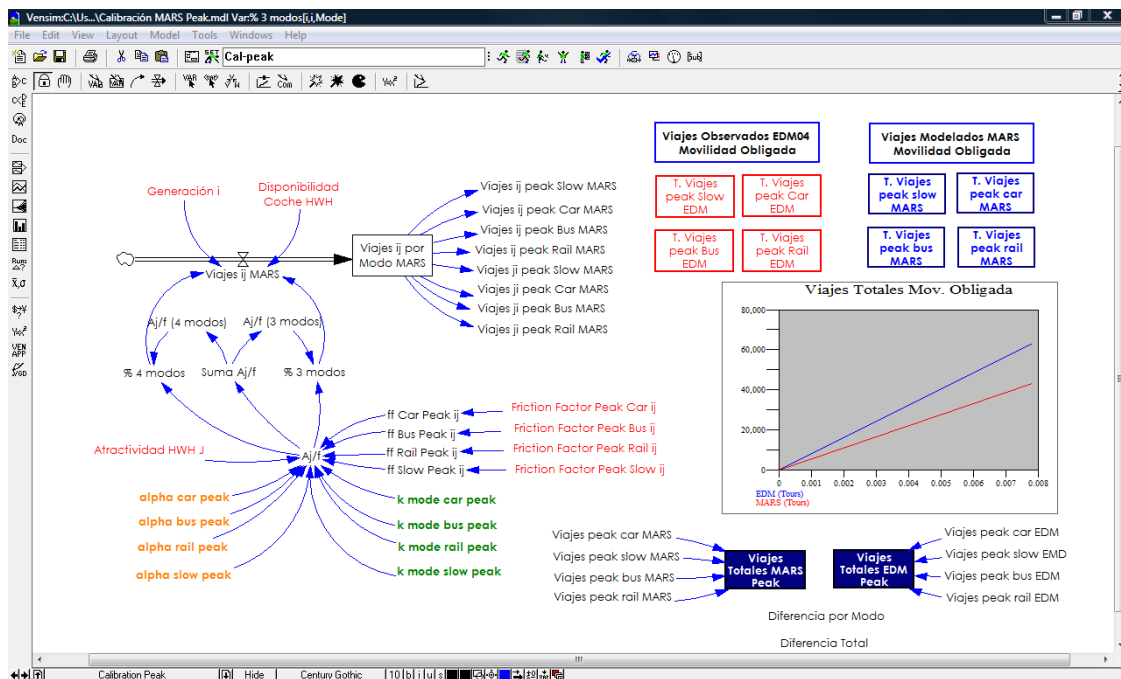


Figura 28. Modelo de Calibración MARS en Vensim (periodo peak)

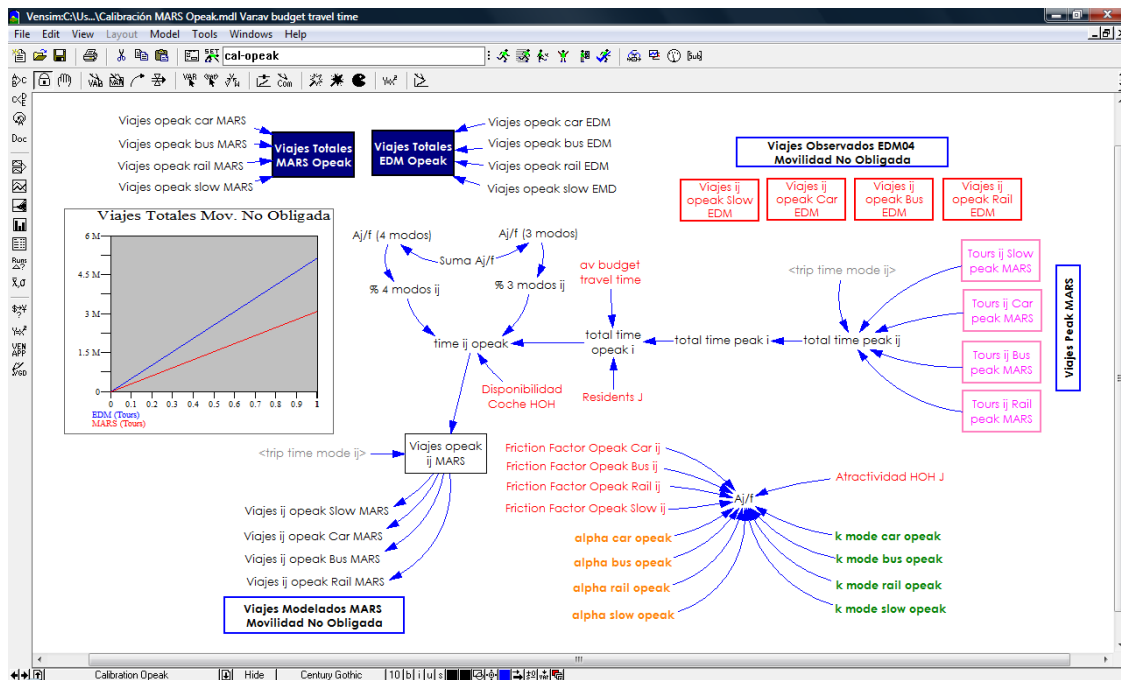


Figura 29. Modelo de Calibración MARS en Vensim (periodo off peak)

La calibración del modelo de transporte se realizó utilizando el módulo de optimización de Vensim. Esto se realizó comparando los resultados del modelo en cada modo de transporte con los datos disponibles en la encuesta de movilidad EDM04, tratando de minimizar las diferencias para cada par OD, variando los parámetros α y k .

Después de varias iteraciones, en la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos después de la calibración.

Modo	α	k
Slow Mode	1,002	1,01
Bus	1,137	0,99
Rail	1,033	0,99
Coche	1,025	0,99

Tabla 9. Factores de Calibración Viajes Casa-Trabajo
 Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 30 se muestran los resultados de la calibración para el total de viajes. El número de viajes motivo trabajo es calculado por el modelo (para el año base) utilizando la tasa de generación r y los puestos de empleo (ver numeral 7.4.1) y se comparan con los viajes observados (motivo trabajo) según la encuesta domiciliaria EDM04. En general se muestran unos resultados



bastante satisfactorios, con un gradiente muy cercano a 1,00 y un coeficiente de correlación R² de 86%.

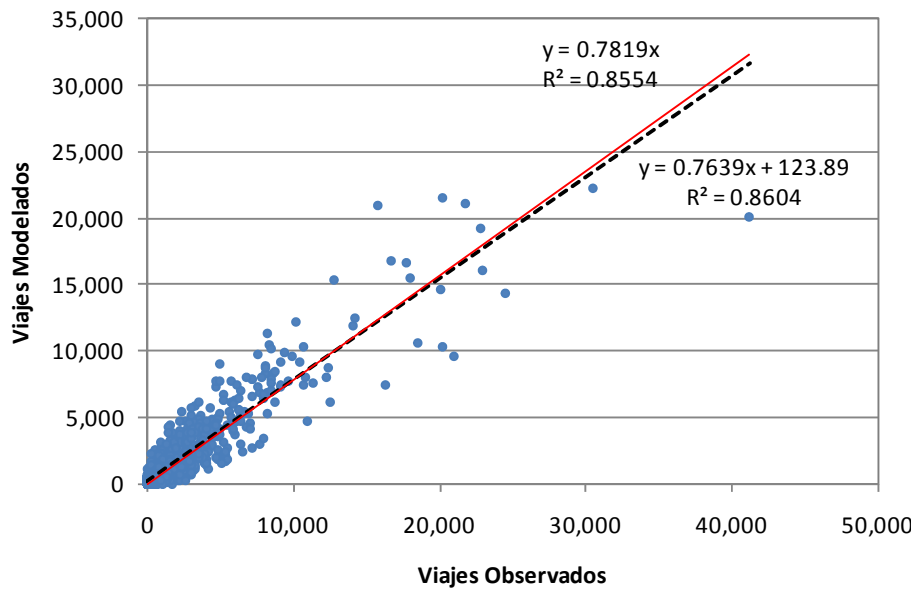


Figura 30. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Viajes Totales

En la Figura 31 se muestra el resultado de la calibración de la dispersión de los viajes totales, entre los viajes observados y los modelados por MARS. En general, el modelo reproduce con bastante similitud el comportamiento de los usuarios que viajan por motivo trabajo, así como la duración de los mismos.

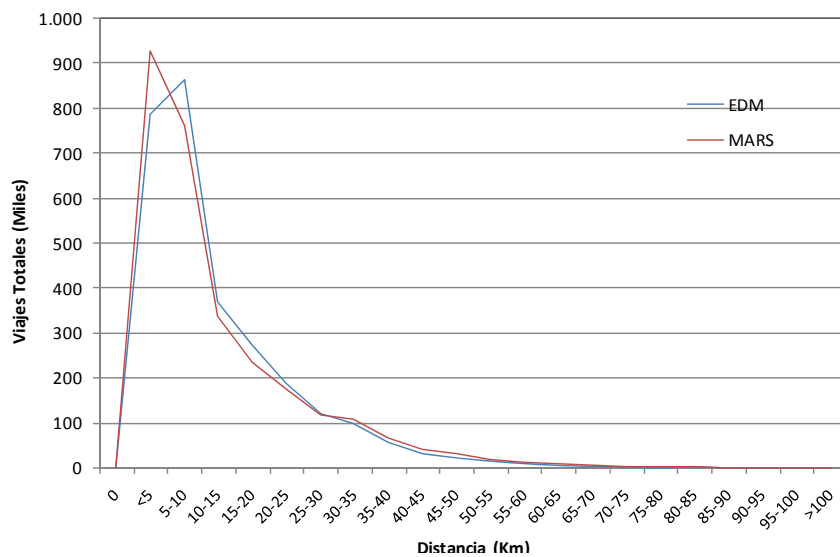


Figura 31. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Viajes Totales



En la Tabla 10, se muestran los resultados finales de la estimación de viajes por el modelo con los valores de calibración de la tabla anterior.

Modo	EDM04	MARS	Diferencia
Slow Mode	352.655	347.375	1,52%
Bus	445.909	414.604	7,55%
Rail	750.150	725,020	3,47%
Coche	1.307.166	1.278.261	2,26%

Tabla 10. Comparación Viajes Observados y Viajes MARS

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que las diferencias totales por modos son bastante aceptables, sin embargo, al hacer la comparación de los viajes por cada modo, se empiezan a apreciar diferencias mayores. Esto ocurre, principalmente por el gran impacto que tiene el factor α en la distribución de los viajes y en el comportamiento de las zonas internas, ya que por defecto se trabajó con el supuesto de que todos los viajes internos tienen una longitud media de 500 m.

A continuación se presentarán los resultados de la comparación de los viajes estimados en el modelo MARS con los obtenidos en la encuesta de movilidad EDM04, por cada modo de transporte.

En la Figura 32 se muestra de la dispersión de los viajes slow. Los resultados son aceptables, con un R² bastante bueno.

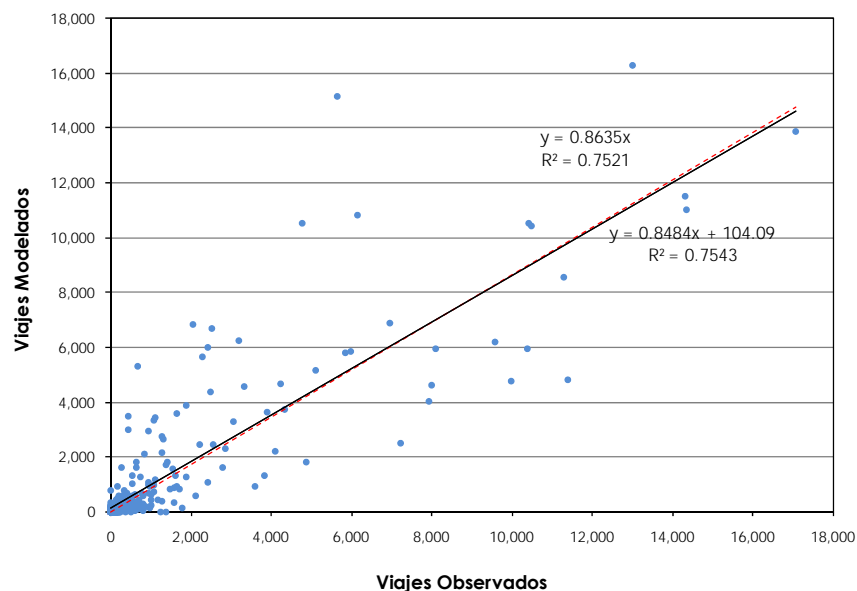


Figura 32. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Slow Modes

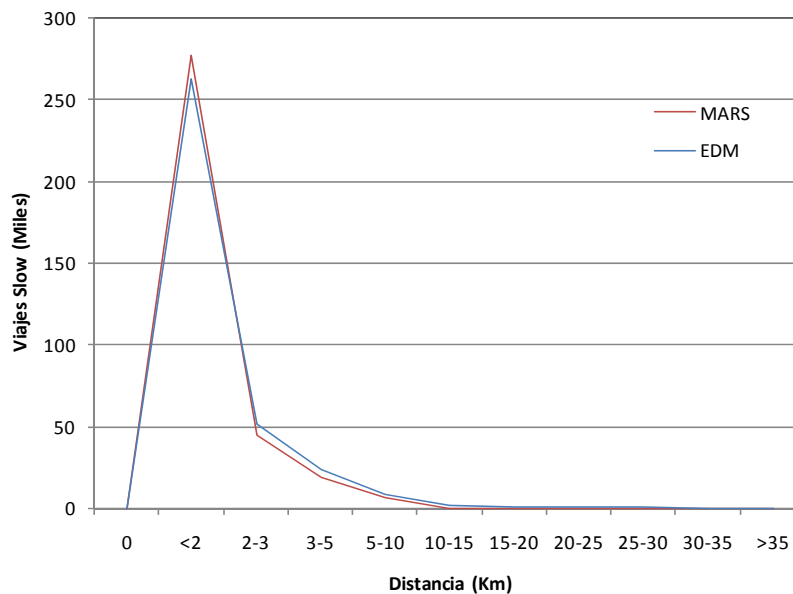


Figura 33. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Slow Mode

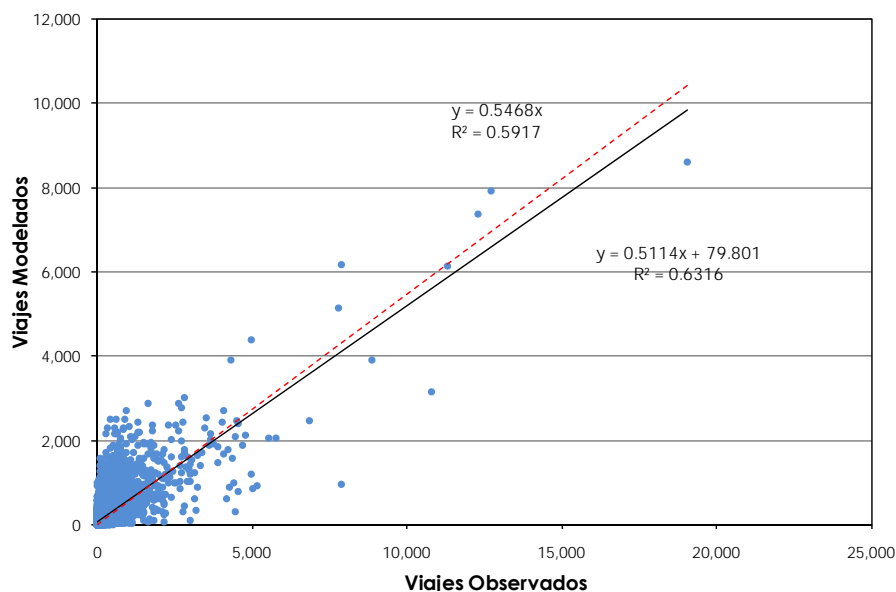


Figura 34. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Coche

En la Figura 35, se observa que el modelo subestima los viajes realizados en coche cuyo recorrido es menor de 20 Km aproximadamente y sobreestima los viajes que hacen mayores distancias. Esto puede ser consecuencia del cálculo del factor de fricción, donde se le estaría dando más peso a otros factores



como los costes de operación, por ejemplo. Sin embargo, hay que realizar una investigación más detallada para averiguar la causa de este inconveniente.

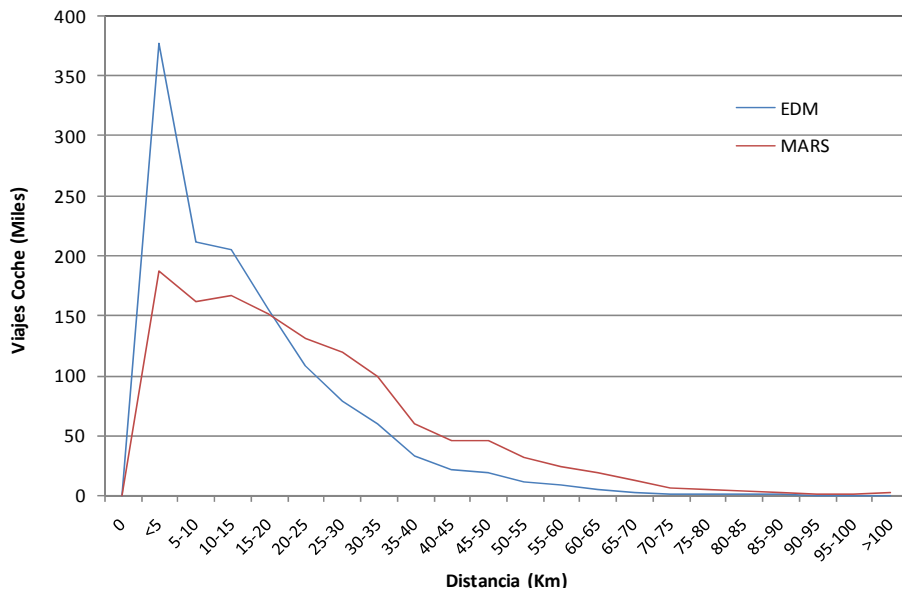


Figura 35. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Coche

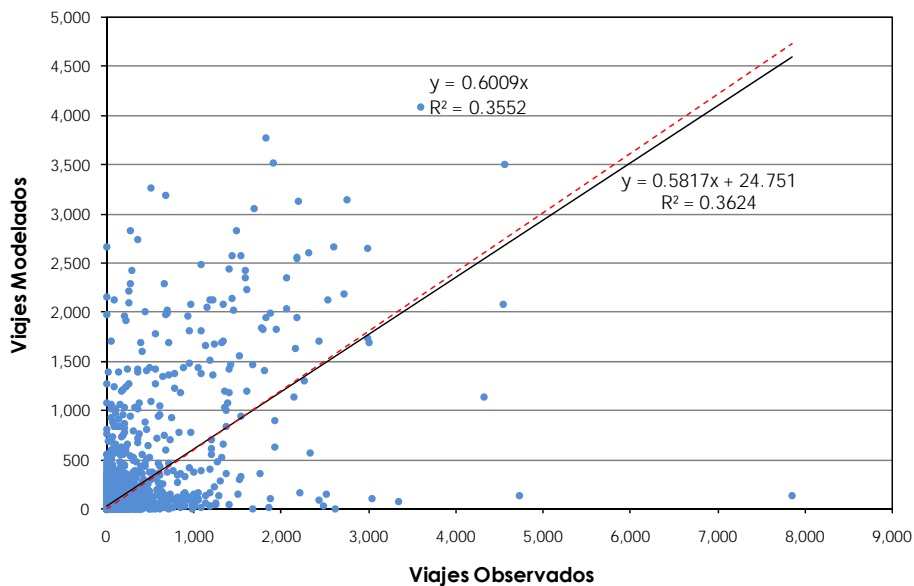


Figura 36. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Bus

En este caso (Figura 37), a diferencia del coche, en el modo bus ocurre el fenómeno contrario: se están sobreestimando los viajes de menos de 20 km de recorrido, frente a los datos observados.

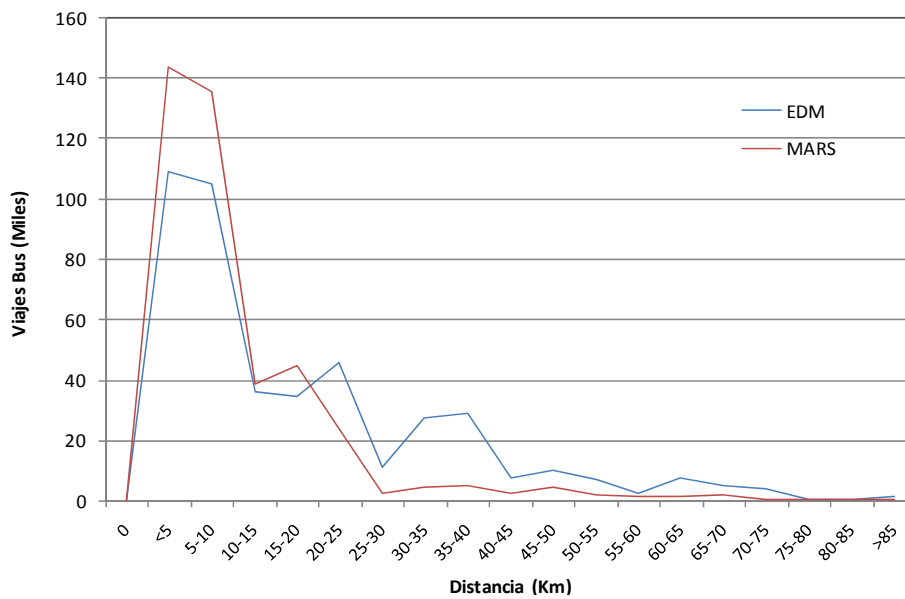


Figura 37. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Bus

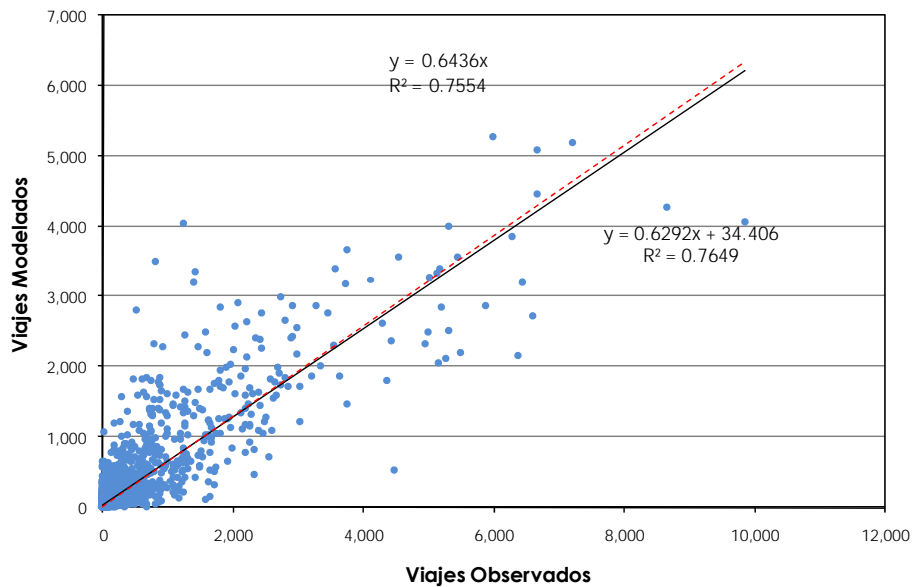


Figura 38. Comparación Viajes EDM04 contra Viajes MARS – Rail

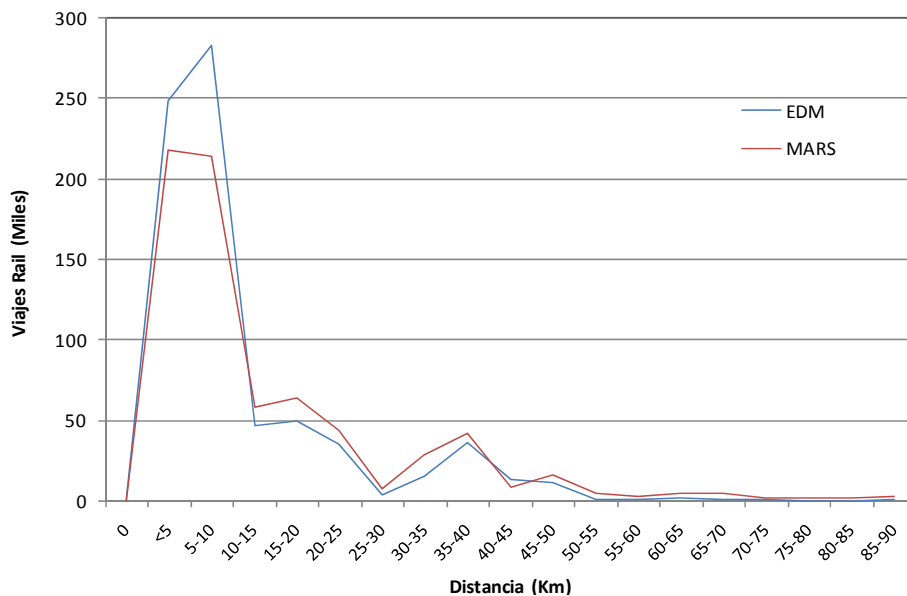


Figura 39. Dispersión de los Viajes Según la Distancia de Recorrido – Rail

En general se muestran resultados aceptables, aunque en algunos modos el modelo es más acertado que en otros; como se mencionó por la alta sensibilidad de la fórmula de distribución.

Una vez realizada la calibración de los viajes casa-trabajo y estimados sus factores k y α , el paso siguiente es realizar la calibración del resto de viajes, es decir, los que el modelo MARS considera off peak. La calibración se hace de la misma manera, es decir, se obtienen otros parámetros k y α para este tipo de viajes. En la Tabla 11 se muestran los resultados obtenidos.

Modo	α	k
Slow Mode	1,014	0,950
Bus	1,269	0,990
Rail	1,251	0,990
Coche	1,016	0,950

Tabla 11. Factores de Calibración Viajes Casa-Otros
 Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos para este tipo de viajes, son menos precisos que los del punto anterior, debido a la manera en que el modelo lo estima. Para este tipo de viajes, MARS los calcula teniendo en cuenta el tiempo restante (del presupuesto medio de tiempo de viaje) que le queda a cada persona después de haber realizado sus viajes de *commuting*.



8. REFERENCIAS

Aracil Javier (2003), *Introducción a la Dinámica de Sistemas*. Publicaciones Ingeniería de Sistemas.

ASTRA (1999). *System dynamics model platform, Deliverable 3 of the ASTRA Project*, Karlsruhe.

Azar, Ch., Schneider, S.H., (2002). Are the economic costs of stabilizing the atmosphere prohibitive? *Ecological Economics* 42 (1–2) 73–80

Cárdenas Miguel (1976). *Aplicaciones de Análisis de Sistemas: Métodos, Modelos y Resultados*.

Cervero R. (1996). *Mixed land uses and commuting: evidence from the american housing survey*. *Transportation Research Part A*.

COM(2007) 551. (2007) "Green Paper-Towards a new culture for urban mobility". European Commission. Directorate General for Energy and Transport.

Commission of the European Communities, (2004). *Structures of the Taxation systems in the European Union—Data 1995–2002*. 2004 Edition. Directorate General Taxation and Customs Union.

Council of the European Union, (2005). *Directive of the European Parliament and of the Council on the promotion of clean road transport vehicles* Official Journal of the European Union (Directive COM(2005)634).

Council of the European Union, (2003). *Restructuring the community framework for the taxation of energy products and electricity*. Official Journal of the European Union, Council Directive 2003/ 96/2003

Dean, A., Hoeller, P., (1992). *Costs of reducing CO₂ emissions: evidence from six global models*. *OECD Economic Studies* No. 19, Winter, 16–47

De la Hoz D. et al (2008). *Fuel Tax levels necessary to achieve the agreed reduction targets of CO₂ Emissions. The case of Madrid*. 9th Highway and Urban Environment Symposium. Madrid, Septiembre 2008.

European Commission, (2003). *European Climate Change Programme (ECCP). Second ECCP progress report. can we meet our Kyoto targets?* Brussels.

European Parliament and Council, (2003). *On the Promotion of the Use of Biofuels or other Renewable Fuels for Transport* (Directive 2003/30/EC).

Eurostat. The Statistical Office of the European Communities

Forrester Jay W. (1976). *Urban Dynamics*. The M.I.T. Press.



García, Juan Martín (2007). *Dinámica de Sistemas*. Fundació UPC, Universitat Politècnica de Catalunya.

Greiving y Wegener (2001). *Integration of transport and land use policies: state of the art*. 9th World Conference on Transport Research.

Haken, H. (1983a). *Advanced Synergetics - Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*; Springer Series in Synergetics, 20; Springer-Verlag,

Haken, H. (1983b). *Erfolgsgeheimnisse der Natur - Synergetik: Die Lehre vom Zusammenwirken*; Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.

Hammar, H., Lofgren, A., Sterner, T., (2004). *Political economy obstacles to fuel taxation*. *Energy Journal* 25 (3), 1–17 ISSN:0195-6574

Hunt J. D. (2005). *Current operational urban land use transport modelling frameworks: a review*. *Transport Reviews*, 25.

Kenworthy (1999). *Patterns of automobile dependence in cities an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 33.

Kunsch, P.L., Springael, J., (2008), *European Journal of Operational Research* 185 (2008) 1285–1299 (Available online 9 November 2006)

Nordhaus, W., (1991). *The costs of slowing climate change: a survey*. *Energy Journal* 12, 37–65

Monzón A. et al (2006). *Estudios de Estrategias de Movilidad Urbana en el Marco del Área Metropolitana de Madrid*, Universidad Politécnica de Madrid – TRANSyT, Ayuntamiento de Madrid.

Meurs H. y Haaijer R. (2001). *Spatial Structure and Mobility*. *Transportation Research D*, 6

Pfaffenbichler, P. (2003). *The strategic, dynamic and integrated urban land use and transport model MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator) – Development, testing and application*. PhD thesis. Institute for Traffic Planning & Traffic Engineering of Faculty of Civil Engineering of Vienna University of technology. Viena.

Piattelli, M., Cuneo, M.A., Bianchi, N.P., Soncin, G., (2002). *The control of goods transportation growth by modal share replanning: the role of a carbon tax*. *System Dynamics Review* 18 (1), 47–69.

Polzin (1999). *Transportation land use relationship: public transit's impact on land use*. *Journal of Urban Planning and Development*, 125.



REAL DECRETO 1370/2006. Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. Ministerio de la Presidencia.

Stead D. (2001). Relationships between land use, socioeconomic factors, and travel patterns in Britain. *Environment and Planning B*, 28

STEPS Scenarios for the Transport Systems and Energy Supplies and their Effects. *Transport Strategies Under the Scarcity of Energy Supply* (2006).

Vieira P. (2005). Modelización de la Interacción de Usos del Suelo y Transporte. Aplicación el Corredor de la A-3 en Madrid. Tesis Doctoral. TRANSyT.

Weber, M., Barth, V., Hasselmann, K., (2005). A multi-actor dynamic integrated assessment model (MADIAM) of induced technological change and sustainable economic growth. *Ecological Economics* 54 (2-3), 306-327

www.itson.mx

www.ediuoc.es

www.daedalus.es

www.munimadrid.es

www.ine.es