

Modelo de Transporte de Mercancías para la Planificación de Sistemas Multimodales

Autora: Rosa Rios Prado

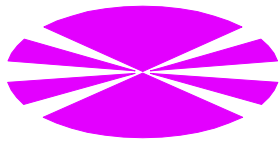
Tese de doutoramento UDC / 2015

Director: Alejandro García del Valle

Director: Diego Crespo Pereira

Departamento Ingeniería Industrial II





UNIVERSIDADE DA CORUÑA
TESIS DOCTORAL

**MODELO DE TRANSPORTE DE
MERCANCÍAS PARA LA
PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS
MULTIMODALES**

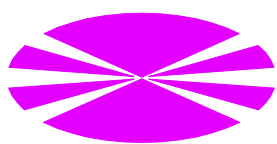
Rosa Rios Prado

TUTORES

Alejandro García del Valle

Diego Crespo Pereira

Septiembre de 2015



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

D. Alejandro García del Valle, catedrático del área de Organización de Empresas del Departamento de Análisis Económico y Administración de Empresas,

D. Diego Crespo Pereira, ayudante doctor del área de Organización de Empresas del Departamento de Análisis Económico y Administración de Empresas,

CERTIFICAN:

Que la memoria titulada “Modelo de transporte de mercancías para la planificación de sistemas multimodales” ha sido realizada por Rosa Rios Prado bajo nuestra dirección en el Departamento de Ingeniería Industrial II, y constituye la tesis que presenta para optar al grado de Doctor.

Alejandro García del Valle

Codirector de Tesis

Diego Crespo Pereira

Codirector de Tesis

A Nanda y Coco, mis padres.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar los agradecimientos por los dos directores de esta tesis, Alejandro García del Valle y Diego Crespo Pereira.

Además de su guía en el desarrollo de esta tesis, debo agradecer a Alejandro su llamada para incorporarme a lo que ha resultado ser el trabajo al que siempre había querido dedicarme, sin ni siquiera yo saberlo. En segundo lugar, he de agradecer a Diego el apoyo en una parte fundamental de la tesis, que nos tuvo noches en vela compartiendo cafeína de supervivencia. Creo que Sudamérica nos ha quitado años de vida. Gracias a los dos por ayudar a sacar esto adelante.

También quiero agradecer el apoyo que me han brindado todos y cada uno de mis compañeros. Como alguien dijo una vez, la tesis no solo es el tiempo que lleva de trabajo, sino todo lo que pasa a su alrededor. Y en ese alrededor hay momentos en los que se necesita un abrazo, y en ese momento yo no he tenido un abrazo, sino un laboratorio entero de abrazos. No quiero olvidarme de nadie por eso no voy a dar nombres, pero los que ya no están, los que siguen, a los cotillas del café, a los Lerch@s, con los que comparto comida cada día, mis compañeros de los viajes a Ferrol, Steam, a todos, para todos ¡Gracias!

Y a los que más han sufrido esto, mi familia y mis amigos. A ellos les he quitado horas de dedicación, me he saltado reuniones y han pagado mis agobios y mal humor. En especial a las cuatro Rios Prado y a nuestros dos adoptados.

A Cristina, Raquel, Olga y Laura, mis hermanas, porque mal que nos pese somos todas una, y menos mal que somos todas una. Gracias por haberos hecho cargo de mucho, para que yo pudiese terminar la tesis y por estar siempre a mi lado.

Y a José, mi mitad, porque me ha sufrido, aguantado y apoyado. Gracias por sustituirme y coger las riendas. Tú eres el que más ha pagado los momentos de tristeza, agobio, enfado y de “insoportabilidad” infinita sin rechistar.

Y, por último, a mis padres. Como soy y lo que soy, se lo debo a ellos. A sus esfuerzos, a su manera de ser, a sus riñas y a sus cariños. Donde estén, sé que estarán orgullosos.

PUBLICACIONES

Rosa Ríos Prado, Diego Crespo Pereira, Alejandro García del Valle, 2014. "Multimodal Freight Transportation: A Service Optimization Algorithm". Proceedings of the Int. Conf. on Harbor Maritime and Multimodal Logistics M&S, 2014, pp 174 - 180

Diego Crespo Pereira, Rosa Rios Prado, Anton Cotelo Garcia, David del Rio Vilas. 2014. "A Multimodal Freight Transport Model For The Prioritization Of Regional Infrastructures Investments For The Prodepro Project in Brazil". WINLOG 2014, pp 64-71

Rosa Rios Prado, Diego Crespo Pereira, David del Rio Vilas, Nadia Rego Monteil, and Alejandro Garcia del Valle. 2014. "A Parameterised Model of Multimodal Freight Transportation for Maritime Services Optimisation." International Journal of Simulation and Process Modelling, May. Inderscience Publishers Ltd. <http://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSPM.2014.061431>.

Rosa Rios Prado, Diego Crespo Pereira, David del Rio Vilas, Alejandro García del Valle, 2013. "The effective integration of logistic M&S in international multilateral development projects: case studies". The International Workshop on Innovation for Logistics, pp 21 – 29

Rosa Ríos Prado, Diego Crespo Pereira, David del Rio Vilas, Nadia Rego Monteil, Óscar de Gregorio Vicente. 2013. "MODEL DEVELOPMENT FOR THE ASSESSMENT OF AN INTERNATIONAL RAILWAY CORRIDOR – METHODOLOGICAL OVERVIEW2. The 15th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation, Proceedings, pp 133 – 139

Rios Prado, R., D. Crespo Pereira, J.M. Bastida Sardiña, D. del Rio Vilas, and N. Rego-Monteil. 2012. "A Parameterized Model of Multimodal Freight Transportation for Maritime Services Optimization." In The 14th International Conference on Harbor Maritime & Multimodal Modelling and Simulation, 157–64.

Rios Prado, Rosa, Diego Crespo Pereira, David del Rio Vilas, and Nadia Rego-Monteil. 2011. "GLOBALOG: A Simulation Case of Freight Multimodal Transportation." In The 13th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation Proceedings, 170–178.

Diego Crespo Pereira, Rosa Rios Prado, Oscar de Gregorio Vicente, 2014. "Mode choice modelling for the assessment of an international railway corridor", Proceedings of the International conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics 2014, pp 188 – 193.

Antón Cotelo García, Diego Crespo Pereira, Rosa Rios Prado, David del Rio Vilas, 2014. "A combined simulation approach for the effective integration of operational and strategic levels for intermodal transport modelling". Proceedings of the International conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics 2014, pp 181 – 187.

Alba Martínez López; Rosa Ríos Prado; Vicente Díaz Casás; Alicia Munín Doce, 2010. "THE INTERMODAL CHAIN COMPETITIVENESS FOR THE TRANSPORT OF SPANISH SME PRODUCTION", Proceeding of ETC 2010, pp1-20.

Diego Crespo Pereira, Alejandro García del Valle, David del Río Vilas, Rosa Ríos Prado, Arturo Nieto de Almeida, 2009. "A line of research in routing problems supported by simulation and logistics projects", HAROSA Workshop, pp 1 - 1,

Crespo Pereira, Diego, David del Rio Vilas, Nadia Rego Monteil, Rosa Rios Prado, and Alejandro Garcia del Valle. 2012. "Autocorrelation Effects in Manufacturing Systems Performance: A Simulation Analysis." In *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, 1–12. IEEE. doi:10.1109/WSC.2012.6465129.

Crespo Pereira, Diego, David del Rio Vilas, Nadia Rego Monteil, and Rosa Rios Prado. 2012. "Simulation and Highly Variable Environments: A Case Study in a Natural Roofing Slates Manufacturing Plant." In *Use Cases of Discrete Event Simulation*, 147–178

Crespo Pereira, Diego, David del Rio Vilas, Rosa Rios Prado, Nadia Rego-Monteil, and Adolfo Lamas Rodriguez. 2011. "Experimental Manufacturing System For Research And Training On Human-Centred Simulation." In *The 23rd European Modeling and Simulation Symposium*, 400–409.

Crespo Pereira D., del Rio Vilas D., Rego-Monteil N., Rios Prado R., Lamas Rodriguez A. 2011. "A Project-Based Teaching Experience for Simulation and Optimization Education." In *Proceedings of the International Conference on European Transnational Education*, 67–71.

Diego Crespo Pereira, Adolfo Lamas Rodriguez, Rosa Rios Prado, 2014. "A MODIFIED BEER GAME FOR SIMULATION AND OPTIMIZATION TEACHING", *Proceedings of the 26 th European Modeling and Simulation Symposium*, pp 498 – 503.

Rego Monteil, Nadia, David del Rio Vilas, Diego Crespo Pereira, and Rosa Rios Prado. 2011. "A SIMULATION-BASED CAPACITY PLANNING MODEL : A CASE STUDY IN A CONTRACT FURNISHING SME." In *The 23rd European Modeling & Simulation Symposium*, 626–634.

Rego Monteil, Nadia, Diego Crespo Pereira, David del Rio Vilas, and Rosa Rios Prado. 2013. "A Simulation-Based Ergonomic and Operational Analysis for the Improvement of a Fish Processing Factory Ship." *International Journal of Food Engineering* 9 (3). doi:10.1515/ijfe-2013-0037.

Rego-Monteil, Nadia, David del Rio Vilas, Diego Crespo Pereira, and Rosa Rios Prado. 2011. "An Overall DHM-Based Ergonomic and Operational Assessment of a Manufacturing Task: A Case Study." In *Proceedings of the 10th International Conference on Modelling and Applied Simulation*, 375–382.

Rego-Monteil, N., R. Botana Lodeiros, D. Crespo Pereira, D. del Rio Vilas, and R. Rios Prado. 2012. "Modelling and Simulation of a Fish Processing Factory Ship." In *Proceedings of the 11th Modeling and Applied Simulation*, 316–325.

Rego Monteil, Nadia, David del Rio Vilas, Diego Crespo Pereira, and Rosa Rios Prado. 2010. "A Simulation-Based Ergonomic Evaluation for the Operational Improvement of the Slate Splitters Work." In *Proceedings of The 22nd European Modeling & Simulation Symposium*, 191–200.

Rego-Monteil N., del Rio Vilas D., Crespo Pereira D., Rios Prado R., Nieto de Almeida A.. 2011. "A SIMULATION-BASED CAPACITY PLANNING MODEL : A CASE STUDY IN A CONTRACT FURNISHING SME." In *The 23rd European Modeling & Simulation Symposium*, 626–34.

Nadia Rego Monteil, Mariangela Suriano, Diego Crespo Pereira, David del Rio Vilas, Rosa Rios Prado, Francesco Longo 2013, "A DATA COLLECTION METHODOLOGY TO PERFORM DHMS-BASED ERGONOMIC ANALYSIS OF MANUFACTURING TASKS", *Proceedings of the 12th International Conference on Modeling and Applied Simulation*, pp 114 - 121,

RESUMEN

En la presente tesis se ha llevado a cabo un trabajo en la línea de planificación de transporte, en particular en la de sistemas de transporte multimodales para el movimiento de mercancías.

Se ha desarrollado una metodología que permite la evaluación de diferentes sistemas multimodales con diversos objetivos de análisis. Esto ha sido posible mediante la definición de un modelo de transporte de mercancías completo, versátil y configurable, que permite la evaluación de sistemas de transporte desde múltiples puntos de vista.

El desarrollo de un modelo completo de transporte es un trabajo complejo, no solo por la existencia de diferentes alternativas que han de ser tenidas en cuenta, sino por la dificultad de obtener los datos necesarios y decidir la metodología que se ha de emplear. En este sentido, el modelo desarrollado permite establecer los pasos acordes con la información disponible, sin perder de vista la obtención de unos resultados realistas y lo más precisos posibles.

El fin principal de este modelo es la realización de análisis basados en simulación, es decir, plantear un análisis “y si” en el que el modelo de transporte es el elemento principal sobre el cual se van a plantear diferentes escenarios e hipótesis.

RESUMO

Na presente tese levouse a cabo un traballo na liña de planificación de transporte, en particular na de sistemas de transporte multimodais para o movemento de mercadorías.

Desenvolveuse unha metodoloxía que permite a avaliación de diferentes sistemas multimodais con diversos obxectivos de análise. Isto foi posible mediante a definición dun modelo de transporte de mercadorías completo, versátil e configurable, que permite a avaliación de sistemas de transporte dende múltiples puntos de vista.

O desenvolvemento dun modelo completo de transporte é un traballo complexo, non só pola existencia de diferentes alternativas que han de ser tidas en conta, senón pola dificultade de obter os datos necesarios e decidir a metodoloxía que se ha de empregar. Neste sentido, o modelo desenvolvido permite establecer os pasos acordes coa información dispoñible, sen perder de vista a obtención duns resultados realistas e o máis precisos posibles.

O fin principal deste modelo é a realización de análises baseadas en simulación, é dicir, formular unha análise "e se" na que o modelo de transporte é o elemento principal sobre o cal se van plantexar diferentes escenarios e hipóteses.

ABSTRACT

The work developed in this thesis belongs to the line of transportation planning, particularly in freight multimodal transport.

A methodology was developed to allow the evaluation of different multimodal systems with different aims of analysis. To get this goal, a freight transport model complete was defined. It is versatile and configurable and it allows the evaluation of transport systems from multiple points of view.

The development of a comprehensive model of particular transport is a complex work, not only by the existence of different alternatives that have to be taken into account but by the difficulty in obtaining the necessary data and determine the methodology to be employed. In this sense, the developed model allows to establish the steps in accordance with the information available, without losing sight of obtaining realistic results as accurate as possible.

The main purpose of this model is the realization of simulation-based analysis, it means, propose different analysis scenarios to make "what if" analysis, in which the transport model is the main element.

The methodology was applied to the real case of Bolivia transport system, in order to evaluate a new infrastructure, and the Northeast Region of Brazil, to establish a hierarchy list of projects.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	1
Capítulo 2. Objetivos.....	9
Capítulo 3. Antecedentes.....	13
3.1. Introducción.....	13
3.2. Modelos de transporte.....	18
3.2.1. Planificación de transporte multimodal de mercancías.	20
3.2.2. Modelo de las cuatro etapas.....	26
3.3. Modelos desarrollados en europa y sus aplicaciones	34
3.3.1. ETIS	38
3.3.2. SIMILE +	39
3.3.3. MODEV	41
3.3.4. BVWP.....	42
3.3.5. TRANSTOOLS.....	42
3.3.6. Worldnet.....	44
3.3.7. Norway y Samgods.....	45
3.3.8. Mobility Masterplan of Flandes	46
3.3.9. NODUS	46
3.3.10. Dinamarca	46
3.3.11. LOGIS.....	47
3.3.12. BASGOIED	47
3.3.13. Otras iniciativas	53
3.4. Modelos de congestión de los nodos de la red.	54
Capítulo 4. Metodología.....	61
4.1. Modelo conceptual.....	63
4.1.1. Elementos generales del modelo.....	64
4.1.2. Selección del nivel de agregación de los orígenes y destinos... ..	66
4.1.3. Datos de entrada al modelo.	71

4.1.4. Etapas que conforman el modelo.....	78
4.1.5. Métodos de análisis de resultados.....	97
4.2. Implementación del modelo.....	102
Capítulo 5. Casos de estudio	105
5.1. Caso de Bolivia: Corredor ferroviario biocenánico central.....	105
5.1.1. Descripción del proyecto.....	105
5.1.2. Datos de entrada al modelo.....	108
5.1.3. Generación de carga y distribución.....	116
5.1.4. Reparto modal.....	121
5.1.5. Asignación a la red.....	129
5.2. Caso de Brasil: Priorización de inversiones.....	134
5.2.1. Descripción del proyecto.....	134
5.2.2. Datos de entrada al modelo.....	137
5.2.3. Generación de carga y distribución.....	139
5.2.4. Elección modal y asignación a la red.....	142
Capítulo 6. Conclusiones.....	149
6.1. Generales.....	149
6.2. Caso de Bolivia.....	151
6.3. Caso de Brasil.....	153
Capítulo 7. Líneas futuras.....	155
Bibliografía.....	159
Índice de tablas.....	171
Índice de figuras.....	173

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El término *transporte* procede de la palabra latina *transportare*, trans “al otro lado” y *portare* “llevar”. Es decir trasladar de un lado hacia otro tanto personas como bienes. Es una de las actividades diarias que incumbe a un número importante de individuos y de empresas. Por lo tanto, aquellas iniciativas que lleven a su planificación o mejora serán de gran importancia. No sólo desde el punto de vista de servicio en sí, sino como un complejo sistema de infraestructuras, servicios e impactos sobre la sociedad y su entorno.

Hay diferentes puntos de vista importantes que se puede tener en cuenta para la planificación del transporte, sin que entre ellos tengan que ser excluyentes, pero que en muchas ocasiones suelen plantearse de manera aislada. Dentro de estos puntos de vista están el punto de vista del servicio, donde lo que se quiere plantear son las características del mismo, el punto de vista de la infraestructura, es decir su utilidad y necesidad, su importancia para la captación de flujos de transporte tanto de pasajeros como de mercancías y los diferentes impactos económicos, medioambientales o sociales que puedan derivar.

Estas diferentes visiones de evaluación requieren también diferentes niveles de resolución o enfoques. No es lo mismo la evaluación desde un punto de vista macro, como podría ser el reparto de flujos entre diferentes países, que el enfoque micro del estudio de las congestiones a las que puede verse abocada una plataforma logística debido al mal planteamiento de los elementos de carga y descarga que posee la instalación. Estos dos elementos, que podrían parecer totalmente desconectados, tienen una relación directa e importante. Esta relación proviene de los flujos que pueden llegar a congestionar los nodos logísticos, los cuales proceden de las captaciones de flujos de los diferentes medios de transporte. Las características de los sistemas, por ejemplo, tiempos y costes, que puedan afectar a la elección de un medio de transporte determinado o los flujos captados estarán afectados por los valores de tiempos de carga y descarga o tarifas de dichos nodos logísticos.

La modelización de transporte para su planificación será una herramienta de gran importancia para la evaluación de la planificación desde las distintas opciones y los diferentes niveles de resolución que van a ser necesarios para la evaluación completa.

En la modelización del transporte lo que se obtiene es una simplificación de la realidad donde se representan procesos y fenómenos complejos de una

manera sencilla. De forma general lo que permiten es obtener una idea de las situaciones futuras en cuanto a:

- Cantidades de viajes generados o atraídos en diferentes zonas
- La manera en la que estos viajes se reparten por las distintas zonas
- Los modos elegidos para cada viaje
- Así como los volúmenes, tanto de pasajeros como de mercancías
- Y los flujos de vehículos

La modelización de transporte permite estimar los flujos de pasajeros o vehículos por modo en una infraestructura existente o futura. La forma en la que dicha modelización se puede llevar a cabo no es única, sino que existe una serie de herramientas disponibles que permiten la planificación del transporte en función de estos modelos.

Existen diferentes metodologías para el desarrollo de modelos de transporte aunque la más extendida es el Modelo de las cuatro etapas (Ortúzar and Willumsen 2011) y sus variaciones. Este modelo se basa en cuatro pasos fundamentales que pueden variar en función de la información disponible:

- Generación de viajes
- Distribución de viajes
- Selección de modo
- Selección de ruta

En la presente tesis se ha desarrollado un modelo que, aun tomando como base la definición teórica de los modelos de 4 etapas, permite establecer un modelo más completo donde pueden ser establecidos diferentes alcances de resolución con su configuración completa. Con diferentes alcances se refiere al establecimiento de un modelo conceptual de intercambio de información entre niveles de resolución macro con algunos micro de los elementos logísticos representativos del sistema de transporte, como es la congestión de los nodos logísticos. También el nivel de resolución está relacionado con la resolución geográfica del modelo, así un mismo modelo puede no solamente tener en cuenta el transporte dentro de una región, sino que puede ser necesario establecer los movimientos con otras zonas más alejadas con las que tiene intercambio comercial y, debido a ello, movimientos de mercancías con las mismas. Como consecuencia, se tendrían niveles de resolución geográfica diferente y con características diferentes a tener en cuenta en la definición del problema y su solución.

Uno de los elementos importantes en el transporte actual es la intermodalidad. Se busca un transporte sostenible, eficiente y de bajo impacto tanto ambiental como social. La intermodalidad es una de las herramientas que, desde

el punto de vista del transporte puede facilitar el cumplimiento de estos objetivos. Por ejemplo, si se tiene en cuenta el último Libro Blanco del Transporte de la Comisión Europea (2011) se puede ver la importancia de la intermodalidad en el transporte. En él se indica que las características principales de un servicio de calidad son: frecuencias atractivas, confort, fácil acceso, fiabilidad del transporte y la integración de *la intermodalidad*. Entre las iniciativas que promueve está el adaptar la legislación del transporte de manera que facilite la intermodalidad, que los regímenes de responsabilidad promuevan los modos de transporte diferentes a la carretera y la intermodalidad, modernizar las reglas del transporte intermodal de mercancías peligrosas para que aseguren la interoperabilidad entre modos o concentrar las acciones de mejora de la red europea en elementos de alto valor añadido como las conexiones intermodales.

Si se toma como referencia la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T), que es el conjunto planificado de redes prioritarias de transporte en la Unión Europea, se puede observar esta importancia de la intermodalidad, ya que los proyectos prioritarios tienen en cuenta todos los medios de transporte alternativos a la carretera. Esto es porque la carretera es el medio más congestionado y de mayores emisiones de gases contaminantes. Se desarrollaron 11 planes cuyas acciones han de estar finalizadas en 2030. Dentro de estos planes está el corredor Atlántico, que conecta la península ibérica, la fachada atlántica del continente y el centro de la UE a través de Francia a París y Normandía y más hacia el este a Estrasburgo / Mannheim. El corredor proporciona tanto conexiones marítimas como vías navegables interiores, entre la península y Francia, Alemania y más ampliamente con Europa central. Si se toma como ejemplo se puede ver que los objetivos estratégicos de este corredor son (Carlo Secchi 2015):

- Mejora de la multimodalidad y reequilibrio del cambio modal, de manera que se conecten diferentes modos de transporte para trasvasar los flujos sobre todo de carretera al ferrocarril y marítima, tanto para flujos internos y externos.
- Implementación de la interoperabilidad ferroviaria, ya que existen diferentes anchos de vía ferroviaria en el ámbito de estudio y unificar el sistema de gestión
- La explotación de la dimensión exterior, sobre todo impulsar el potencial marítimo, como modo de transporte muy eficiente.

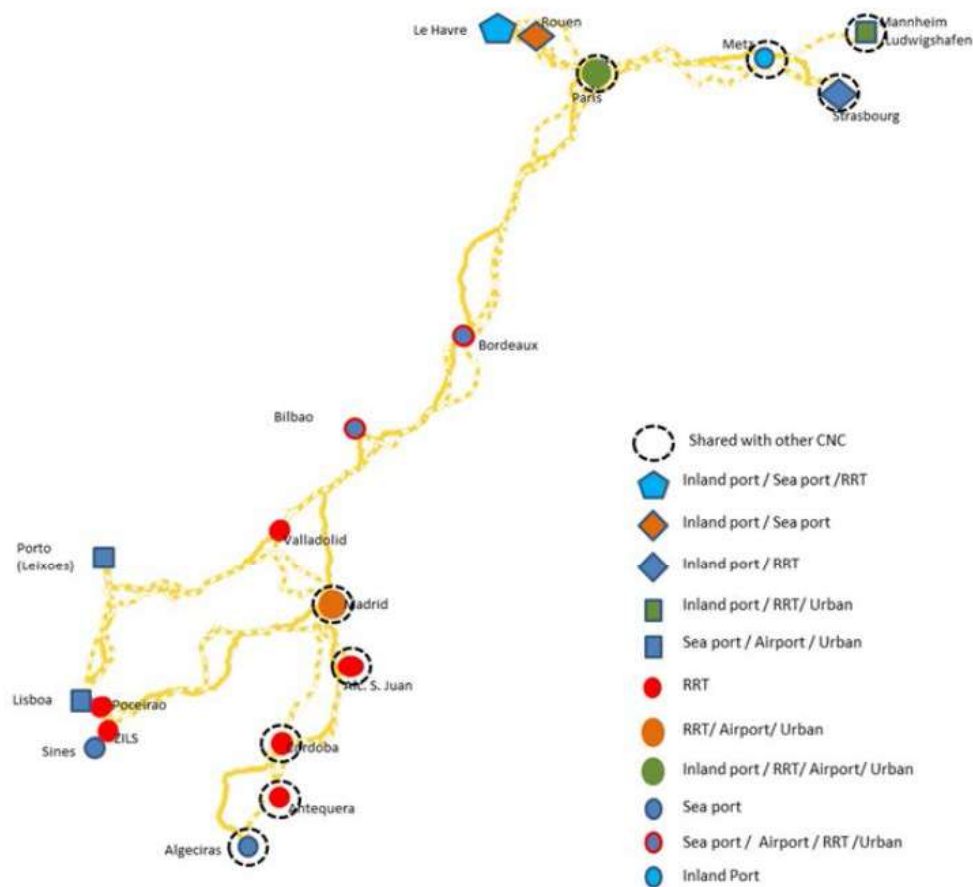


Figura 1: Corredor Atlántico y sus nodos. Fuente: Atlantic Corridor Work Plan. (http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/doc/2015-05-28-coordinator-work-plans/wp_atl_final.pdf)

Este es uno de los casos que representan el interés que la intermodalidad tiene en el desarrollo de los sistemas de transporte. Por ello es de gran importancia en el modelo que la intermodalidad puede ser adecuadamente representada, ya que la planificación no va a quedar reducida a un modo de transporte determinado, sino que lo que se plantea es un sistema de planificación completo, multimodal. Múltiples alternativas pueden entrar en competencia y ser evaluadas de forma global. En este sistema no se deberá restringir el tipo de transporte, sino que el modelo que se genere para la evaluación del sistema ha de poder tener en cuenta todos los medios de transporte posibles o existentes en el mismo. Esto facilitará la evaluación de la multimodalidad entre los diferentes tipos de transporte, permitiendo la comparación entre diferentes alternativas, tomen estas la forma unimodal o multimodal. Es importante tener en cuenta en la definición de la metodología para la evaluación de sistemas de transporte, que dicha metodología ha de permitir la evaluación de sistemas con más de un medio de transporte. Estos medios de transporte pueden tanto

competir entre ellos como colaborar para formar una alternativa de transporte completa multimodal para el movimiento de mercancías.

Una parte fundamental de la modelización es la elección de las áreas geográficas del estudio, las cuales han de tener ciertas características homogéneas de manera que esto permita diferenciarlas y poder establecer unos valores comunes a todas las zonas de la misma. Dichas variables pueden ser de tipo socioeconómicas, de uso del suelo o accesibilidad a los diferentes medios de transporte. Esto lleva a estudios previos que permiten conocer en profundidad las zonas y los medios de transporte existentes o futuros. La recopilación de datos puede informar o proporcionar conocimiento sobre elementos que no se habían considerado importantes pero sí pueden llegar a serlo. Estos modelos serán más o menos desagregados en función de esas áreas consideradas. Cuando los modelos tienen información de las zonas lo más desagregada posible, es decir con el mayor nivel de detalle (por ejemplo, hogares), serán modelos de tipo desagregado, mientras que los modelos agregados establecen zonas mayores donde las características no serán tan uniformes, aunque a cambio reducen el coste computacional y las dificultades para la recopilación de datos.

Será necesario investigar la forma de establecer un método objetivo y fundamentado para establecer el tamaño de las áreas de estudio, en función del problema al que se enfrente o los resultados que se quieran obtener teniendo en cuenta los datos disponibles. Por tanto, se busca poder establecer el error que se comete al decidir emplear áreas más o menos agregadas en función de los datos disponibles.

El transporte, como se indicaba al principio, es el movimiento tanto de mercancías como de personas de un lugar hacia otro, por lo tanto, en esta etapa de modelización será necesario establecer los flujos totales que se desplazan, así como sus proyecciones de futuro y además repartirlos entre las zonas que se han establecido como características. En la actualidad existen diferentes modelos que permiten establecer estos valores, pero el desarrollo final que se busca es un elemento que permita la evaluación del transporte desde múltiples vías. Se buscará la forma de establecer los métodos y modelos que apoyen los resultados que se busquen, y que permitan dar el mejor resultado en función de los datos disponibles.

La insistencia que se hace sobre los datos disponibles viene derivada de que en los problemas reales de planificación de transporte, la disponibilidad de datos, independientemente del resultado que esté buscando, suele ser bastante escasa o difícil de obtener. Cantillo, Jaller y Holguín-Veras (2014) indican que uno de los elementos que dificultan el desarrollo de modelos de demanda de transporte es esta falta de datos. Dicha falta de datos, además, es incluso

más importante en los países en desarrollo. En estos la cantidad y calidad de los datos disponibles son limitadas, y en los que los escasos recursos dificultan la recopilación de dichos datos. En los casos de estudio de la presente tesis se presentará cómo se ha solventado estos problemas para los dos países representados en el modelo. Por ello se buscó un modelo integral lo suficientemente versátil y flexible que permita el mejor uso de los datos existentes, de manera que los resultados que se obtengan sean los más ajustados a la realidad posible.

La metodología desarrollada sigue el objetivo de ser útil para el empleo de simulación, es decir, el establecimiento de situaciones futuras (escenarios) con condiciones diferentes de servicio e infraestructuras, de manera que se puedan estimar una serie de impactos esperados. Es decir, se pueden emplear herramientas de simulación junto al modelado del sistema que permitan esas evaluaciones futuras. Las relaciones que se han de establecer entre los diferentes elementos del modelo son de naturaleza compleja, llevando al desarrollo de algoritmos matemáticos que en muchos casos han de ser redefinidos.

El empleo de este tipo de estrategias de evaluación permitirá no solo la obtención de los resultados fundamentales anteriormente indicados, sino que en función de ellos podrán establecerse políticas relativas al transporte, la planificación de nuevos servicios o mejoras de los existentes, la evaluación de diferentes alternativas en cuanto a infraestructuras e incluso introducir elementos de beneficio social como es la evaluación de impacto ambiental o social.

En estos momentos un elemento fundamental que se está buscando en el comercio de mercancías es la determinación de la huella de carbono. El transporte no es ajeno a esa comercialización y tendrá parte importante en la estimación de ese valor. Cuando el producto a comercializar es una mercancía, el transporte es una parte de ese impacto total de producción y puesta en venta del producto, sin embargo, el transporte puede ser un producto en sí mismo, por ejemplo en el caso de viajeros.

La complicación en el cálculo de esta huella de carbono no está tanto en los valores de emisiones directos del proceso a evaluar, sino de aquellos factores indirectos que hay que tener en cuenta. La obtención de esta huella de carbono se divide en tres alcances, el primero son los valores de emisiones directos de la actividad, mientras que los alcances 2 y 3 son los indirectos. El alcance 2 tiene que ver con las emisiones debidas al consumo eléctrico y no es muy complicado de obtener. El problema se presenta en el alcance 3, ya que son el cómputo de todas las emisiones indirectas que no son controlables por la empresa. En este sentido sería importante identificar la parte indirecta de la huella de carbono de un producto que procede de su transporte. Si el transporte forma parte de la empresa donde se puede controlar todo el proceso, pertene-

cería al alcance 1, cuando es un servicio externo pertenecería al alcance 3. Ambos pueden ser tenidos en cuenta de la misma forma en el modelo de transporte, ya que este solo tiene en cuenta el proceso en sí, no a quien corresponde llevarlo a cabo.

Un modelo completo ha de permitir la evaluación de diferentes escenarios para el análisis del transporte desde diferentes necesidades del usuario. Algunos de los usos principales que se les pueden dar a los modelos son:

- Evaluación de planes de infraestructuras
- Evaluación de sistemas de transporte público
- Obtención de flujos de transporte
- Evaluación económica de infraestructuras y servicios
- Análisis de capacidades de la red y de los nodos logísticos

Se han estudiado los modelos empleados sobre todo en Europa, viendo las características de los mismos, las aplicaciones que han tenido y las limitaciones encontradas. Con todo ello se estableció un modelo conceptual, mediante el cual se llevaron a cabo dos proyectos reales de planificación de transporte, con diferentes objetivos.

El primero de ellos fue el modelo de transporte de Bolivia para la evaluación del Corredor Ferroviario Bioceánico Central. Esta infraestructura conectará la costa Atlántica de Sudamérica desde el puerto de Santos en Brasil con la Pacífica a través de los puertos de Perú. Parte de la inversión está relacionada con la mejora de la red, pero en Bolivia incluye la construcción de un importante tramo de ferrocarril que conecte los dos tramos de red existentes en el país a través de los Andes. El objetivo de dicho trabajo era establecer las condiciones bajo las que el corredor sería capaz de absorber flujos suficientes de mercancías y pasajeros que hiciesen del sistema una infraestructura viable en el largo plazo.

Por otro lado, se llevó a cabo un proyecto para el Nordeste de Brasil. En este caso el objetivo consistió en priorizar un conjunto de proyectos relacionados con la infraestructura de transporte. La priorización de los mismos se llevó a cabo mediante un modelo multicriterio, del cual varios elementos eran resultados concretos del modelo de transporte. Esas variables, obtenidas mediante la modelización del sistema, fueron: los ahorros en tiempos y costes en los que se concurría por el funcionamiento de los proyectos, la población expuesta y los flujos captados.

Ambos proyectos tienen como promotores los correspondientes países, pero llevan además el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo en forma de financiación para llevarlos a cabo.

La presente tesis se dividirá en la identificación de los objetivos de la misma, para después desarrollar algunos de los modelos de transporte empleados principalmente en Europa. Los capítulos cuatro y cinco se destinarán a la descripción del modelo conceptual y sus casos de uso. Tras esto se plantearán las conclusiones tanto del desarrollo del modelo como de los casos en los que se ha planteado, para terminar con las líneas de trabajo que esta tesis deja abiertas.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

La presente tesis está enmarcada en el área de los modelos de planificación de transporte y su aplicación.

Se plantea en primer lugar la obtención de un modelo completo de transporte con una arquitectura flexible y reconfigurable, que permita su adaptación a diferentes objetivos de análisis.

Como indican Ortúzar y Willumsen (2011) el alcance de un modelo depende del contexto de la toma de decisiones. Así indica que las necesidades y alcance de un modelo cuyo objetivo es una planificación estratégica, táctica u operacional presentan gran diferencia. En esta tesis lo que se pretende es dar solución a este problema, formulando un modelo que permita tanto una evaluación estratégica, por ejemplo, para la evaluación de una nueva infraestructura, como táctica, estableciendo las condiciones bajo las que una infraestructura o servicio puede ser rentable, y operacional, permitiendo la evaluación y establecimiento de nuevos servicios, como puede ser un servicio marítimo de corta distancia (short sea shipping). No se entrará en el nivel más detallado de planificación operativa de un servicio (que requerirían un nivel de detalle en la disponibilidad de datos mucho mayor y metodologías distintas a los métodos de etapas) y la resolución geográfica del modelo se ha centrado en el transporte de media / larga distancia a nivel nacional o internacional y no en el transporte urbano.

Además de este objetivo fundamental se establecen una serie de objetivos complementarios y derivados del principal.

En primer lugar, fue necesario el estudio de los modelos que se han llevado a cabo, en especial en Europa, identificando los objetivos para los que habían sido desarrollados y las etapas y métodos empleados en los mismos para su obtención. Esto permitió el establecimiento de los requerimientos mínimos para cada nivel o alcance de resolución (estratégico, táctico y operacional) y los métodos más empleados. Este conocimiento permite definir los elementos necesarios en el modelo para poder ser aplicado en todos estos ámbitos, mediante diferentes configuraciones, así como implementar los métodos más empleados, ampliando con nuevas opciones para los mismos.

Para el establecimiento correcto de dichos métodos fue necesario una revisión de los más empleados, para identificar la mejor manera de definir su entrada en el modelo y configuración. También permitió establecer la mínima cantidad de datos necesarios para su correcto funcionamiento.

La definición de una estructura software, en Java, que de soporte a dicho modelo y que permita la aplicación del mismo en una serie de casos, es uno de los objetivos derivados del desarrollo del modelo. Dicha arquitectura recoge la reconfigurabilidad del modelo para hacer frente a los diferentes niveles de análisis buscado e incluso la configuración de las diferentes etapas empleadas en los diferentes pasos del modelo.

La base del modelo de transporte será el clásico modelo de las cuatro etapas. En muchos trabajos no es necesario el empleo de dichas etapas, por lo tanto, parte de esa configurabilidad está basada en las necesidades particulares de cada caso. Además, en cada una de esas etapas se puede abordar el método aplicado desde diferentes ópticas. Así se establecerán los métodos y modelos más robustos y empleados en cada etapa, junto con modelos de gran utilidad.

El modelo deberá permitir los siguientes usos:

- Evaluaciones de planes de infraestructuras: Planificación estratégica para la gestión y priorización de inversiones en un plan de transporte.
- Evaluación de sistemas de transporte público: Gestión táctica de servicios de transporte público, evaluando su competencia respecto a otros medios de transporte disponibles en el sistema.
- Obtención de flujos de transporte: Estimación de los flujos en todos los tramos de una red, configurando los medios de transporte disponibles en el mismo o que entran en competencia.
- Evaluaciones económicas de infraestructuras y servicios: Estimación de flujos bajo diferentes condiciones de operación para establecer la idoneidad de una inversión o condiciones de un servicio bajo las cuales resulta rentable.

La mayoría de los software de simulación requieren de un tiempo de entrenamiento en los mismos nada desdeñable, incluso teniendo gran conocimiento del área de modelado de transporte. En este caso se busca el facilitar el estudio de diferentes escenarios a un usuario versado en modelización, sin la necesidad del conocimiento intensivo de un software particular de planificación de transporte.

Por último, se testeó la utilidad del mismo en diferentes casos prácticos. En primer lugar, la evaluación de una nueva infraestructura en Bolivia, permitiendo tanto el diseño de la misma como las condiciones de servicio bajo las

cuales esta es rentable. En segundo lugar, se empleó el modelo para la jerarquización de posibles proyectos de inversión en Brasil. Los datos obtenidos por el modelo en términos de flujo y áreas afectadas formaron parte de un sistema multicriterio de priorización de inversiones.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

3.1. INTRODUCCIÓN

El transporte es una de las actividades fundamentales dentro del día a día de cualquier sociedad, independientemente del grado de desarrollo en el que se encuentre, ya que el movimiento de personas y de mercancías ocurre de manera continua. Sin embargo, queda claro, que su importancia va aparejada a dicho grado de desarrollo. La importancia que pueda tener el movimiento de pasajeros y mercancías depende tanto de los volúmenes movidos como de las infraestructuras o modos de transporte existentes, y por lo tanto, de las capacidades del país.

Dentro de la importancia que tiene el transporte dentro de la economía de un país, el movimiento de mercancías tiene vital importancia, ya que representa los movimientos de importación y exportación así como los movimientos interregionales, y por consiguiente el transporte está directamente relacionado con la economía del país.

Como indican Ortúzar y Willumsen (2011) el movimiento de mercancías no es algo sencillo. Su complejidad radica en la cantidad de agentes y factores que lo conforman. Esto hace que para su representación se hace necesario un modelo que tenga en cuenta todos estos elementos así como las relaciones que se establecen entre ellos. Estos autores plantean la necesidad de cuatro capas de decisión y actividad. La primera de ellas relacionada con decisiones sobre producciones, destinos, tipos de productos, cantidad y relaciones comerciales. La segunda está relacionada con la logística, decisiones sobre el uso y la localización de almacenes y gestión de la cadena de suministro (por ejemplo, fabricación Lean). La tercera tiene que ver con los modos de transporte, vehículos e instalaciones multimodales para el reparto de bienes de acuerdo con la decisión previa. La última especifica la ruta de transporte (multimodal) seguida para alcanzar un destino particular.

Hay un conjunto de factores y agentes que intervienen en el movimiento de mercancías. Entre dichos factores se pueden indicar factores de posición, relacionados con la situación de elementos tales como los generadores de mercancía, las diferencias que pueden existir entre las mercancías consideradas, factores físicos, operacionales, geográficos, dinámicos o de los precios.

Poniendo la atención en los precios, se pueden encontrar qué elementos afectan a su valor. Por ejemplo, el tiempo de contrato, el volumen movido, las instalaciones de las terminales, los agentes empleados en la cadena de suministro o el modo de transporte influyen de manera importante en el precio final de un servicio de transporte de mercancías.

Respecto a los agentes, que son los diferentes actores existentes en la cadena de transporte, el Ministerio de Fomento de España recoge, en el capítulo 1 de su informe “Análisis, Información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la intermodalidad” (2003), el conjunto de agentes existentes en la cadena intermodal y su actividad dentro de la misma. Los más importantes son:

- Cargador: Persona o compañía que confía a terceros el “cuidado” de las mercancías con tal de ser entregadas a destinatario.
- Mandante: Persona física o jurídica que confía a un tercero la realización de ciertas actuaciones.
- Destinatario: Persona responsable de recoger las mercancías.
- Transportista: Persona responsable del movimiento de la mercancía, ya sea directamente o a través de una tercera parte.
- Subcontratista: Tercera parte a la que el transportista ha encargado la ejecución del transporte, completamente o una parte del mismo.
- Transitario: Es un intermediario que toma las disposiciones necesarias y/o proporciona servicios complementarios para el transporte de mercancías y otros servicios en representación del emisor.

Pueden aparecer más actores como es en el caso de transporte marítimo donde pueden aparecer fletadores, armadores, estibadores..., u otros más generales como las compañías de seguros, inspectores, clientes de la administración o los agentes de aduanas.

Como se ha dicho con anterioridad la complejidad del transporte debido a todos sus elementos, así como la importancia que tiene en el desarrollo económico de un país, ha llevado a la necesidad del desarrollo de modelos de transporte que permitan evaluar el sistema en múltiples aspectos. Los modelos no solo sirven para dar una idea de cómo está funcionando un sistema de transporte en particular, sino que permite establecer los movimientos de mercancías, y pasajeros a lo largo del mismo, el grado de uso de las infraestructuras o la congestión en las mismas. Además, sienta las bases para poder emplear técnicas de simulación, que además de dar la radiografía actual permiten a los analistas realizar estudios a futuro. Esto hace que el modelado se convierta en una herramienta muy importante, pues bajo el estudio de diferentes condicio-

nes se podrá establecer no solo si aumentará el uso de la infraestructura existente sino que se podrá identificar la bondad o viabilidad de una nueva infraestructura y su relación con la captación de nuevos flujos de mercancías.

Los trabajos llevados a cabo en el desarrollo de modelos de transporte, especialmente de mercancías, se enfrentan a una serie de características comunes. En el trabajo llevado a cabo por Cantillo, Jaller y Holguín-Vera (2014) se determinó que estas características, de forma general, son las siguientes:

- El transporte de mercancías es un proceso dinámico de cambio constante.
- Los flujos de mercancías están directamente relacionados con la demanda.
- En los distintos estudios, no hay una unidad común para definir los flujos de mercancías.
- Hay numerosos agentes dentro de la cadena interrelacionados e interactuando entre sí. Estos definen como, cuando y donde se transporta la mercancía.
- La información de las demandas es sensible desde el punto de vista comercial, debido a que las relaciones entre los agentes tienen lugar en un contexto privado.
- Un sistema de transporte, habitualmente, no está formado por un único medio de transporte, sino por un conjunto, lo cual incrementa la complejidad.
- Amplio rango de costes de oportunidad para el transporte de mercancías.

Además de todo esto uno de las dificultades más importantes a las que se enfrenta cualquier investigador en modelización de transporte es la limitación de la información disponible. Esto hace que sea necesario desarrollar herramientas que permitan el uso de esta limitada información, con el objetivo de realizar los análisis objeto del estudio (políticas de transporte, evaluación de infraestructuras, servicios, etc.).

Esta versatilidad que tienen los modelos de transporte ha hecho que sean empleados en numerosos estudios, no solo de planificación de servicios, sino para la evaluación de infraestructuras (existentes o nuevas) o incluso de políticas nacionales de transporte. Para ello cada analista ha de establecer tanto el problema al que se enfrenta como los objetivos que quiere alcanzar. Esto es así porque el nivel de agregación o de detalle de los modelos está muy relacionado con el nivel de resolución buscado. Así no es lo mismo las necesidades que puedan existir para la distribución de flujos entre regiones de un país que para un modelo de reparto dentro de una ciudad.

El desarrollo de las capacidades en el terreno de la información como son la recogida, almacenamiento y procesado de los datos así como la comunicación y el conocimiento derivado de esos datos, han ayudado, y todavía lo hacen, al desarrollo de otras áreas de las ciencias. El transporte no es una excepción a este efecto. Uno de los elementos pertenecientes a este aumento de las capacidades relacionadas con la información son los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Como indica Miller (2010) la relación entre los SIG y el transporte han ido evolucionando a lo largo del tiempo. La parte principal de los trabajos SIG para transporte es una base de datos de transporte georeferenciados. Es decir, se construye una estructura lógica que representa las localizaciones y conexiones que existen en un marco espacial donde las direcciones y distancias son significativas. Por lo tanto, su uso permite una representación de mayor exactitud y una intuitiva visualización de la información, que no solo se queda en datos geográficos, sino que permite tener en cuenta e integrar otro tipo de información como puede ser la económica o social entre otras. Todo ello facilita el empleo de diferentes modelos y algoritmos, debido a la información disponible y su relación tanto con el tramo de la red como de los puntos importantes de cada modelo, como pueden ser los orígenes y destinos de flujos, o las terminales de consolidación de la carga.

Uno de los usos principales de los modelos de transporte es el análisis de los sistemas de transporte a nivel nacional o internacional, con fines en la mayoría de los casos de índole gubernamental. Los SIG son de gran ayuda en este análisis al facilitar la representación de resultados sobre un mapa, así como su interpretación.

La relación entre cualquier trabajo en el que se empleen datos no georeferenciados con formulaciones matemáticas y aquellos en los que se emplean SIG y los algoritmos aplicados sobre ellos son claros. Así, tomando como ejemplo el trabajo de Pazour, Meller, y Pohl (2010), se puede observar que emplea una notación similar a los elementos de una representación georeferenciada ya que está basada en nodos, arcos, flujos y distancias. Al no emplear una base de datos georeferenciada las distancias han sido obtenidas a través del Atlas de Estados Unidos del 2000 de Rand McNally.

El fin de este modelo es el desarrollo de una red de ferrocarril de alta velocidad para transporte de mercancía que permita aliviar la congestión de la carretera. Para la obtención de dicha red se emplea la minimización del producto del flujo entre origen y destino por el tiempo de viajes entre dichos puntos, es decir minimizar el tiempo total de transporte, para todos los pares. Está sujeto a un conjunto de restricciones que en su mayoría podrían ser suplidas por el empleo de un GIS en el desarrollo del modelo, con la caracterización adecuada de los link y los nodos. Dichas restricciones son:

- El tiempo de viaje entre OD es la suma del tiempo de viaje de cada uno de los arcos que forman la ruta entre OD. Este depende del tipo de modo de transporte empleado. En el caso de emplear un SIG, esta caracterización podría hacerse para cada uno de los links.
- Hay una variable que indica si el nuevo modo de transporte está disponible o no.
- Otra variable indica la bi-direccionalidad o no de los arcos. En el caso de empleo de un SIG el atributo DIR ejerce el mismo efecto. DIR es un atributo que tienen todos los sistemas georeferenciados, y que está relacionada con la direccionalidad del tramo.
- Los arcos están definidos por el tipo de medio que puede usarlo.
- Restringe el total de millas recorridas por un medio de transporte (en este caso alta velocidad).
- Para el camino mínimo entre un par se emplea la formulación de mínimo coste de flujo de red, siendo su valor para cada medio de transporte cero o uno.

Las restricciones de capacidad se llevan a cabo en un post procesado mediante una formulación tipo “knapsack” multidimensional. Esta analogía con el problema de mochila es que se desean añadir flujos a arcos con capacidad. Esta analogía con el problema de mochila es que se desean añadir flujos a arcos con capacidad. Inicialmente, se emplea como un input la red sin restricciones de capacidad, lo que equivale a que la red existente tenga una capacidad infinita y solo le dan capacidad a la nueva red de alta velocidad considerada, es decir, las autopistas tendrían capacidad infinita mientras que la de ferrocarril de alta velocidad si tiene capacidad dada. Seguidamente se calcula el beneficio asociado del uso de la alta velocidad. Este beneficio es nulo en los casos en los que no se emplean tramos de alta velocidad. Se asume que si un par origen destino el flujo no es capaz de emplear la red intermodal sin restricciones, cuando se incluyan dichas restricciones ese par no empleará los tramos de alta velocidad.

Se trata de maximizar el beneficio de usar la red de alta velocidad. La restricción multidimensional knapsack consiste en que la suma de los flujos para los pares OD que usan arcos de alta velocidad debe ser menor que la capacidad del arco, para aquellos de alta velocidad. Está claro que esta capacidad ha de ser consistente con los flujos, es decir, han de tener las mismas unidades. La modelización ha sido aplicada a la parte continental de Estados Unidos mediante los datos de Commodity Flow Survey (Economic Census Transportation) J.B. Hunt Transport Services, Inc.

3.2. MODELOS DE TRANSPORTE

Un modelo es una representación, más o menos simplificada, de la realidad. El grado de simplificación dependerá de tres elementos fundamentales: datos disponibles, características del sistema que se quieran recoger y para qué va a ser empleado, es decir el alcance de análisis que se va a realizar con él.

Según Ortúzar y Willumsen (2011), un sistema de transporte se puede definir como la interacción de una infraestructura, un sistema de gestión (como puede ser la normativa aplicable a determinado medio de transporte) y los modos de transporte disponibles en el sistema y sus operadores. Estas interacciones no se dan aisladas del entorno, sino que se verán influenciadas por los cambios que se produzcan en su alrededor.

Así, por ejemplo, incrementos en la renta media de los habitantes de un país puede llevar aparejada el incremento de consumo de una mercancía, o conjunto de mercancías, pudiendo llevar incluso al aumento de tráfico de importación. Ese incremento de la demanda implicará el incremento de movimientos de esa mercancía. Si el medio habitual de transporte empleado por esa demanda es el camión se puede producir el incremento de la congestión de las carreteras y con ello la necesidad del desarrollo de un medio alternativo. El modelo permitirá la evaluación de la viabilidad de ese nuevo medio, su dimensionamiento e incluso su política de operaciones. La Figura 2 resume esta relación:

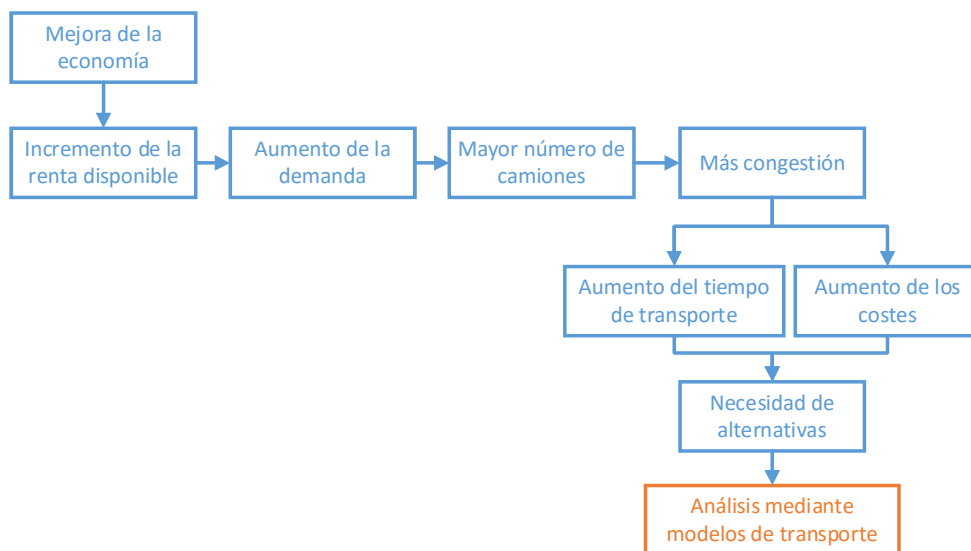


Figura 2 : Ejemplo de relación entorno y sistema de transporte.

El desarrollo de modelos de transporte no es algo nuevo, sino que lleva desarrollándose desde los años 60. Estos años de desarrollo y experimentación han llevado a la definición de una estructura general que ha sido ampliamente empleada. Esta estructura es la denominada modelo de las cuatro etapas, las cuales recogen en primer lugar la generación de los viajes, es decir del total de viajes generados y atraídos por las zonas consideradas. En segundo lugar es necesario realizar la distribución de dichos viajes, es decir viajes entre pares origen y destino. Y por último, realizar un reparto modal, es decir dividir estos viajes entre los diferentes modos existentes en el sistema, y la asignación de dichos viajes a los tramos que forman la red.

Independientemente del tipo de modelo empleado, los problemas de planificación de transporte han de seguir, de forma general, una serie de pasos, donde el modelo en sí es uno de los mismos. Estos pasos se pueden resumir en:

1. Formulación del problema. Se trata de identificar los objetivos, el alcance y las restricciones del análisis que se va a llevar a cabo.
2. Recogida de datos: Este es uno de los puntos más sensibles de la planificación, tanto por la idoneidad de los datos disponibles como de la disponibilidad en sí. La disponibilidad de los datos es uno de los principales problemas a la que se enfrentan los analistas, y una de sus principales reivindicaciones.
3. Construcción del modelo analítico: Los modelos analíticos necesitan de su especificación, estimación o calibración de los parámetros de cada uno de los componentes del mismo y la validación, que ha de ser realizada con valores que no hayan sido empleados en la calibración.
4. Generación de soluciones: Las soluciones generadas para los datos existentes nos permiten la validación y sientan las bases para la obtención de soluciones de los datos de futuro.
5. Predecir valores de futuro de los variables de entrada: Es necesario para el apartado anterior tener valores de futuro estimados para los análisis a futuro.
6. Verificación de modelo y soluciones: Se pueden plantear diferentes escenarios de planificación para la obtención de resultados coherentes con los objetivos y restricciones coherentes con lo definido en la formulación del problema.
7. Evaluación de las soluciones: Permite establecer las recomendaciones derivadas de las soluciones en función de los objetivos buscados. Es decir, si se busca el establecimiento de una política na-

cional de transporte, esta evaluación permitirá diseñar las recomendaciones e incluso inversiones necesarias para la mejora de la red nacional de transporte.

8. Implementación de las soluciones: Esta parte suele quedar lejos de las manos del analista, sobre todo cuando se trata de modelos de amplio ámbito geográfico, pues suele estar en manos de los países que encargan el análisis.

La parte central de estos problemas de planificación de transporte es el desarrollo del modelo en sí. A continuación, se describirá más detalle los problemas de planificación de transporte y el clásico modelo de transporte de las cuatro etapas, por ser el más ampliamente utilizado. Es necesario indicar que en algunos casos no se dan las cuatro etapas en sí, separadas, sino que se emplean adaptaciones en las que se aplican de manera conjunta dos de estas etapas. Esto se podrá ver en la explicación de modelos desarrollados en el ámbito europeo.

3.2.1. Planificación de transporte multimodal de mercancías.

Cuando se habla del transporte de mercancías, tiene gran relevancia el empleo de diferentes medios de transporte dentro de la misma cadena de transporte. Es decir, desde un origen de carga a un destino de carga es muy habitual que la carga pase por diferentes medios de transporte. En el diccionario de transporte intermodal del Ministerio de Fomento de España (2003) se define el transporte en el que se emplea más de un modo de las siguientes formas:

- **Transporte intermodal:** Movimiento de mercancías en una misma unidad (por ejemplo, TEU) o vehículo usando sucesivamente dos o más modos de transporte sin manipular la mercancía en los intercambios de modo.
- **Transporte multimodal:** Movimiento de mercancías usando dos o más medios de transporte. El transporte intermodal es un tipo de transporte multimodal.
- **Transporte combinado:** Es un concepto usado por la Comisión Europea, para designar el transporte intermodal de mercancías entre estados miembros de la Unión Europea.

Además de estos tipos de transporte múltiple, en los últimos años se ha planteado, uno nuevo: el **Transporte Sincro-modal**. En este tipo de transporte se plantea la combinación de dos o más medios de transporte de forma estructurada, eficiente y sincronizada. Los cargadores o clientes seleccionan de

forma independiente, para cada envío, el modo basándose en circunstancias operacionales y/o requerimientos de los clientes.

En la revisión llevada a cabo por SteadieSeifi et al. (2014) se determinó que el transporte multimodal e intermodal se emplea de forma intercambiable, mientras que no se ha detectado literatura en Investigación de operaciones donde se emplee de forma explícita el transporte combinado y el sincro-modal.

Los problemas de planificación se pueden dividir en tres grupos principales relacionados con el tipo de decisión u objetivos a los que tienen que hacer frente. Así la planificación puede ser estratégica, táctica y operacional. Ejemplos de estas planificaciones son: una nueva infraestructura (planificación estratégica), frecuencia de un servicio (planificación táctica) y mejor elección de servicio (decisión operacional).

3.2.1.1. Problemas de planificación estratégica.

Dentro de estos problemas se pueden incluir todos aquellos relacionados con decisiones de inversión en infraestructuras en la red existente.

SteadieSeifi et al. (2014) han detectado que dentro de la literatura existente para la resolución de estos problemas todavía existen un conjunto de limitaciones a las que es necesario hacer frente, relacionadas sobre todo con las características de los nodos de consolidación de carga, así como el número de nodos importantes representados en los modelos, y que presentan una oportunidad de mejora en los problemas de planificación.

La primera de estas limitaciones está relacionada con las congestiones que se pueden dar en nodos de consolidación o intercambio modal, debido a las capacidades de los sistemas de consolidación existentes en el mismo. La importancia de tener esto en cuenta es que puede limitar el uso de nodos más congestionados y permitir una distribución más equilibrada de flujos sobre la red.

Por otro lado, el transbordo y sus costes asociados es otro de los elementos muy a tener en cuenta, y para el cual no hay demasiados avances. Transbordo es el cambio de la carga entre medios de transporte diferentes, por ello un modelo multimodal no puede olvidar este elemento de la cadena. En muchos de los casos en los nodos de transbordo es donde se producen importantes retrasos que se traducen en costes, además de los costes asociados a las operaciones de transbordo o tasas del nodo (como, por ejemplo, tasas portuarias).

SteadieSeifi et al. (2014) también indican la existencia de limitaciones en los trabajos respecto a la importancia de la localización de las unidades de almacenaje vacías, y de su distancia al nodo de intercambio modal. Así, para el transporte de contenedores, es tan importante la localización de estos lugares de almacenaje como el mismo puerto intermodal.

Nuzzolo, Crisalli, y Comi (2013) desarrollaron un modelo con fines de planificación estratégica, mediante la estimación de flujos internacionales de importación y exportación. El sistema modelado persigue el objetivo de caracterizar los flujos de mercancías mediante su origen y destino, periodo temporal, tipo de mercancía (por ejemplo perecedera, no perecedera, etc.), y modo de transporte. Para ello emplea modelos de generación, distribución y reparto modal de la carga. El resultado de esto alimentará modelos logísticos, más relacionados con el empleo y diseño de la red. La red está caracterizada en tiempo y coste, lo que permite el ajuste del modelo de reparto modal. Para los tiempos se tienen en cuenta el tiempo en movimiento y el tiempo de paradas o descansos, en el caso de la carretera. Para el transporte combinado se emplea, tanto para coste como para tiempo, una distribución estadística función de la distancia del viaje.

Lo ideal sería la construcción del modelo completo, desde la generación de los flujos de mercancías hasta el uso que estas hacen de la red presente y futura. Asimismo, una cadena de costes y tiempos completa, daría mayor precisión al sistema.

En muchos de los casos, los estudios se centran en movilidad urbana, como es el caso de Fierek y Zak (2012), donde se tiene en cuenta diferentes medios de transporte, y que mediante la simulación de un modelo de las cuatro etapas, junto con modelos de elección multicriterio, se evalúa la mejor opción.

El problema surge cuando el modo de transporte no lleva aparejado un medio de transporte tan claro. Es decir, cuando se tiene la comparación entre bus, vehículo privado, metro... es fácil determinar la unidad de transporte, y el tamaño de la misma.

En el caso de mercancías la unidad de transporte se complica, tanto por la naturaleza de la mercancía en si (que no admite cualquier tipo de empaquetado y almacenaje), como de las cantidades movidas y el tamaño de los envíos. A veces es necesario sacrificar frecuencia frente a tamaño para el aprovechamiento de economías de escala, y en otros casos el alto valor de la mercancía obliga a envíos más pequeños, pero que cumplan las fechas de entrega. Existirá una cantidad óptima de pedido, relacionada con el coste de transporte total y que por tanto depende del modo de transporte elegido. Por ello la selección modal se ve necesariamente afectada por la cantidad de envío y viceversa,

siendo necesaria la consideración conjunta de ambos aspectos (Jose Holguín-Veras et al. 2011).

3.2.1.2. Problemas de planificación táctica.

Los problemas de planificación táctica se encargan de la búsqueda de una utilización óptima de una infraestructura. Para ello se eligen los servicios y medios de transporte planificando tanto itinerarios como frecuencias.

SteadieSeifi et al. (2014) caracteriza un servicio mediante un origen, un destino, terminales intermedias, modo de transporte, ruta y su capacidad. De la misma forma el modo de transporte se caracteriza por su capacidad de carga, velocidad (muy relacionado con el tiempo de transporte) y el precio. El precio y los costes suelen ser valores fijos, aunque puede que se vean afectados por economías de escala.

Este tipo de problemas se dividen en dos tipos fundamentales:

- Planificación de flujo de red (Network flow planning, NFP). Relacionado con la planificación de flujos de los movimientos de las mercancías.
- Diseño de redes de servicios (Service network design, SND). Decisiones de planificación de servicios incluyendo las decisiones sobre los servicios y modos de transporte necesarios para el movimiento de mercancías.

La mayoría de los estudios dedicados a la planificación táctica están relacionados con problemas reales específicos, y por lo tanto, con modelos y algoritmos desarrollados a medida para cada caso. Se ha detectado en la mayoría de los trabajos la falta de integración de la gestión de los recursos (contenedores, vehículos, tripulaciones, etc.), ya que muchas veces se realizan estudios de planificación de estos recursos pero de forma independiente de los servicios, a los que van directamente ligados.

La metodología empleada para la resolución de estos problemas va desde algoritmos heurísticos o metaheurísticos a modelos de simulación. De forma general se recogen en dos grandes grupos de estudio. Uno de los grupos son aquellos estudios que emplean simulación, cuyos modelos muestran un alto nivel de detalle (siempre acorde con los objetivos del estudio) por lo que pueden llegar a suponer altos requerimientos de información y computacionales. Por otro lado, se encuentran los de optimización, con menor detalle pero mayor rapidez en la generación, evaluación y selección de las estrategias propuestas.

El modelo que se pretende desarrollar en la presente tesis tiene objetivos de simulación, esto hace que sea interesante conocer cómo se han ido resolviendo los problemas tácticos en simulación.

Así Caris, Macharis, y Janssens (2011) han desarrollado un modelo para el empleo de simulación. El objetivo de dicho trabajo es el diseño de una red intermodal de transporte mediante barcaza. El modelo intenta estudiar el transporte intermodal por barcaza como un todo para demostrar los beneficios de cooperación entre medios. La metodología llevada a cabo permite estimar el impacto de la política de medidas llevadas a cabo para estimular la cooperación entre terminales interiores.

El modelo desarrollado está construido para el caso particular de una red con terminales en puertos y terminales interiores, es decir no es una generalización. La modelización de estos elementos se lleva a cabo mediante nodos unidos por arcos. Cuando un arco une dos nodos interiores lo que representa es la cooperación entre esas dos terminales, con un coste fijo. Mientras que si lo que unen son nodos portuarios se representan tiempos perdidos en los sistemas en puerto y costes por barco. Se consideran los flujos de entrada y salida, de forma que los de entrada van desde puerto a interior y las de salida al contrario. Es decir las generaciones y atracciones de carga estarán en esos puntos, y no en los orígenes y destinos de la cadena completa.

La obtención de la solución está basada en la minimización del coste total, siendo este coste total el de contratación del buque, un coste de espera en puerto y el coste de cooperación. Este último representa los costes de generación de la red. También incluye un coste de los links, que modela las economías de escala alcanzadas de la consolidación de los flujos de carga. Para la simulación se emplea el modelo SIMBA (Simulation model for InterModal BAрге transport), que es un modelo de simulación discreta. Este modelo tiene tres componentes principales, definidas por Macharis, Pekin, y Caris (2008). Dichas componentes son la red de vías navegables interiores, el área del puerto de Antwerp y la planificación de las esclusas. Dentro de la red se definen terminales, conexiones entre las vías y flujos de contenedores.

No se modelan los posibles medios con los que podría entrar en competencia el transporte en barcasas. Por ejemplo, no se tienen en cuenta las conexiones de ferrocarril del hinterland.

Chen y Miller-Hooks (2012) plantearon un modelo para la estimación de la capacidad de recuperación de una red después de la ocurrencia de un desastre. En el modelo se tiene en cuenta diferentes medios de transporte, camión, ferrocarril y marítimo.

3.2.1.3. Problemas de planificación operativa.

Este tipo de problemas lo que buscan es la elección del mejor servicio y los modos de servicio asociados, así como los itinerarios. Las características de dinamismo y aleatoriedad de estos problemas, hacen que presenten una complejidad superior a los de los niveles estratégicos y tácticos.

La planificación operativa es la que se ve más afectada por los cambios que suceden en cada momento, por lo que debe llevarse a cabo un seguimiento del sistema en tiempo real. Este tipo de problemas no se centra tanto en una minimización de costes, como puede ser en los anteriores, sino que se centra más en la maximización de la fiabilidad del sistema.

De manera general se pueden agrupar en dos tipos de problemas (Stadie-Seifi et al. 2014), los de organización de recursos y los de planteamiento de itinerarios. Los primeros se centran sobre todo en las distribuciones de recursos sobre la red y la segunda en la optimización en tiempo real de las planificaciones de rutas u horarios. Aunque ambos interactúan entre si dando lugar a un problema de mayor complejidad.

Kaspi y Raviv (2013) desarrollaron un modelo de planificación de línea y de horarios. Este fue formulado con el objetivo de minimizar los inconvenientes del usuario y los costes operacionales. Los inconvenientes se han modelizado como el tiempo total que el pasajero pasa en el sistema de ferrocarril. En este tiempo se incluye el de espera e origen y los transbordos en estación. Para la resolución del modelo se emplean metaheurísticos. Los datos que se emplean de punto de partida proceden del ferrocarril de Israel. El resultado de la optimización provoca un ahorro en tiempo de viaje de los pasajeros de un 20%. El modelo está formado por las rutas, la demanda de pasajeros por viaje, el tiempo de ciclo, el horizonte temporal, y las restricciones de seguridad y operacionales. Lo que se busca es la minimización del coste asociado con el tiempo de viaje de los pasajeros y la operativa de los trenes. La optimización se lleva a cabo en dos fases. La primera es la generación y evaluación de un conjunto de soluciones aleatorias de acuerdo a un mecanismo aleatorio. Tras esto se actualizan los parámetros del mecanismo aleatorio en base a esas soluciones para obtener una “mejor” muestra en la siguiente iteración.

Por otra parte Di Francesco, Lai, y Zuddas, (2013), plantearon el problema que representa la reubicación de los contenedores vacíos en las redes marítimas bajo las posibilidades de interrupciones en el puerto. La toma de decisiones en este sentido no puede ignorar la naturaleza incierta de los parámetros de dicho problema. Los autores emplean un enfoque de programación estocástica de manera que se tiene en cuenta la naturaleza incierta de los datos

principales del problema. Se lleva a cabo una optimización multi-escenario con condiciones de no-anticipatividad. Los experimentos demuestran que esta solución proporciona una mayor cobertura frente a la incertidumbre que las decisiones determinísticas, y muestra formas de robustez que pueden mitigar los riesgos de no cumplir con la demanda de contenedores vacíos. Para ello se realizan un modelo en el la red está representada por los puertos y los tramos que los unen para ocho periodos temporales.

El modelo desarrollado no lleva implementado ningún proceso de optimización, pero si su diseño y parametrización sirven en la definición completa de este tipo de problemas, debido a la estimación de flujos que permite realizar, así como el planteamiento de diferentes escenarios.

Algunas limitaciones que se han encontrado en los estudios operacionales previos son que el intercambio modal no es tenido en cuenta. Tampoco se ha explorado en profundidad la asignación de recursos multi-activos, por ejemplo, cajas reutilizables para el pedido del cliente que van a ser movidas dentro de unidades mayores. Ya no solo se trata de un posicionamiento de estos elementos mayores como son los contenedores, sino de los elementos de menor volumen. Otro elemento importante son los tiempos de transbordo y capacidad de terminales, como es el modelo que se incorporará en la presente tesis.

3.2.2. Modelo de las cuatro etapas

Aunque ha sido ampliamente empleado en el transporte de pasajeros, muchos autores plantean que puede ser empleado de forma satisfactoria para el transporte de pasajeros. Pero a pesar de ello cada uno de los pasos del modelo puede adoptar una forma muy alejada de las empleadas para pasajeros. Una de las diferencias más importantes que existen entre ambos tipos de transporte es la cantidad de decisores implicados en el transporte (de Jong, Gunn y Walker 2004). Para el transporte de pasajeros el elector de la opción de transporte la toma el propio pasajero, sin embargo, en el de mercancías están involucrados muchos más actores (transportista, cargadores, intermediarios, conductores, operadores de mercancía...). No solo hay variedad en los electores, sino también en los elementos a transportar, tanto en naturaleza como en tamaño y embalaje. Y de manera importante se establece una gran diferencia en la información disponible. Así, en la mayoría de los modelos de pasajeros la información necesaria está totalmente disponible, cosa que no ocurre en los de mercancías y que lleva a la necesidad de elegir si es más adecuado la elección de un modelo agregado frente a uno desagregado.

Este modelo de las cuatro etapas consiste en los siguientes pasos (con sus modelos particulares):

- Producción y atracción. Son modelos que permiten la obtención de las cantidades que han de ser transportadas desde un conjunto de orígenes y de las cantidades que han de ser transportadas hasta un conjunto de destinos.
- Distribución. Una vez obtenidos los valores de producción y atracción hay que generar flujos de mercancías entre orígenes y destinos de forma que se obtenga unas matrices origen-destino de flujos de mercancías.
- Reparto modal. Es una de las partes fundamentales de los modelos de planificación de transporte multimodal, porque obtiene los flujos de mercancías que usan cada uno de los diferentes medios de transporte que se reflejan en el modelo.
- Asignación. Se trata de la asignación de los flujos a cada uno de los tramos de la red del modelo. Se puede llevar a cabo de diferentes formas, por ejemplo, empleando directamente las toneladas de transporte o transformándola en números de vehículos antes de la asignación. Esta última suposición lleva a la necesidad de incorporar modelos de cantidades de pedido o envío para poder transformar las toneladas en vehículos, o en otros casos asumir una unidad de transporte consistente con todos los medios de transporte que se van a usar y con ella transformar en vehículos (TEU-contenedor estándar de 20 pies, FEU-contenedor estándar 40 pies, etc.).

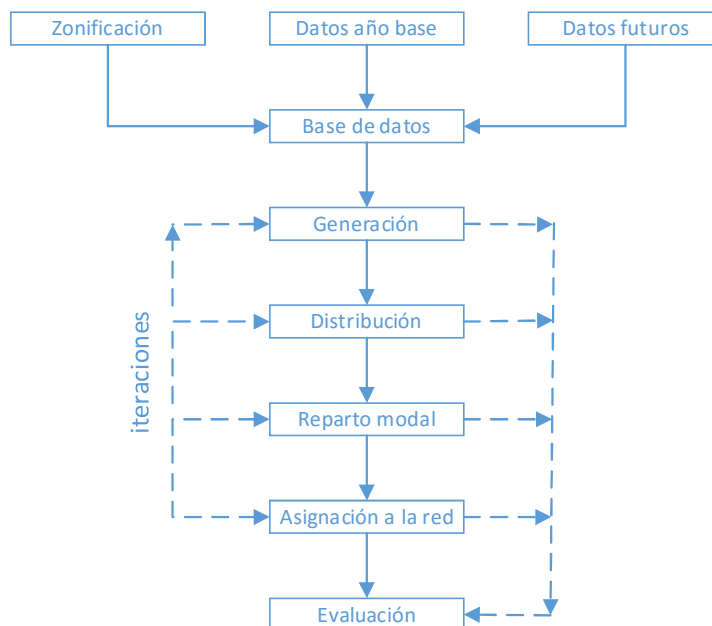


Figura 3: Modelo clásico de las cuatro etapas (Ortúzar and Willumsen 2011).

Además de la transformación en vehículos que se ha indicado, hay otra serie de transformaciones, mediante ratios o metodologías, que tendrán que ser tenidas en cuenta y evaluadas con cuidado, como puede ser la transformación de unidades físicas en unidades monetarias, ya que tendrán influencia en los resultados de los pasos que lleve a cabo el modelo.

3.2.2.1. Modelos de producción y atracción

Estos modelos buscan la obtención de todos los viajes o cantidades de mercancías que son generados o atraídos por un conjunto de puntos, que serán los orígenes y destinos de los flujos que se distribuirán por la red considerada.

Se pueden agrupar este tipo de modelos en cuatro grupos fundamentales:

- Modelos de tendencia y de series temporales
- Modelos de dinámica de sistemas
- Modelos de ratios de viajes de zonas
- Modelos Input-Output y relacionales

Hasta 2004 se han desarrollado modelos con datos agregados, no se ha podido encontrar modelos de producción y atracción que hayan empleado información desagregada (de Jong, G.; Gunn, H.F.; Walker 2004).

Tabla 1: Ventajas y desventajas de modelos de producción y atracción.

Tipo de modelo	Ventajas	Desventajas
Series temporales	Requerimientos limitados de datos (pero para varios años)	Poco conocimiento de la causalidad y, el alcance limitado de los efectos de políticas
Dinámica de sistemas	Requerimientos limitados de datos Puede dar interacciones del uso de la tierra Se pueden incluir efectos externos y de políticas	No hay test estadísticos de los valores de los parámetros
Ratios de viajes	Requerimientos limitados de datos (datos de las zonas)	Poco conocimiento de la causalidad y, el alcance limitado de los efectos de políticas
Input-output	Relacionado con la economía Puede dar interacciones del uso de tierras Efectos de políticas si hay coeficientes elásticos	Necesita una tabla Input-Output preferentemente multi-regional Asunciones restrictivas si hay coeficientes fijos Necesita conversión de valores a toneladas Se necesitan identificar los flujos de importación y exportación

3.2.2.2. Modelos de distribución

Como en el caso anterior, los modelos encontrados en la literatura están basados en datos agregados. Dentro de estos modelos los más empleados son métodos gravitacionales. Este tipo de modelos se basan en una formulación similar a la Ley de la Gravitación Universal. El flujo entre un par origen destino es el producto de la producción en origen por la atracción en destino dividido por alguna formulación del coste generalizado del transporte. Algunos modelos que han empleado esta solución son los presentados en la Tabla 2:

Tabla 2: Modelos gravitacionales de distribución.

Modelo	Documentado en
Dutch TEM-II	Tavasszy, (1994)
Dutch SMILE	Tavasszy et al, (1999)
Great Belt traffic model	Fosgerau, (1996)
Estudio Finandés de diferentes modelos de distribución	Likkanen et al,(1993)

Pero además se han adoptado otro tipo de soluciones en otros de los modelos estudiados, Tabla 3:

Tabla 3: Modelos de distribución que no emplean el método gravitacional.

Modelo	Solución	Bases
Nacional de Italia	Análisis multi-regional input-output con coeficientes elásticos	Después de regionalización y transformación de unidades monetarias a toneladas. El modelo Input-Output sustituye al modelo PA y al de distribución.
STREAMS SCENES	Similar al anterior	
NEAC	Modelo gravitacional pero para la resolución conjunta de PA y distribución	Chen and Tardieu, (2000)
Fehmarn Belt freight transport model	Modelo gravitacional pero para la resolución conjunta de PA y distribución	Fehmarm Belt Traffic Consortium, (1998)
Gravitacional	Requerimientos de información limitados Algunos efectos de las políticas a través de la función de coste del transporte	Ámbito limitado para poder incluir factores explicativos y efectos de las políticas Número limitado de parámetros de calibración
Input-output	Relacionado con la economía Puede dar interacciones del uso de tierras Efectos de políticas si hay coeficientes elásticos	Necesita una tabla Input-Output preferentemente multiregional Asunciones restrictivas si hay coeficientes fijos Necesita conversión de valores a toneladas

3.2.2.3. Modelos de reparto modal

Los modelos de reparto modal para mercancías, tanto del tipo agregado como del desagregado, se pueden agrupar, según la literatura existente, en los siguientes:

- Modelos basados en elasticidades: Reflejan los efectos producidos al cambiar una única variable, como puede ser el coste de un medio de transporte. Las elasticidades proceden de otros modelos o del conocimiento experto. Se suelen emplear en evaluaciones estratégicas y/o una primera aproximación o cuando la disponibilidad de información es escasa.
- Modelos de reparto agregados: Este tipo de modelos son sobre todo modelos logit, tanto binomiales como multinomiales. No proporcionan cantidades totales de transporte, por ejemplo mercancías, sino que proporciona el porcentaje de uso de cada uno de los modos de transporte considerados. Esto lleva a que este tipo de modelos tengan elasticidades condicionadas. Están basados en el concepto de maximización de la utilidad individual. Una desventaja de utilizar la forma multimodal es que las elasticidades cruzadas son iguales.
- Modelos económicos neoclásicos: Proceden de la Teoría de la Empresa. Mediante el Lema de Shephard se puede derivar una función de demanda de transporte, partiendo de una función de costes donde los servicios de transporte son uno de los inputs. Su uso es complicado en un modelo de las cuatro etapas, ya que el reparto del volumen de transporte es una variable relevante.
- Modelos econométricos directos: La predicción del número de viajes se estima directamente, es decir, no depende como en los otros casos de la estimación conjunta de la demanda total de todos los medios de transporte.
- Modelos de reparto desagregados: Este tipo de modelos emplean información de encuestas hechas a los transportistas. Muchos de los modelos empleados son multinomial logit (MNL) o nested logit (NL), que para las observaciones desagregadas puede basarse en la teoría de la maximización de la utilidad aleatoria bajo algunas asunciones generales. El elector es la empresa, por ejemplo la de transporte. Las funciones de utilidad indirectas pueden ser reformuladas en este contexto como funciones de beneficio (la diferencia entre los ingresos y la función de costes). Se emplea la teoría de la maximización del beneficio aleatorio, consistente con la teoría microeconómica de la empresa. En los modelos

MNL se sigue manteniendo la propiedad de elasticidades cruzadas idénticas, pero no en los de tipo NL.

- Modelos de preferencias declaradas: Han sido empleados en algunos modelos, pero no para el desarrollo de modelos de estimación de transporte. Su uso ha estado más centrado en la estimación de medidas de valores de tiempo. En este tipo de modelos pueden incluir otro tipo de variables cualitativas como puede ser la fiabilidad.
- Otro tipo de modelos tratan de forma simultánea elecciones de modo y logísticas.
- Aproximación mediante micro-simulación: En Estados Unidos se desarrolló un prototipo para transporte de mercancías en el área de Portland. En este caso se combinan dos niveles de resolución en el modelo. El modelo de alto nivel es modelo Input-Output que produce flujos entre zonas en términos monetarios. En nivel inferior se estiman los patrones de viajes de vehículos partiendo de las salidas del nivel superior. Este último nivel es micro-simulación.
- Modelos de red multimodal: Este tipo de modelos predicen simultáneamente el modo y la ruta. Hay múltiples combinaciones ruta-modo para un par OD determinado, por ello se emplea un algoritmo de minimización de coste para elegir la mejor opción.

Tabla 4: Modelos de reparto modal.

Modelos teóricos	Modelos de transporte
Modelos basados en elasticidades	PACE-FORWARD ((Carrillo et al. 1996). Escenarios políticos hasta 2015 EXPEDITE (EXPEDITE, 2002)
Modelos de reparto agregados	NEAC (Blauwens and van de Voorde, 1988)
Modelos económicos neoclásicos	(Friedlaender and Spady 1980) (Oum 2014)
Modelos económicos directos	(Quandt and Baumol 1966)
Modelos de reparto desagregados	Modelo de elección entre carretera y tren para mercancías en USA, (Winston 1981) . Modelo NL con la encuesta de transportistas de Francia en 1988 Modelo de elección del modelo italiano, Nuzzolo y Russo, (1995) Modelo de elección de preferencias declaradas y reveladas, (Fosgerau 1996) EUFRANET, modelo de elección vasado en preferencias declaradas y reveladas, Reynaud y Jiang (2000) FTC, Modelo de elección de preferencias declaradas y reveladas (1998) Modelo de elección de preferencias declaradas y reveladas, Ministerio francés de transporte, (G. de Jong and Gunn 2001)
Aproximación mediante micro-simulación	Modelo de localización del proveedor, tamaño del flete y elección de modo.(Chiang 1981) Modelo de tamaño de flete y elección de modo, (McFadden, Winston, and BOERSCH-SUPAN 1985) Modelo de conjunto discreto-continuo estimado mediante encuesta.(W. Abdelwahab and Sargious 1992) , (W. M. Abdelwahab 1998). Modelo de elección basado en el coste logístico total (Blauwens and VAN DE VOORDE 2014) (NEFFENDORF et al. 2001) LASER EUNET
Modelos de red multimodal	STAN (software),(Crainic 1989) NEMO SAMGODS Modelo de Canadá Modelo Finlandia NODUS (Software) WFTM,(Geerts and Jourquin 2001), (Beuthe et al. 2001). STRTEAMS SCENES SMILE ATEMM, Newton,(2001)(Sean Newton 2001) CODE-TEN TEN FNEM, (Friesz, Gottfried, and Morlok 1986)

Tabla 5: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de modelos.

Tipo de modelo	Ventajas	Desventajas
Basado en elasticidades	Requerimientos de información limitados. Aplicación rápida.	Las elasticidades no son transferibles. Solo impactos de medidas simples, no hay sinergias.
Modelos de reparto agregados	Requerimientos de información limitados.	Bases teóricas débiles. Pequeña percepción de la causalidad. Ámbito limitado para efectos de las políticas.
Neoclásicos	Requerimientos de información limitados. Bases teóricas.	Difícil inclusión en el modelo de las cuatro etapas.
Demanda directa	Requerimientos de información limitados.	Difícil inclusión en el modelo de las cuatro etapas.
Modelos de reparto desagregados	Bases teóricas. Posibilidad de incluir variables causales y medidas políticas.	Necesidad de desagregar la información.
Microsimulación	Incluye varios comportamientos de elección. Relacionado con teoría.	Importantes requerimientos de información o muchas asunciones es distribución
Red multimodal	Requerimientos de información limitados. Bases teóricas. Puede incluir demandas elásticas y políticas afectando al coste generalizado del transporte.	Pequeña percepción de la causalidad En la mayoría hechos con demandas fijas.

3.2.2.4. Modelos de asignación

Los modelos de asignación llevan a la red los viajes estimados por cada medio de transporte, permitiendo ver la ocupación de cada uno de los tramos que confirman la red. No todos los modelos llevan a cabo este último paso, o no asignan todos los medios de transporte considerados en el análisis. En muchos casos el transporte de pasajeros se asigna de forma conjunta con el de mercancías.

Tabla 6: Tipos de modelos de asignación, ventajas y desventajas.

Tipo de modelo	Ventajas	Desventajas
Paso de asignación separado	El modelo de elección puede ser desagregado. Permite interacción con pasajeros si la asignación de pasajeros y mercancías se hacen de forma conjunta.	La ausencia de interacción entre demanda y asignación puede ser irreal. Las cadenas de transporte son difíciles, aunque no imposibles de incorporar.
Red multimodal	Tiene lugar sustitución entre combinaciones ruta-modo Se pueden llevar a cabo cadenas con diferentes modos y rutas.	Pequeño alcance para controlar el proceso de optimización. Es decir para algún par OD la combinación dada puede ser irreal.

3.3. MODELOS DESARROLLADOS EN EUROPA Y SUS APLICACIONES

Restringiendo el ámbito a los modelos que se han estado desarrollando en Europa (a nivel estatal) en los últimos años, estos se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 7: Modelos desarrollados en Europa hasta 2004.

Ámbito	Modelo	Software
Suecia	SAMGODS (Swedish national freight model system).	STAN
Noruega	NEMO (Norwegian national freight model system).	STAN
Bélgica	WFTM (Wallom region freight model system).	NODUS
Italia	Italian national model system. Modelos Input-Output y modelos de elección desagregados.	
Alemania	TEM (Transport Economics Models). SMILE (Strategic Model for Integrated Logistic Evaluation).	
Reino Unido	STEMM (Strategic European Multi-modal Modelling).	
Europa	SCENES (Scenarios for European transport). NEAC.	

La mayoría de estos modelos emplean el modelo de las cuatro etapas. A continuación se desarrolla como cada uno de ellos lo han adoptado (Tabla 8).

Tabla 8: Modelos de transporte desarrollados en Europa hasta 2002.

Proyecto	Modelo	Años de simulación	Escenarios/Políticas
Evaluación de la estrategia medioambiental	STREAMS	1994 2010 2020	Escenario de referencia. Escenario de Política común de transporte (Common Transport Policy). Escenario red transeuropea (TEN-T). Escenario solo tren en el TEN-T.
Forecast 2020 (NEA,2000)	NEAC	1995 2000 2010 2020	Escenario de referencia. Escenario de integración rápida. Escenario de política sostenible.
ASTRA (ASTRA 2000)	ASTRA system dynamic model	2000-2026	Mejora de seguridad y emisiones. Incremento de impuestos de combustibles y reducción del coste laboral. Equilibrado de impuestos de combustibles y reducción del coste laboral. Impuestos a los combustibles e inversiones en la red. Programa de políticas integradas.
SCENES (SCENES,2001)	SCENES model	1995 2020	Escenario externo junto cuatro escenarios de costes (coste constante, básico, tendencia observada y radical).
EXPEDITE (EXPEDITE, 2002)	EXPEDITE meta model	1995 2005 2010 2015 2020	Escenario de referencia y variaciones de 15 políticas de transporte de mercancías.

Tabla 9: Modelos de transporte desarrollados en Europa entre 2004 y 2012.

Modelo	Cliente	Fuentes	Año de desarrollo	Área de estudio	Número de zonas (int + ext)	Número de mercancías	Elecciones incluidas	Modos
Modelo nacional Italiano	Consejo Nacional de Investigación	(A Papola 2004)	2004	Italia	267 internas	5, perecederas y no per	Generación, distribución, elección modal y asignación	Carretera Carretera-Tren
SMILE +	Ministerio de transporte Holandés	(L.A. Tavasszy, Smeenk, and Ruijgrok 1998) (Bovenkerk 2005)	1998-2005	Holanda	40 + 60 (NUTS2)	50 familias logísticas	Generación, distribución, elección modal, logística y asignación	Carretera, Tren, IWW, Mar, Aire, Ductos
MODEV	Ministerio de transportes Francés	MVA y Kessel + Socio (2006)	2005-2006	Francia	342 int, 230 ext, 25 puertos	10 NSTR1	Generación, distribución, elección modal y asignación	Carretera, Tren, Carretera-Tren, IWW
Modelo BVWP	Ministerio de transporte Alemán	ITP y BVU (2007)	2006-2007	Alemania	439 int (NUTS3) 112 ext(NUTS0-2)	10 NSTR1	Generación, distribución, elección modal y asignación	Carretera, Tren (4 tipos), Carretera-Tren, IWW (modelos separados para aire y mar)
Transtools	EU	(Ming Chen 2011) (TNO M&L (The Netherlands) 2006) (Christian Overgård Hansen 2011) (Tetraplan 2009)	2005-2009	Europa	277+19 (NUTS2)	10 NSTR1	Generación, distribución, elección modal, (logística) y asignación	Carretera, Tren, IWW, Mar
Worldnet	EU	(Ming Chen 2011) (S Newton 2008)	2007-2008	Europa (tráfico con no-europea)	Por los menos 1500 en total (NUTS3)	10 NSTR1	Generación, distribución, elección modal y asignación	Carretera, Tren, IWW, Mar, Aire

Modelo	Cliente	Fuentes	Año de desarrollo	Área de estudio	Numero de zonas (int + ext)	Número de mercancías	Elecciones incluidas	Modos
Norway	Autoridades nacionales de transporte	(Kleven 2011) (Gerard de Jong and Ben-Akiva 2007)	2004-2009	Noruega	475 + 61	32 basadas en NSTR2	Generación, distribución, logística y asignación	Carretera, Tren, Mar, Aire
Samgods (Suecia)	Autoridades nacionales de transporte	Vierth (2011) (Gerard de Jong and Ben-Akiva 2007)	2004-2009	Suecia	290 + 174	35 basadas en NSTR2	Generación, distribución, logística y asignación	Carretera, Tren, Mar, Aire
DA para Flandes	Ministerio de transporte de Flandes	(G de Jong, J Baak, K Ruijs, T Bellemans, D Janssens 2010)	2009-2010	Flandes y Bruselas	309 + 22	9	Generación, distribución, logística y asignación	Carretera, Tren, IWW, Mar, Aire
Modelo NO-DUS	Varios, incluida la región de Wallon	(Pekin et al. 2008) (Jourquin and Beuthe 1996)	2006	Bélgica o Europa	Sobre 600 en Bélgica (NUTS5), más de 250 en Europa (NUTS2)	10 NSTR1	Reparto modal y asignación	Carretera, Tren, IWW
LOGIS	EU	Nestear (2010)	2009-2010	Euros (foco en Francia)		10 NSTR1	Generación, distribución, reparto modal y asignación	Carretera, Tren, Carretera-Tren, IWW
Basgoed (Holanda)	Ministerio de transporte Holandés	Tavasszy (2011) (SIGNIFICANCE; NEA;DEMIS 2010)	2010-2011	Holanda	40 + 30	10 NSTR1	Generación, distribución, reparto modal y asignación	Carretera, Tren, IWW

3.3.1. ETIS

ETIS es el acrónimo del proyecto “European Transport policy Information System Development and implementation of data collection methodology for EU transport modelling” (“ETIS” 2014).

Se trata de una base de datos que recoge toda la información necesaria en el tema de transporte. Por lo tanto, recoge la información socio-económica de las regiones a estudio así como la red considerada con todos sus elementos y características y flujos sobre la misma.

En cuanto a los indicadores socioeconómicos que tiene en cuenta la estructura de la base de datos se pueden encontrar:

- Producto interior bruto
- Producto interior bruto en paridad en poder de compra, esto permite eliminar la diferencia de niveles de precios entre diferentes países.
- Población, diferenciada por sexo o por grupo de edad.
- Área, en kilómetros cuadrados.
- Valor añadido bruto total y valor añadido bruto por sectores.
- Empleados totales y por sector.
- Población económicamente activa.
- Desempleados.
- Instalaciones de alojamiento.
- Habitaciones en instalaciones de alojamiento.
- Número de camas en establecimientos de alojamiento.
- Hogares.
- Ingresos por hogar.
- Gastos en investigación y desarrollo.
- Personal en I+D.
- Empresas.
- Vehículos registrados.

Algunas regiones no tienen datos, por ejemplo, por no ser un nivel administrativo, sino que forma parte del mismo. Cuando esto sucede se toman los datos del nivel administrativo al que pertenece y se hace un reparto poblacional. Los pesos poblacionales será el valor de la población de cada una de las regiones que forman un nivel administrativo, dividido por el valor total de la población en ese nivel. Si se consideran los municipios forman parte de una provincia, el peso poblacional del municipio A se calculará mediante el cociente de la población e A entre toda la población de la provincia. Si se tienen los valores de instalaciones de alojamiento para la provincia pero no para el

municipio A, el valor para el municipio será su peso poblacional por el valor de las instalaciones de alojamiento para la provincia.

El último año de recogida de datos es 2010, aunque hay algunos valores no disponibles. Para obtener los datos que no existen se genera un parámetro para cada año que no existe. El valor para esos años vacíos será el parámetro calculado para ese año por el valor para el último año con datos. Ese parámetro es el cociente entre el valor del último año con datos dividido por el valor del año anterior. Este parámetro está elevado a 2010 menos el último año con datos.

En el transporte de pasajeros para la generación de las matrices O/D de nivel nacional se emplea una distribución exponencial negativa de manera que el total por fila y columna es el total de entrada y salida por zona. En cuanto al nivel internacional emplea un sistema similar pero basándose en datos de entrada diferentes. La función de impedancia del modelo gravitacional está basada en los costes de viaje entre origen y destino. El modelo de elección es un modelo tipo LOGIT, en la que las variables de la función de utilidad son coste generalizado de viaje basado en distancia y coste de viaje basado en tiempo. La asignación emplea el modelo VACLAV.

3.3.2. SIMILE +

Se trata de un modelo que emplea las cuatro etapas, con un modelo input-output multiregional para la generación. En cuando a la distribución emplea un modelo gravitacional cuyos resultados son aplicados por una asignación multimodal estocástica que de manera conjunta hace la elección de modo y de ruta.

Los objetivos que persigue es el estudio de políticas de precios de transporte así como el análisis coste-beneficio de las diferentes alternativas de la red multimodal. También permite estudiar las diferentes estrategias que emplean los electores para la selección del modo de transporte.

En este momento parte del mismo ha sido sustituido por el modelo BAS-GOED, aunque ha sido empleado para múltiples estudios.

El modelo se emplea para dar respuesta a un conjunto de preguntas (L.A. Tavasszy, Smeenk, and Ruijgrok 1998) sobre las políticas de transporte y sistemas logísticos. Se pueden agrupar en:

1. General: Es la respuesta más general, es decir, qué va a pasar en el futuro bajo diferentes escenarios.

2. Logísticas/localización: Cómo puede ser una nueva infraestructura puede modificar el reparto modal.
3. Transporte: Cuan ocupado está un medio de transporte o un nodo logístico.
4. Aspectos ambientales y sociales.
5. Efectos económicos del transporte, es decir su contribución a la economía de un país.

En los modelos hay un conjunto de elementos que tienen vital importancia, los cuales requieren un esfuerzo importante en su desarrollo. El primero de ellos es estimar los flujos de transporte. Para las políticas es importante la definición del modelo de elección, esto es porque es muy necesario el traspaso de flujos que emplean la carretera a otros medios de transporte más sostenibles. El poder evaluar bajo qué condiciones futuras se produce este traspaso ha de ser uno de los objetivos principales.

Otro de los elementos importantes, y que ya se recogen en este modelo, es la multimodalidad del transporte. La continuidad en el viaje en tren tiene gran importancia en el establecimiento de las políticas, en este caso en Holanda.

Por último, la relación entre transporte y economía, una aproximación año a año permite introducir cambios y realimentar el modelo.

Aunque su fin principal no es el análisis de proyectos, este tipo de modelos de gran escala permiten hacerlo, tanto porque la nueva infraestructura varía las condiciones de su hinterland y las regiones cercanas como por la influencia que ejerce en la ubicación de nuevas actividades.

En SMILE hay un conjunto de variables que permiten el establecimiento de diferentes escenarios:

- Agregados de suministro: Valores de producción, consumo, exportaciones
- Cambios estructurales en la economía: Parte de importación, funciones de producción, categorización del suministro.
- Agregación espacial: Producción y consumo doméstico, mayoristas, importación, exportación.
- Elasticidades: Interacción espacial, elección del canal de distribución
- Características del producto: Valor, empaquetado, perecedero, tiempo de suministro, tamaño de envío, frecuencia de demanda
- Características del tráfico y la red: Accesos y salidas, variables del proceso de transporte y trasbordo, longitud de los tramos, capacidades, unidades de medida, factor del grado de carga

Todas estas variables pueden tomar diferentes valores por tipo de mercancía y por periodo a evaluar. Además posee una interfaz gráfica para la gestión y con una visualización similar a la de un SIG. Para este modelo es esencial recoger que los cambios en las estructuras económicas producen cambios en los flujos de mercancías.

Para la estimación de los flujos se emplean dos criterios; el primero de ellos es que hay una serie de flujos que emplean la infraestructura que proceden de la estructura de producciones y consumos del país (Alemania en el caso de aplicación de SMILE). Y por otro lado, aquellos flujos que emplean la infraestructura pero que no están relacionados directamente con la economía del país en la que está instalada.

No se emplean modelos de Insumo-Producto, sino que para un sistema productivo se establecen las producciones y consumos. Como una parte del modelo está directamente relacionado con los flujos procedentes de las producciones y consumos propios del país, se pueden establecer modelos que reflejen los cambios en alguna de las cadenas productivas, o de todo el sistema en su conjunto.

Para integrar las relaciones de transporte con las relaciones de mercado el modelo emplea los servicios de almacenamiento. La asignación se lleva a cabo basándose en los costes logísticos, tanto de tiempo como de coste. Emplea seis medios de transporte en un sistema multimodal, análogo al sistema físico real.

Todos los pasos se realizan en un proceso cíclico que permita dar respuesta a las preguntas formulada para análisis.

3.3.3. MODEV

Como la mayoría de los modelos emplea un modelo de las cuatro etapas.

La fase de producción y atracción viene utiliza modelos de regresión empleando datos trasversales. Dichos valores son empleados en un modelo tipo gravitacional para la obtención de las matrices originales de flujos.

Para la elección modal emplea un tipo de modelo de los más extendidos, probados y robustos, como son los modelos logit. Estos modelos darán las matrices de cada uno de los medios, que serán asignadas de forma unimodal a la red. No incluye componentes logísticas explícitas.

MODEV es útil para la evaluación de infraestructuras y la estimación de valores de referencia para el largo plazo.

3.3.4. BVWP

Es un modelo desarrollado tanto para el transporte de pasajeros como de mercancías.

Al igual que el anterior los modelos de generación emplean modelos de regresión, apoyándose en el uso de datos transversales. Por otra parte la elección modal está basada en datos desagregados, procedentes de estudios basados en preferencias declaradas. Es importante indicar el desarrollo de dos modelos especiales para mar y aire.

De las matrices desagregadas por modos obtenidos en la fase de elección, se realiza una asignación unimodal para cada uno de los modos considerados.

Ha sido empleado para análisis coste-beneficio para la evaluación de proyectos de infraestructuras, y estimación de referencias para 2025.

3.3.5. TRANSTOOLS

El modelo ha ido evolucionando en diferentes versiones, desde la 1 hasta las 3.

1. TRANSTOOLS 1

El modelo completo contempla la utilidad para pasajeros y mercancías, así como su aplicación logística.

Sigue el modelo de las cuatro etapas, empleando información procedente de los estudios ETIS y ETIS +. El modelo logístico es similar al de SMILE + y SCENES, y explica la localización y uso de los centros de distribución, destacando la formación de las cadenas de transporte. El usuario puede elegir como emplear este modelo logístico, bien como un post procesado del modelo de transporte, o no.

2. TRANSTOOLS 2

El modelo gravitacional pasa de ser sin restricciones a uno con restricciones de producción y atracción (doble restricción). El modelo de elección empleado es un logit agregado. La asignación de coches y camiones se hace de forma conjunta.

Ha sido empleado por la Comisión Europea para diferentes análisis de políticas. También se ha empleado para las evaluaciones

del Transeuropean Network, análisis coste-beneficio de políticas de infraestructuras, políticas de precios, regulación de dimensiones de vehículos.

3. TRANSTOOLS 3

Planea emplear para transporte de mercancías los modelos como el noruego y sueco, combinados con matrices OD por modos, derivadas independientemente.

Los sistemas de transporte que se consideran en el modelo son carretera, ferrocarril, aéreo y ríos navegables (IWW). Las zonas que toma son las correspondientes, en España, a provincias. Emplea la clasificación NUTS3 de GISCO-EURSTAT ("Europa - RAMON - Classifications Download List" 2014). Emplea la línea recta (Ibáñez-Rivas 2010) como opción para el cálculo de distancias entre zonas, es decir, no se emplea la configuración real del sistema de transporte para la asignación de flujos. Mediante Dijkstra se calculan los caminos reales entre zonas para cada uno de los modos, lo que permite hacer una comparación con las distancias obtenidas en línea recta y las reales. Esto permitió observar una minoración en muchas de las distancias, elemento que se indicó para mejora del modelo. Este modelo presenta además un problema con las distancias dentro de las zonas, pues supone un valor fijo de 12 km para aquellas que superan los 6300 km². Emplea el modelo de las cuatro etapas, Generación, Distribución, Reparto modal y Asignación.

La asignación de carretera tiene en cuenta los periodos pico y los que no lo son, viajes diarios largos, fines de semana en verano y vacaciones. No hay diferenciación de red para pasajeros y mercancías, al tener diferentes niveles de detalle no parece que sea la mejor opción.

El modelo de elección es un multinomial logit model y el de asignación es un stochastic user equilibrium model. Las simulaciones se llevan hasta el año 2050 incluido.

La información necesaria para el desarrollo del modelo proviene de ETIS (European Transport policy Information System)(Ceuster et al. 2010) , de cuya base de datos se puede extraer la siguiente información:

- Datos socioeconómicos.
- Datos de demanda de transporte mercancías.
- Datos de demanda de pasajeros.
- Datos de entrada de la red europea de transporte.

- Datos de servicios y coste de transporte de mercancías.
- Datos de servicios y coste de transporte de pasajeros.
- Datos de efectos externos.

La primera versión del TRANSTOOLS consistía en los siguientes pasos (NEA et al. 2009):

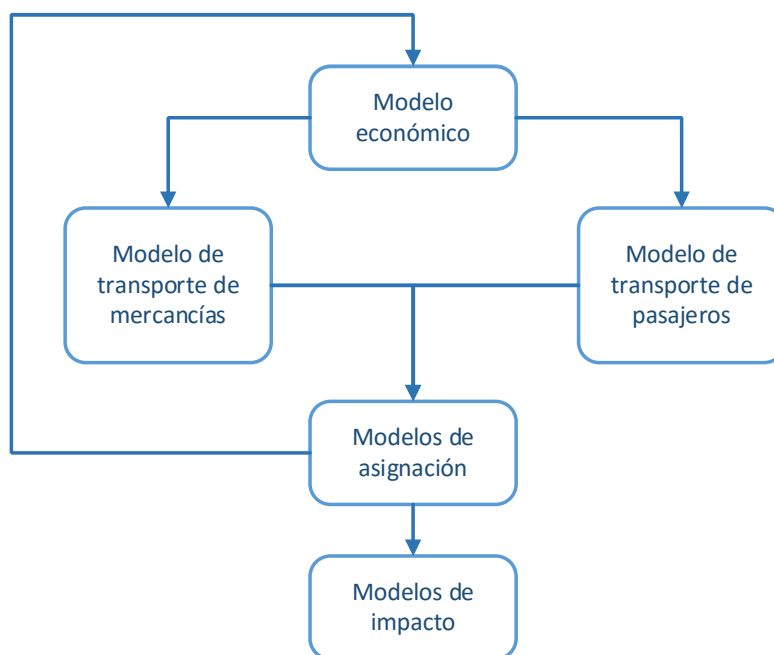


Figura 4: Esquema de TRANSTOOLS.

3.3.6. Worldnet

Es un proyecto de la Comisión Europea de Transporte, que cubre transporte de larga distancia en el ámbito geográfico de Europa y los países vecinos, así como transporte intercontinental para los transportes de mercancías marítimo y aéreo.

Para la generación de las matrices origen destino se emplea un modelo gravitacional. Dichas matrices se desagregaran por modos empleando un modelo Multinomial Logit, que permite elecciones uni y multimodales.

Ha sido empleado en los estudios de Autopistas del mar y del estudio de puertos y sus hinterlands.

Se trata de una mejora del TRANSTOOLS (NEA et al. 2009), partiendo de la información generada por ETIS y el sistema de transporte de TRANSTOOLS.

Los datos de flujos iniciales pertenecen a tres niveles diferentes, flujos internacionales los cuales proceden de datos de comercio, flujos nacionales, cuyos datos proceden de datos de transporte especializado por modo, y por último, los datos económicos regionales, de producciones y consumos.

La red empleada es una extensión de la carretera y tren del TRANSTOOLS. Los tramos empleados son aquellos que se ha considerado de mayor relevancia para el transporte de mercancías, entre Europa y otros países, según el modo.

Se han tenido en cuenta los países europeos, así como aquellos exteriores con los que existen relaciones comerciales, y la base de datos está preparada para la inclusión de aquellos que resulten necesarios. No se estiman viajes en vacío o contenedores vacíos.

El modelo de distribución consta de dos partes: una la de nivel nacional que emplea un modelo gravitacional y otra que para el nivel internacional que se sigue la estructura ETIS para dividir los niveles de país (Modelo gravitacional).

3.3.7. Norway y Samgods

Son los modelos desarrollados para Noruega y Suecia, respectivamente. Estos dos modelos utilizan la misma lógica global y la misma estructura de datos. Ambos emplean un modelo ADA (agregado-desagregado-agregado). Este modelo los flujos de producción y consumo son especificados con un nivel agregado, al igual que el modelo de asignación a red, debido a los datos disponibles. Para la resolución completa del modelo de transporte es necesario el de elección, como paso previo a la asignación. En este caso se trata de un modelo desagregado, a nivel de decisor.

Noruega emplea Commodity flow survey y modelos gravitacionales para las matrices OD. Y asignación unimodal.

El modelo noruego ha sido empleado en numerosos estudios desde el plan de transporte nacional al análisis de corredores, mientras que el sueco se ha empleado en un limitado número de estudios, como son el cambio en los requerimientos de los combustibles marítimos o tarifas de tren.

3.3.8. Mobility Masterplan of Flandes

No emplea modelos de generación propios, sino que las matrices PC (producción y consumo) proceden de un modelo de comercio existente llamado Planet. Posee un modelo logístico para la elección de tamaño de flete y cadena de transporte, lo cual, como se indicó con anterioridad, tiene gran importancia para la obtención de los costes de la cadena de suministro. Realiza una asignación conjunta para transporte de carretera y coches.

3.3.9. NODUS

El modelo Walloon en Bélgica emplea el software NODUS. El modelo emplea el nivel NUTS2 de toda Europa, y es válido para transporte multimodal con las opciones: carretera, ferrocarril y aguas navegables interiores. Los elementos que incluyen son la elección modal y la asignación a la red.

3.3.10. Dinamarca

El modelo danés es muy similar al noruego y sueco. Usa un procedimiento pivot-point en la matriz de camiones. Esto implica que el modelo solo tendrá cambios en las matrices OD entre el año base y uno futuro. Esos cambios se aplicarán a la matriz base OD de camiones.

Tabla 10 : Proyectos en los que se ha empleado el modelo Logis.

Ámbito	Proyectos
Red Trans-Europea	EU projects SCENARIOS SCENES THINK-UP TEN-STAC MEDA-TEN-T
Redes de ferrocarril para mercancías	EUFRANET NEW-OPERA TIGER MARATHON
Evaluación de corredores de transporte	TRANS-ALPINE corredor TRANS-PYRENEAN corredor

3.3.11. LOGIS

La generación de producciones y atracciones del modelo LOGIS emplea modelos de regresión, que mediante modelos gravitacionales son distribuidos en viajes ente orígenes y destinos.

Para el reparto modal se emplean los modelos logit agregados, cuyos resultados se utilizan para una asignación unimodal.

Ha sido empleado para modelado intermodal, co-modal y multinivel “puerta a puerta” y evaluación de políticas e infraestructuras.

En la Tabla 10 se pueden ver los proyectos y ámbitos en que ha sido empleado este modelo.

3.3.12. BASGOIED

Como la mayoría de los anteriores sigue el clásico modelo de las cuatro etapas. Los coeficientes de los modelos de distribución y de elección modal han sido calculados de forma satisfactoria con datos agregados, conduciendo a unos valores razonables de elasticidad. Los inputs de generación y atracción proceden del modelo económico de SMILE+. Emplea un modelo de asignación unimodal.

Los modelos anteriores son parte de los modelos desarrollados por la Comisión Europea, pero también han sido desarrollados modelos desde 2004 (Gerard Jong, Vierth, Tavasszy, & Ben-Akiva, 2012^a). Según su ámbito de aplicación se pueden agrupar en los siguientes modelos:

- Modelos de transporte de mercancías incluyendo elecciones logísticas en Norte América:
 - Zhong et al (2007) desarrollaron un modelo espacial Input-Output para la provincia de Alberta en Canadá. Contenía carretera, tren y ductos.
 - FAME,(Samimi, Mohammadian, and Kawamura 2010) modelo de micro-simulación. Genera empresas y sus flujos de entrada y salida, determinando la relación entre las empresas y en diferentes pasos se elige el tamaño de flete, modo y su impacto en la red de transporte.
- Modelos de transporte regionales:
 - GORM,(Chistian Overgard Hansen 2011) en la región periférica de Dinamarca y Suecia. Emplea un modelo Nested Logit

- con modos en el nivel superior y “cruces, ruta...” en el nivel inferior.
- EUNET,(Jin, Williams, & Shahkarami, 2005) emplea un modelo espacial Input-Output para obtener las matrices de comercio (PC) y un modelo logístico para obtener las OD. Usa modelos logísticos agregados.
- Modelos económicos/ de mercado:
 - PINGO, (Vold, Arild; Jean-Hanse 2007) modelo SCGE estático de la economía noruega. El modelo incluye una función de producción para el sector del transporte. Los valores de coste proceden del modelo logístico de transporte de Noruega. Los modelos SCGE son modelos econométricos de Equilibrio espacial general aplicado (Spatial Computable General Equilibrium Models). Esos son modelos económicos emplean datos económicos reales para estimar cómo una economía podría reaccionar a cambios en la política, la tecnología u otros factores externos.
 - RAEM, modelo SCGE alemán. Olga Ivanova et al (2007) relatan que se trata de un modelo recursivo de producción, consumo y comercio de Holanda. Incluye comercio internacional, el gobierno federal como un agente macroeconómico, mercados del trabajo y emigración. Emplea datos de costes de los modelos de pasajeros y carga alemán y europeo.
 - Elecciones logísticas introducidas en modelos de transporte por doctorados:
 - Liedtke (2006) en la Universidad de Karlsruhe desarrolló un modelo e micro-simulación (INTERLOG) para las elecciones logísticas. Incluye generación de localizaciones, elección del proveedor por los clientes, tamaño de envío, elección de la compañía de transporte y generación de rutas de camiones.
 - Maurer (2008) de ITS Leeds emplea un software comercial (CAST) para las decisiones logísticas junto con un modelo LEFT para la aplicación de un modelo de transporte a nivel nacional.
 - Arunotayanum (2009) del Imperial College de Londres específica y estima un modelo de elección discreta para la elección modal empleando la información de French ECHO.
 - Friedrich (2010) de la Universidad de Karlsruhe diseñó un modelo (SYNTRADE) para el sector minorista de la comida. Muestra procesos de optimización originalmente desarrollados para la planificación logística de compañías individuales,

- que pueden ser empleados para predecir las estructuras de distribución a nivel sectorial.
- Combes (2009) en ENPC de París se centra en la elección de tamaño de flete. Incluye un modelo de tamaño de envío y de elección modal.
 - Modelos de modo y tamaño de envío. No han sido desarrollados para modelos operacionales, sino para cálculo de elasticidades de los modelos. Emplean datos de Swedish CFS, que son desagregados:
 - De Jong y Johnson(2009), el CFS 2001 se empleó para la estimación del modelo de elección discreto (tanto modo como tamaño de envío son variables discretas) así como modelos discreto-continuo (tamaños de envío continuos).
 - Habibi (2010) estimó modelos para tamaños de envío discretos y cadenas de transporte para el flujo de la producción de acero domestica (CFS 2004/2005).
 - Windisch (2009) emplea CFS 2004/2005 para estimar modelos discretos de tamaño de envío y del modelo de elección.
 - Otros comportamientos.
 - Hensher (2003) incluye la interacción entre agentes en los modelos de elección.
 - Friesz et al (2008) presenta un modelo de juego-teórico dinámico. Es la extensión de modelos anteriores de transportistas y cargadores teniendo en cuenta además vendedores y receptores, en el contexto de una red urbana.
 - Holguín-Veras et al (2008) (José Holguín-Veras, Thorson, and Zorrilla 2008) y Wang y Holguín (2009) (Wang and Holguin-Veras 2009) desarrollaron modelos para viajes comerciales, organizados por transportistas y viajes vacíos, a nivel agregado, haciendo uso de maximización de la entropía. En 2006 estudiaron la interacción entre transportistas y receptores en pedidos fuera de los periodos punta. En 2009 emplearon experimentos económicos para establecer la relación entre consignador y transportista en la elección de modo y de tamaño de envío.
 - Modelos centrados en competición de puertos:
 - Específicos de una zona de Europa Zondag et al 2010 (Zondag et al. 2010).
 - Estudios Globales, Tavasszy et al 2011 (L. Tavasszy et al. 2011).

Tabla 11: Elementos de la cadena logística tenidos en cuenta en cada uno de los modelos (1).

Elecciones	Modelos desarrollados por autoridades regionales, nacionales o UE					Competición de puertos (Zondag et al. 2010) (L. Tavasszy et al. 2011)	(José Holguín-Veras, Thorson, and Zorrilla 2008) (Wang and Holguín-Veras 2009)
	EUNET	SMILE (Bovenkerk 2005)	SLAM/ TRANSTOOLS 1,2 (TNO M&L (The Netherlands) 2006)	Modelos Noruego/Sueco	(Maurer 2008)		
Modelo Agregado	x	x	x		x	x	x
Identificación de empresas				x			
Uso/ localización de almacenes		x	x		x		
Tamaño de envío		x	x	x	x		
Consolidación	x	x	x	x	x		
Unidades de carga	x			x			
Modos/cadenas	x	x	x	x	x		
Tipo de vehículo		x	x	x	x		
Terminales/Puertos	x	x	x	x	x	x	
Rutas		x	x		x	x	x
Transporte de retorno				x		x	x
Elección de transportista del consignatario							
Elección de transportista del proveedor							

Tabla 12: Elementos de la cadena logística tenidos en cuenta en cada uno de los modelos (2).

Elecciones	(Groothedde, Ruijgrok, and Tavasszy 2005)	(Combes 2009)	(K Arunotayanun; J Polak 2009)	(Liedtke 2006)	(Friedrich 2010)	(Samimi, Mohammadian, and Kawamura 2010)
Modelo Agregado						
Identificación de empresas				x	x	x
Uso/ localización de almacenes	x				x	
Tamaño de envío		x		x	x	x
Consolidación	x				x	x
Unidades de carga	x					
Modos/cadenas	x	x	x			x
Tipo de vehículo	x					
Terminales/Puertos	x					
Rutas	x			x	x	
Transporte de retorno						
Elección de transportista del consignatario			x	x		
Elección de transportista del proveedor						x

Logística o gestión logística tiene una amplia definición. La gestión logística es la parte de la cadena de suministros que planifica, ejecuta y controla la eficiencia, la efectividad de los flujos de ida y vuelta y el almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo, a fin de satisfacer los requerimientos de los clientes (Council of Supply Chain Management Professionals 2014). Entre sus actividades se incluye de manera típica la gestión de transporte de entrada y salida, el almacenamiento, el manejo de mercancías, el cumplimiento de las órdenes, el diseño de la red logística, la gestión de inventario, la planificación de suministro/demanda y la gestión de los proveedores de servicios logísticos de terceros (Council of Supply Chain Management Professionals 2014).

Hasta el momento los modelos desarrollados en este sentido se han centrado en la relación entre los flujos de mercado y las unidades físicas de transporte. Es decir, la distinción entre las matrices de Producción/Consumo y las matrices Origen/Destino. Los cambios en las matrices P/C generalmente vienen propiciados por las fluctuaciones externas al sector transporte, como son los cambios socio-económicos. Sin embargo, los cambios en las matrices O/D proceden de manera fundamental de cambios en el sector del transporte.

Los modelos logísticos incluyen, de forma general, todos los costes logísticos y trata de explicar las compensaciones entre inventario y transporte y ruta a través de los puntos intermedios. Estos puntos intermedios pueden ser terminales de intercambio modal, en las que hay cambio de modo o tipo de vehículo, y centros de distribución, que son almacenes donde se encuentra la mercancía, que generalmente sufre cambios de tamaño de consignación. Esto lleva que, a diferencia de las terminales, en estos centros existan inventarios. Dentro de una cadena de transporte es complicado aislar su comportamiento, según el tipo, debido a las interacciones que aparecen debido a las diferentes actividades.

Los diferentes actores que toman decisiones en los modelos logísticos se pueden identificar como (Gerard Jong et al., 2012a):

Tabla 13: Elementos decisores de los modelos logísticos.

Decisor	Decisión
Fletador	Número, localización y tamaño de centros de distribución y almacenes
	Tamaño del flete (frecuencia del transporte)
	Unidad de carga
	Modo/modos en la cadena de transporte, que se construyen sobre la base de la red de distribución que tengan en cuenta las economías de escala en el transporte
Transitario	Modo/modos en la cadena de transporte, que se construyen sobre la base de la red de distribución que tengan en cuenta las economías de escala en el transporte
	Tamaño/tipo de vehículo
	Terminales de intercambio
	Transportes de retorno, incluso vueltas en vacío
Cargador	Tamaño/tipo de vehículo
	Terminales de intercambio
	Rutas
	Transportes de retorno, incluso vueltas en vacío
Conductores	Rutas

3.3.13. Otras iniciativas

A pesar de que por la proximidad geográfica el estudio anterior se centra en los modelos desarrollados en Europa, esto no es algo que se limite a este ámbito geográfico.

Así, en Colombia, se ha llevado a cabo iniciativas del desarrollo de un modelo de transporte, limitado por la disponibilidad de datos, donde se buscaba la evaluación de proyectos de inversión en infraestructura. Cantillo et al (2014) presentaron la descripción de dicha modelización. El desarrollo del modelo se llevó a cabo mediante la adaptación de un clásico modelo de las cuatro etapas.

Dicho trabajo presenta la necesidad de la definición de una unidad de carga para la transformación de flujos de mercancía generados a flujos de viajes de mercancías. El dotar al modelo de versatilidad en la selección de esta unidad de transporte en función del elemento transportado, dotará de gran potencialidad al modelo desarrollado.

El empleo del modelo desarrollado en este caso es una de las aplicaciones básicas de los modelos de transporte para la evaluación de inversión en infraestructura que fomenten el desarrollo de los países.

En Hong Kong el modelo de las cuatro etapas ha sido el elegido para el desarrollo de los sucesivos modelos de transportes empleados para la planificación de transporte (Wong et al. 2010). El modelo está desarrollado para la

estimación del uso de transporte público y privado. Se emplean modelos logit para los diferentes sub-modelos de reparto modal, en particular un Multinomial Logit. Los caminos de transporte para cada par origen destino se obtiene mediante la aplicación de un criterio de coste mínimo generalizado (donde no solo se tiene en cuenta costes o distancias, sino que se puede construir un coste donde se tengan en cuenta costes monetarios, tiempos de viaje, tiempos de espera...), realizándose la aplicación de un modelo todo o Nada de asignación, en función de ese coste generalizado.

3.4. MODELOS DE CONGESTIÓN DE LOS NODOS DE LA RED.

Cuando se está hablando de transporte de mercancías, las congestiones más importantes se dan en los nodos del sistema. Como se podrá ver en los trabajos que citan a continuación, estas congestiones son un gran problema, no solo por la saturación en dichos nodos, sino porque afecta al uso que de la red completa hacen los flujos, y los riesgos a los que se puede someter a la población cuando lo que se está transportando son mercancías peligrosas.

Casi todos los trabajos en los que se tienen cuenta retrasos, en general en los puertos, emplean modelos de colas para la modelización de dichos tiempos. Las modelizaciones que se hacen del sistema para ver la influencia de los tiempos de espera son diversas. Fan, Wilson, y Dahl (2012) establecieron que la capacidad del puerto es identificada de una manera más práctica mediante el uso de una especificación de congestión (mediante teoría de colas) que por una fuerte restricción física. Es decir el empleo de teoría de colas permite recoger más elementos endógenos que provocan los retrasos que solamente las congestiones debidas a las restricciones físicas.

Leachman y Julia (2011) plantearon un modelo donde el tiempo de esperas se modelaba mediante este tipo de herramientas. El modelo completo de evaluación es el representado en la Figura 5. Consta de un modelo de optimización de la cadena de suministro que minimiza los costes totales para los importadores. El modelo de colas estima los tiempos totales para las diferentes estrategias de cadena de suministro. Se emplea para la obtención de los cambios en los tiempos de flujo de los contenedores debido a cambios de volúmenes de los mismos en el canal, procedentes de la modelo de optimización. Se emplea un factor de control proporcional para ajustar gradualmente los tiempos de flujo para asegurar la convergencia modelo.

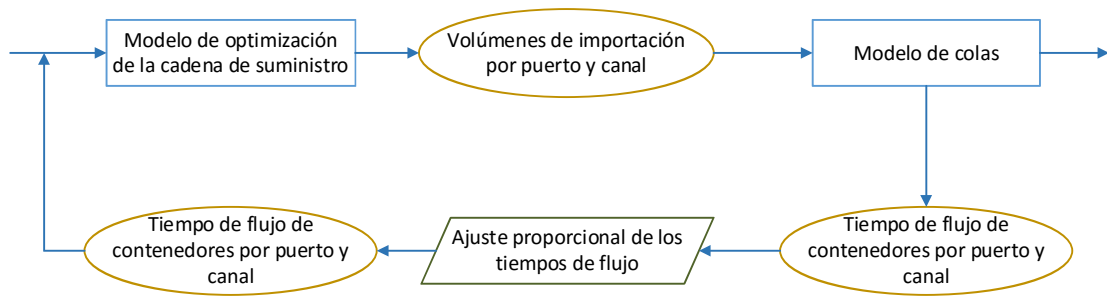


Figura 5: Modelo de Fan, Wilson, y Dahl (2012).

El tiempo de espera esperado es una función de las distribuciones de probabilidad para los tiempos entre llegadas y de servicio de los clientes. Para dicho tiempo emplean la fórmula:

$$WT = \left(\frac{ca^2 + ce^2}{2} \right) \left(\frac{u^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{m(1-u)} \right) \left(\frac{PT}{A} \right) \quad (1)$$

Donde:

- WT Tiempo de espera.
- c_a Varianza normalizada de los tiempos entre llegadas de clientes.
- c_s Varianza normalizada de los tiempos de servicio.
- u Fracción de tiempo que un servidor está ocupado en atender a un cliente.
- m Número de servidores en paralelo.
- PT Tiempo medio de servicio.
- A Fracción de tiempo medio que un servidor está disponible para proveer un servicio.

Así el tiempo total que el cliente está en el sistema es $FT = WT + SFT$, donde WT es el tiempo de espera y SFT es el tiempo estándar de flujo. Es decir el tiempo que no está esperando para ser servido. Se diferencia de PT , en qué este segundo es el tiempo que un servidor emplea en un cliente. Idealmente pueden ser iguales, pero no existe ninguna restricción que obligue a que se cumpla en todos los casos.

En el caso de estudio emplean dos modelos. En uno de ellos se considera que la media y la desviación estándar de los tiempos de los flujos de contenedores en puerto y canal son fijos, implícitamente haciendo la asunción que las inversiones en infraestructuras y los niveles de equipamiento serían los necesarios para mantener los tiempos de flujo de cara a aumentar el volumen o porcentaje de importaciones totales. En el otro los niveles de infraestructura dados para puertos o vías ferroviarias son una entrada y se estima la distribución de los flujos de importación en los puertos y canal de acceso, optimizando los costes aproximados de la cadena de suministro para todos los importadores.

Según Tan y al.(2015) la congestión en puertos es un fenómeno común. Su capacidad está relacionada con todos los elementos que lo componen, desde medios de carga y descarga hasta almacenamientos. Se propone un modelo M/M/1 para el cálculo del tiempos de retraso, en términos monetarios. Dado un ratio de servicio en el puerto, μ , y el ratio de llegada de mercancía, λ , el tiempo de retraso se puede obtener como:

$$c_D(\mu, \lambda) = \frac{\gamma}{\mu - \lambda}, \gamma > 0, \mu > \lambda \quad (2)$$

El ratio de servicio en el puerto, μ , está directamente relacionado con la capacidad del puerto. El parámetro γ convierte la unidad de tiempo en unidad monetaria. El ratio de llegada de mercancía, λ , depende del equilibrio de elección de los clientes, es decir de como hace su elección de transporte.

Para la llegada de mercancía el estudio emplea:

$$\lambda = \int_{x \in Z} l(x) dx \quad (3)$$

Donde $l(x)$ es la tasa media de demanda de mercancía en barco por unidad de longitud, en este caso de río al tratarse de una vía interior, y Z es el dominio en el cual todos los cargadores eligen el puerto para su servicio de carga navegable. También tiene en cuenta que el ratio de servicio en el puerto interior es la capacidad del puerto.

Para la elección de modo carretera o multimodal emplean la maximización de coste generalizado. Cuando no se consideran los tiempos de retraso, el coste generalizado depende del coste de transporte.

Emplea el modelo para la obtención de diferentes objetivos. En el caso de suponer congestiones en terminales, se usa para:

- Óptimo precio de servicio dado localización de puerto y capacidad.
- Decisión conjunta de precio de servicio y capacidad de puerto con una localización de puerto dada.
- La combinación optima de cargas por servicio, capacidad y localización.

Para el caso de estudio emplean la ruta navegable del río Yangtzé y los puertos interiores disponibles. En el caso de considerar que existe congestión en los servicios del puerto y que existe un coste de capacidad, se define la capacidad del puerto como una medida de contenedores por día, de la misma forma que el ratio de llegada de mercancía. Así $(\mu - \lambda)$ es el tiempo medio de espera en el sistema del puerto, conocidos los ratios de servicio y llegada.

La congestión representa un problema importante cuando las mercancías que se están transportando son de naturaleza peligrosa, debido a que la población pueda encontrarse más expuesta a posibles incidentes o accidentes de la misma, debido a la concentración de mercancía en un único punto. Por ello Assadipour, Ke, y Verma,(2015), centraron su trabajo en este tipo de transporte, ya que como se ha dicho, en el transporte de mercancías peligrosas la congestión en terminales no es algo trivial, ya que aumenta el riesgo de exposición a dicha mercancías de la población. El riesgo por congestión se modela como el producto del riesgo en terminal y el número medio de contenedores para ser servidos. Basándose en la ley de Little, esa longitud de espera será:

$$L_j^m = \lambda_j^m w_j^m \tag{4}$$

Donde

$$w_j^m = \frac{\lambda_j^m + \bar{\lambda}_j^m}{\mu_j(\mu_j - \lambda_j^m)}$$

$$w_j^m = \frac{\lambda_j^m + \bar{\lambda}_j^m}{(\mu_j - \lambda_j^m - \bar{\lambda}_j^m)(\mu_j - \lambda_j^m)} \tag{5}$$

Es el tiempo medio que pasa un contenedor de mercancía peligrosa, y los normales respectivamente, en el sistema de colas con prioridad.

λ_j^m Tiempo de llegada esperado de contenedores peligrosos al equipamiento m en la terminal de origen.

- $\bar{\lambda}_j^m$ Tiempo de llegada esperado de contenedores normales al equipamiento m en la terminal de origen.
- μ_j Ratio de servicio del equipamiento en la terminal j .

Fan y al.(2012) indican que las colas se producen por la variabilidad del proceso y de las llegadas. Para capturar esa variabilidad se considera un sistema $G/G/m$ de colas. Este asume tiempo entre llegadas distribución normal y m amarres para barcos multicontenedores con un tiempo de procesado de distribución normal.

$$W_q(G/G/m) = \left(\frac{c_a^2 + c_e^2}{2} \right) \left(\frac{\rho^{\sqrt{2(m+1)}-1}}{m(1-\rho)} \right) t_e \quad (6)$$

$$\rho = \frac{r_a t_e}{m}$$

Es una fórmula similar a la empleada por Leachman y Jula (2011). Donde:

- W_q Tiempo medio de espera en cola.
- t_e Media del tiempo de procesado efectivo por barco.
- r_a Ratio de llegadas por unidad de tiempo.
- c_a y c_e Coeficientes de variación de llegada y proceso

Asumiendo llegadas y procesos con coeficiente de variación moderados (de 1.33) para reflejar las características de viabilidad. Coeficientes iguales a 1 implican sistemas de colas $M/M/m$.

El modelar un sistema completa requiere información detallada, y cada puerto es único en términos de parámetros de servicio.

La herramienta empleada en el estudio es la simulación. Esto permite estimar la relación entre flujos movidos y tiempos medios de espera en los puertos de contenedores de Norte América. Al modelar la capacidad del puerto como una función de colas, el tiempo de espera medio es función de los flujos en puerto. Incrementos en los flujos significa incrementos no lineales de los tiempos de espera por lo que se incrementan los costes en puerto del buque. El modelo de colas se emplea para el cálculo de tiempo en cola debido a elementos endógenos ya que se tiene en cuenta de forma separada el tipo de espera en puerto para descarga.

Por lo tanto, el empleo de este tipo de modelos, permite tener bien identificados los retrasos que se producen en el sistema debido a la congestión. El problema se presenta cuando se quiere ver su influencia en dicho sistema. Como se ve hay diferentes formas de resolverlo, como la optimización de la cadena de suministro o la minimización del coste generalizado del transporte.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

La planificación de infraestructuras y servicios de transporte requiere el uso de herramientas que faciliten, o sean un apoyo, a la toma de decisiones, tanto para el análisis de inversiones como para la el diseño de políticas de transporte.

Los sistemas de transporte son redes complejas en los que habitualmente se emplea un proceso jerárquico para la planificación (Bussieck, Winter, and Zimmermann 1997). Es necesario la definición de la red, completa, y de todas las características de cada uno de los medios de transporte que lo conforman. Hay un conjunto de pasos para esta definición que son ampliamente utilizados.

En el trabajo de Horn (2003), se explica de manera clara todos estos pasos que siguen la mayoría de los trabajos para la representación de la red de transporte, ya que no se trata únicamente de elementos espaciales sino que para la definición completa de la red es necesario tener en cuenta elementos temporales e incluso operacionales. De manera resumida estos elementos son:

- Localizaciones: Orígenes y destinos de los transportes. Algunos de estos nodos o localizaciones pueden ser de intercambio modal.
- Modos de transporte: Es necesario recopilar todos los medios de transporte que van a formar parte del sistema, y los tramos de red que pueden emplear debido a su tipología. Incluso si alguno de ellos tiene rutas fijadas de ante mano, independientes del posible sistema de asignación a la red que se emplee en el modelado.
- Tiempos y costes de viaje: Cuando se trata de un servicio de transporte de rutas fijas el cálculo de tiempos y costes son fácilmente estimables, ya que existe una caracterización previa del medio de transporte, además de conocerse los puntos de entrada y salida. Cuando el enrutamiento no es tan fijo, juega mayor importancia la construcción de una cadena de tiempos, y costes, que tenga en cuenta todos los elementos del transporte.
- Transferencias entre modos: Cuando hay cambio de modo hay una penalización de tiempo y a veces de coste. Para pasajeros puede ser el tiempo de comprar de billete o cambio de terminal, y para mercancías la manipulación de la carga.
- Estructura del transporte: Algunos viajes tienen tramos prohibidos o prioritarios, que deben ser identificados de ante mano.

- Requerimientos y preferencias.

Como se indicó con anterioridad el método que se emplea de forma general para la generación de modelos, y que emplea esta formulación o definición de los sistemas es el modelo de las cuatro etapas (Ortúzar and Willumsen 2011). No en todos los estudios se completan las cuatro etapas de manera completa, muchas veces depende de la disponibilidad de la información y del nivel de resolución de los objetivos buscados.

Pero esta red completa y caracterizada no se encuentra aislada, sino que pertenece a un entorno por el que se ve afectado, y al que afecta. En primer lugar los flujos que van a hacer uso de esta red estará influenciado por las características socioeconómicas del área geográfica al que pertenece, tanto por los flujos de mercancías o pasajeros que lo están utilizando en la actualidad, como los futuros, basados en evoluciones tanto sociales como económicas esperadas.

De forma contraria la red puede influenciar también el desarrollo económico o social del país. El aumento de las comunicaciones puede favorecer al desarrollo de áreas deprimidas de un país o ayudar a la entrada y salidas de mercancías del país, aumentando el comercio exterior y, con ello, mejorando la economía del país.

El objetivo de la presente tesis es la definición de una metodología para la construcción de modelos de transporte que sea adaptable, tanto por la disponibilidad de datos que existan como los propios objetivos del análisis. El modelo desarrollado está orientado hacia el transporte de mercancías a nivel nacional o internacional, no a casos de reparto urbano. La diferencia que existe entre ambos casos es tanto el grado de agregación de la información empleada como del detalle geográfico o los elementos que generan congestión en la red.

A nivel urbano el problema de congestión se centra en los tramos de la red, ya que congestiones en los mismos provocan paradas y retrasos que pueden hacer que no se cumplan las condiciones pactadas para las entregas de mercancía. El nivel de resolución temporal de este tipo de problemas es dentro del mismo día, con lo que dichos retrasos afectan en alto grado a la distribución. Sin embargo, el reparto nacional o internacional implica unidades temporales mayores, donde los retrasos por congestión en los tramos de red representan una fracción menor del tiempo total de viaje. Sin embargo, los retrasos en los nodos de la red tienen una repercusión mayor ya que la mercancía almacenada en ellos puede llegar a estar bloqueada durante días o incluso meses en casos extremos. Este efecto tiene una gran repercusión sobre los niveles de inventario en las cadenas de suministro y sobre los costes totales de las operaciones logísticas.

4.1. MODELO CONCEPTUAL

En el presente apartado se presentará el esquema conceptual del modelo, mediante la representación de todas las etapas y pasos necesarios, así como de las relaciones que se plantean entre ellos. Se explicarán todos los conceptos empleados necesarios para el conocimiento, entendimiento y simulación del modelo, y sus potencialidades. Este modelo proporcionará, además, un marco analítico para la evaluación de diferentes tipos de problemas de transporte.

Lo que se pretende es proveer al analista de una herramienta que le permita un fácil conocimiento del sistema, de manera que satisfaga los siguientes objetivos:

- Mejora de la comprensión del sistema de transporte.
- Es el punto de partida para la definición de las especificaciones de un modelo determinado que represente fielmente un sistema real.
- Servir de base para sistemas futuros.

Sokolowski y Banks (2010) destacan la importancia que tiene el modelo conceptual en la representación o abstracción del sistema real, ya que afectará a la toma de decisiones, a la planificación de un nuevo sistema o la evaluación de las ocupaciones existentes, entre otros. Debido a ello es necesario que se defina de manera completa y exacta, pues sus defectos se verán reflejados en los sistemas desarrollados a partir de él. Estos errores pueden ir desde la deficiencia en los datos empleados así como los requisitos y relaciones. Las relaciones entre el modelo conceptual y los sistemas se pueden ver reflejado en la Figura 6.

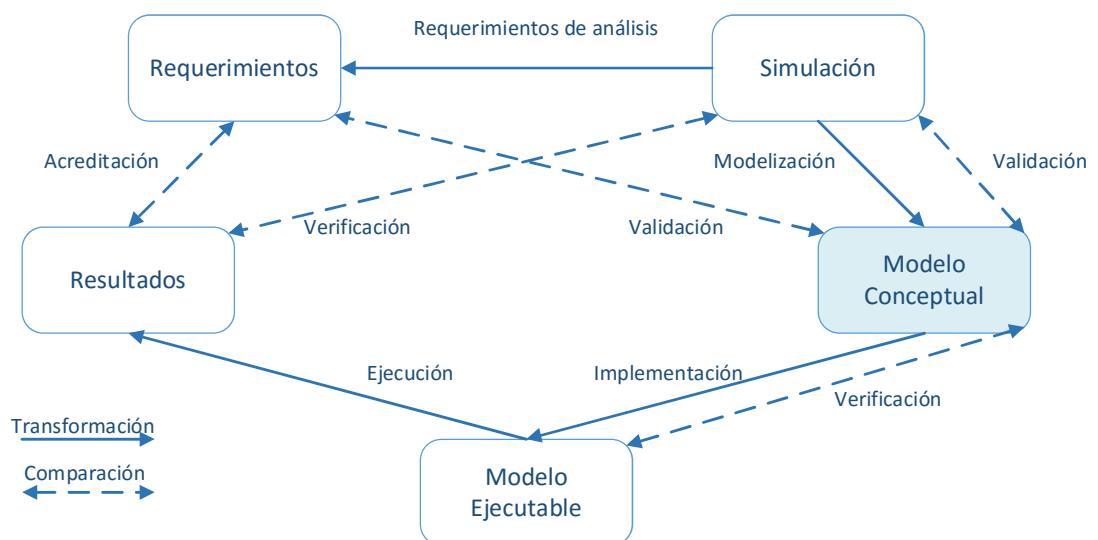


Figura 6: Ciclo de funcionamiento del modelado (Sokolowski and Banks 2010).

Para el desarrollo del modelo conceptual de la presente tesis se ha partido de la base del Clásico modelo de transporte de las Cuatro etapas (Ortúzar and Willumsen 2011). La adaptación que de dicho modelo se ha hecho, aumenta la potencialidad y la simplicidad de uso. La necesidad del modelo no es únicamente para hacer una radiografía del momento -aunque sí debe representar fielmente los momentos actuales y pasados para validar el modelo- sino que debe servir de base para predecir qué puede pasar en el futuro en el sistema.

Debido a esta relación existente entre el entorno y el sistema de transporte, uno de los primeros puntos a los que ha de enfrentarse un analista es el establecimiento de aquellas variables socioeconómicas que van a estar relacionadas con el sistema, tanto en el momento actual como en el futuro.

4.1.1. Elementos generales del modelo.

Las diferentes características de los modelos de transporte y de los objetivos que se desean alcanzar con el estudio o análisis, requieren de un modelo que sea altamente configurable y adaptable a dichos requerimientos. En la presente tesis se presenta un modelo configurable tanto en el tipo de análisis a llevar cabo como en el alcance del análisis. Los objetivos de optimización que, derivados del mismo, se plantean para el trabajo futuro, sientan también las bases de las que parte el modelo. Se plantea un modelo que sea útil para sistemas en los que se mezclen viajes con distancias muy diversas, como puede ser la corta distancia entre provincias y la larga distancia con países de importación, la posibilidad de emplear diferentes tipos de periodos de análisis y horizontes temporales, y mercancías de diferentes características, incluyendo la opción de pasajeros.

Esta integración de diferentes alcances y niveles de resolución, de manera que representen una estructura lógica y útil, es el reto principal al que se ha enfrentado la generación del modelo conceptual.

En primer lugar es necesario identificar todos los elementos que debe recoger el modelo para llevar a cabo todas las funciones que son necesarias en el modelado de transporte.

- **Establecimiento de los objetivos.** Las necesidades del modelo y las potencialidades del mismo están muy relacionadas con los objetivos buscados. Cuanto más configurable, versátil y preciso sea el modelo, mayor será el rango de objetivos que se pueden marcar.
- El establecimiento del **ámbito geográfico**, así como las zonas de análisis de tráfico, es uno de los elementos principales que hay que definir e

identificar para el desarrollo de un modelo completo de transporte, ya que los flujos tanto de mercancías como pasajeros tienen orígenes y destinos.

- Como se indicó con anterioridad el transporte y de manera especial lo que se transporta depende en gran medida de los **aspectos socioeconómicos del entorno**. Por ello es necesario conocer la influencia o relación que dichos factores tienen en la generación y atracción de carga: esto será uno de los elementos que cualquier analista necesita plantearse en el momento de modelar un sistema de transporte. Los crecimientos poblacionales o económicos pueden tener una importante relación con la demanda de los medios de transporte. Por eso será necesario el establecimiento de modelos econométricos que representen dicha relación. Están muy relacionados con la disponibilidad de información, y son múltiples las metodologías que se pueden emplear en su desarrollo. Queda fuera del alcance de esta tesis su formulación, pero si han de ser contemplados como un elemento importante dentro del modelo conceptual.
- **Las alternativas de transporte**. El modelo ha de permitir la selección de los medios de transporte presentes en el sistema, de forma que puedan ser empleados en el transporte. Una alternativa no tiene por qué coincidir con un modo puro, es decir, puede ser la combinación de varios modos. Así una alternativa multimodal marítimo terrestre puede estar configurada por modo carretera y modo marítimo, o modo carretera, modo ferrocarril y modo marítimo. El modelo, además de contemplar la configuración de estas alternativas, recoge cómo será el proceso por el cual se elige cada una de ellas, permitiendo conocer el uso presente o futuro de las mismas, es decir **cómo se realiza la elección**.
- **La red empleada**. Los modos y alternativas de transporte necesitan una infraestructura que los soporte, ya sea puramente física o en forma de ruta o servicio. El modelo indicará las características mínimas que ha de poseer la caracterización de la red, para los análisis más sencillos, y las opciones con las que se podrían tener modelos más completos y con posibilidad de análisis más completos.
- Al tratarse de **flujos de transporte sobre una red**, será importante conocer cómo se distribuirán los flujos sobre la misma. La manera en la que eso se hace puede ser independiente o conjunta a la alternativa de transporte empleada. Será un elemento importante a tener en cuenta en el desarrollo del modelo conceptual.
- **Evaluaciones de los resultados**. Los resultados obtenidos del análisis del sistema son, de forma general, distribuciones de flujos, costes, tiempos y distancias, además de otras variables que vayan a ser tenidas en

cuenta. Los resultados obtenidos sirven para establecer otro tipo de análisis complementarios, como son evaluación económica o medioambiental. Esto permitirán evaluar el impacto que el transporte genera sobre el entorno así como los beneficios que pueda tener la empresa explotadora del servicio.

Así la Figura 7 representa un resumen de estos elementos y las relaciones que existen entre ellos. Como se puede ver, el modelo de transporte es el elemento central, con un conjunto de requerimientos de información que permiten la obtención de los resultados, que han de ser coherentes con los objetivos buscados.

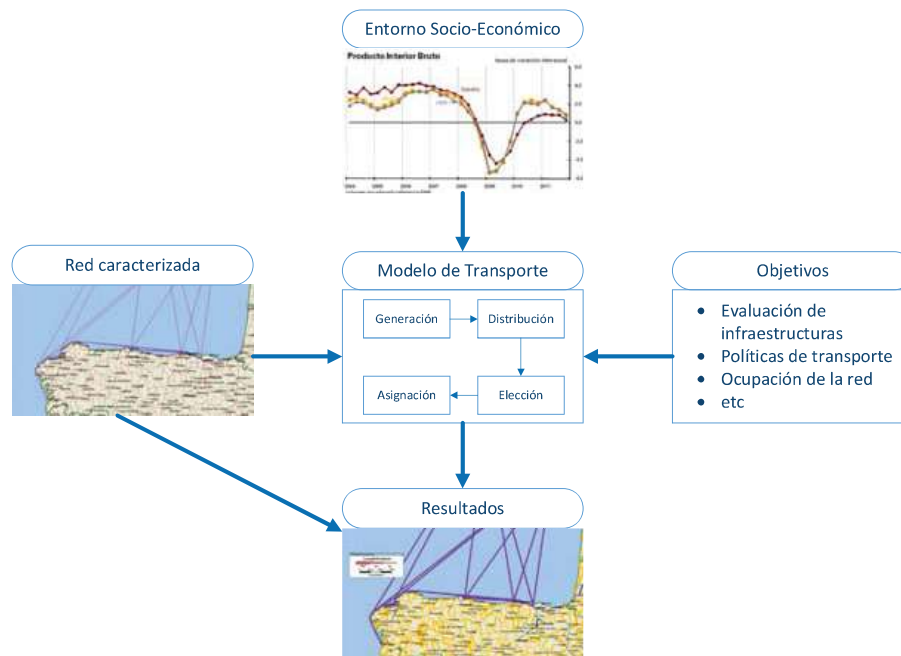


Figura 7: Elementos principales de la modelización.

4.1.2. Selección del nivel de agregación de los orígenes y destinos.

El primero de los elementos que tiene una importante relación con las variaciones socioeconómicas es la carga que se va a mover en el sistema. El estado económico y los poblacionales tienen mucho que ver con la cantidad de mercancía demandada, y con los flujos de carga que se van a mover por la red. La demanda de transporte es una demanda derivada (Ortúzar and Willumsen 2011), ya que no es un fin en sí misma. Esto significa que el movimiento de mercancías está relacionado con la satisfacción de ciertas necesidades, es decir,

de forma general no se va a producir un movimiento de mercancías desde un lugar donde no se genera a un lugar donde no es demandado. Esto se traduce en que un sistema bien planificado y desarrollado tiene su reflejo en una mejor cobertura de necesidades y mejora en las posibilidades de movilidad y desarrollo de las diferentes áreas.

Debido a esta cobertura de necesidades es importante la decisión de los puntos de generación y consumo de dichas mercancías. La decisión de estos puntos, o áreas de análisis de tráfico (TAZ en la bibliografía), depende en gran medida de la disponibilidad de los datos existentes o que el analista ha sido capaz de recopilar.

Muchas veces la decisión del nivel de agregación necesario para la definición de estos orígenes y destinos de carga supone un problema. Para ello en el modelo se plantea una herramienta de decisión basada en longitudes. En un ámbito geográfico hay diferentes áreas susceptibles de ser los elementos de análisis. Si se toma el caso de España se puede tomar como dichas áreas de manera muy agregada las 17 comunidades autónomas que coinciden con el nivel NUTS 2 de la Unión Europea (Eurostat). Pero también se puede disminuir el nivel de agregación a NUTS 3, provincias, y así sucesivamente. Lo que se plantea es estimar el error (en términos de longitud), en los que se está incurriendo por adoptar diferentes configuraciones de TAZs. La herramienta calcula las distancias entre orígenes y destinos entre las zonas de mayor agregación y las distancias entre los orígenes y destinos de niveles de agregación menores.

Para ello se van a tener en cuenta tres elementos principales: el elemento de menor agregación a analizar, por ejemplo, municipios en España, el elemento de mayor agregación, como las provincias, y un punto de referencia. Dentro de todas las áreas disponibles de menor agregación se elige un subconjunto de forma aleatoria, tanto de orígenes como de destinos, para el cálculo de distancias entre esos orígenes y el punto base, y entre el punto base y destino, que permite construir una matriz de distancias entre orígenes y destinos. Para la obtención de esta matriz, se calcula la distancia en línea recta entre los dos puntos considerados.

En el nivel superior se toman las áreas que contienen a las de menor agregación, consideradas en el apartado anterior. Se calcula la matriz de distancias de forma similar a la anterior.

Para poder comparar los valores de ambos casos, y evaluar si se está cometiendo mucho error con los niveles de agregación superiores, es necesario convertir esta última matriz en una similar a la primera. Es necesaria una matriz que tenga los mismos orígenes y destinos que la de menor agregación, y para

cada uno de esos pares el valor que le corresponde es el de la matriz de valores agregados. Para elegir cual es el valor de esa última matriz que corresponde a un par origen destino determinado, se busca como origen el elemento más agregado al que pertenece el origen desagregado de ese par, y lo mismo para destino. Ese elemento es que irá en la matriz para comparar.

Es decir, se tiene dos grupos principales de orígenes y destinos, de mayor y menor agregación. Así n_o será el conjunto completo de orígenes de menor grado de agregación, mientras que N_o será el conjunto de orígenes de nivel más agregado. De la misma forma n_D y N_D , los correspondientes a los destinos. Los orígenes estarán representados por los índices i y k , para los grados de agregación menor y mayor, siendo j y m , los índices empleados para los destinos. La red considerada está formada por un conjunto de arcos ($a \in A$) y nodos ($p \in P$), caracterizados de manera adecuada para análisis. Cada uno de esos arcos a tiene una longitud l . La distancia entre las TAZs más desagregadas estará representada por d_{ij} , mientras que la de las TAZs agregadas será d_{km} . La matriz de TAZs desagregadas construida con las distancias agregadas se denominará d'_{ij} .

$$\begin{aligned}
 & i \in n_o, j \in n_D \\
 & k \in N_o, m \in N_D \\
 d'_{ij} &= \sum_{k \in N_o} \sum_{m \in N_D} \delta_{ik} \delta_{jm} d_{km} \\
 & \text{siendo:} \\
 \delta_{ik} &= \begin{cases} 1 & \text{si } i \in k \\ 0 & \text{si } i \notin k \end{cases} \\
 \delta_{jm} &= \begin{cases} 1 & \text{si } j \in m \\ 0 & \text{si } j \notin m \end{cases}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Hay dos matrices de distancias d_{ij} y d'_{ij} , que nos permite comparar el error que se está cometiendo cambiando el grado de agregación en función de la distancia.

Se elige la variable distancia porque es un valor representativo de los tramos y de la que generalmente dependen otro tipo de variables importantes como son el coste del transporte y el tiempo.

Así, tomando los siguientes países sudamericanos: Argentina, Chile, Brasil Perú y Bolivia, la Figura 8 representa una parte de la matriz de distancias de un conjunto de elementos aleatorios a nivel departamental.

	Antonio Raymondi	Bolívar	Cajatambo	Chiclayo	Chota	Condorcanqui
Adolfo Alsina	2640.79	2746.58	2594.36	2879.83	2856.07	2909.83
Antofagasta	1483.77	1589.57	1437.35	1722.82	1699.06	1752.82
Arauco	2464.82	2570.61	2418.39	2703.86	2680.10	2733.86
Buruyacú	1653.29	1759.09	1606.86	1892.34	1868.58	1922.33
Castelli	2392.69	2498.49	2346.26	2631.74	2607.98	2661.73
Chiloé	2791.27	2897.07	2744.84	3030.31	3006.56	3060.31
Choapa	2042.91	2148.71	1996.49	2281.96	2258.20	2311.96
Colchagua	2254.24	2360.04	2207.82	2493.29	2469.53	2523.29
General Paz	2340.84	2446.64	2294.42	2579.89	2556.13	2609.89
Gualeguaychú	2173.44	2279.24	2127.02	2412.49	2388.73	2442.49
Linares	2339.50	2445.30	2293.07	2578.54	2554.79	2608.54
Lomas de Zamora	2294.23	2400.03	2247.81	2533.28	2509.52	2563.28
Roque Pérez	2324.68	2430.47	2278.25	2563.72	2539.97	2593.72
Saladas	1877.10	1982.89	1830.67	2116.14	2092.39	2146.14
San Pedro	2205.21	2311.00	2158.78	2444.25	2420.50	2474.25
Sarmiento	1772.12	1877.92	1725.69	2011.16	1987.41	2041.16
Talca	2315.93	2421.72	2269.50	2554.97	2531.22	2584.97
Valdivia	2655.07	2760.87	2608.65	2894.12	2870.36	2924.12
Valparaíso	2137.33	2243.13	2090.91	2376.38	2352.62	2406.38
Zapala	2528.29	2634.09	2481.86	2767.33	2743.58	2797.33

Figura 8: Matriz de distancias a nivel departamental.

El grado de agregación superior es un nivel provincial, siendo su matriz de distancias la que se puede ver en la Figura 9.

	Alto Paraguay	Amazonas	Ancash	Caazapá	Cajamarca	Canindeyú	Cordillera
Antofagasta	1311.65	1778.85	1612.65	1749.99	1768.34	1677.58	1659.24
Buenos Aires	2202.36	2669.55	2503.36	2640.69	2659.04	2568.29	2549.94
Bío-Bío	2267.63	2734.82	2568.63	2705.97	2724.31	2633.56	2615.21
Coquimbo	1813.01	2280.21	2114.01	2251.35	2269.70	2178.94	2160.60
Corrientes	1733.26	2200.45	2034.26	2171.60	2189.94	2099.19	2080.84
Entre Ríos	1911.66	2378.86	2212.67	2350.00	2368.35	2277.60	2259.25
Libertador General Bernardo O'Higgins	2068.55	2535.74	2369.55	2506.89	2525.23	2434.48	2416.13
Los Lagos	2553.86	3021.06	2854.86	2992.20	3010.55	2919.80	2901.45
Maule	2150.21	2617.41	2451.21	2588.55	2606.89	2516.14	2497.79
Neuquén	2338.64	2805.84	2639.64	2776.98	2795.33	2704.57	2686.22
Río Negro	2438.63	2905.83	2739.63	2876.97	2895.32	2804.56	2786.22
Santiago del Estero	1569.77	2036.97	1870.77	2008.11	2026.46	1935.70	1917.36
Tucumán	1504.24	1971.44	1805.25	1942.58	1960.93	1870.18	1851.83
Valparaíso	1957.20	2424.40	2258.20	2395.54	2413.89	2323.13	2304.79

Figura 9: Matriz de distancias nivel provincial.

Para construir las matrices de distancias comparables lo que se hace es, por ejemplo para el primer par origen destino desagregado General Paz – Antonio Raimondi, buscar a qué provincia pertenece cada elemento. Así General Paz pertenece a Buenos Aires en Argentina y Antonio Raimondi a Ancash en Perú.

	Antonio Raymondi	Bolívar	Cajatambo	Chiclayo	Chota	Condorcanqui
Adolfo Alsina	2739.63	2824.29	2624.74	2962.48	2895.32	2905.83
Antofagasta	1612.65	1697.31	1497.76	1835.50	1768.34	1778.85
Arauco	2568.63	2653.29	2453.73	2791.48	2724.31	2734.82
Buruyacú	1805.25	1889.90	1690.35	2028.10	1960.93	1971.44
Castelli	2503.36	2588.02	2388.46	2726.21	2659.04	2669.55
Chiloé	2854.86	2939.52	2739.97	3077.72	3010.55	3021.06
Choapa	2114.01	2198.67	1999.12	2336.87	2269.70	2280.21
Colchagua	2369.55	2454.21	2254.66	2592.40	2525.23	2535.74
General Paz	2503.36	2588.02	2388.46	2726.21	2659.04	2669.55
Gualeguaychú	2212.67	2297.32	2097.77	2435.52	2368.35	2378.86
Linares	2451.21	2535.87	2336.32	2674.06	2606.89	2617.41
Lomas de Zamora	2503.36	2588.02	2388.46	2726.21	2659.04	2669.55
Roque Pérez	2503.36	2588.02	2388.46	2726.21	2659.04	2669.55
Saladas	2034.26	2118.92	1919.36	2257.11	2189.94	2200.45
San Pedro	2503.36	2588.02	2388.46	2726.21	2659.04	2669.55
Sarmiento	1870.77	1955.43	1755.88	2093.63	2026.46	2036.97
Talca	2451.21	2535.87	2336.32	2674.06	2606.89	2617.41
Valdivia	2854.86	2939.52	2739.97	3077.72	3010.55	3021.06
Valparaíso	2258.20	2342.86	2143.31	2481.06	2413.89	2424.40
Zapala	2639.64	2724.30	2524.75	2862.49	2795.33	2805.84

Figura 10: Matriz de distancias desagregada basada en valores agregados.

Buscando ese valor en la Figura 9 se obtiene una distancia de 2503.36 km, que será el valor que rellena el elemento General Paz – Antonio Raimondi, que se construye para comparar con la calculada con los elementos desagregados.

Con los datos obtenidos en el ejemplo se ha hecho un análisis, comparando las distancias de la matriz de TAZs desagregadas procedentes de valores agregados y la de valores desagregados. Para ello se ha calculado el porcentaje que representa la diferencia entre los dos valores respecto al valor de la distancia calculada con los TAZs desagregados. Los resultados obtenidos pueden verse en la Tabla 14.

Tabla 14: Resultado de las diferencias entre distancias.

Clase	Frecuencia	% acumulado
0.00%	19	4.75%
5.00%	381	100.00%
10.00%	0	100.00%
15.00%	0	100.00%
20.00%	0	100.00%
25.00%	0	100.00%

Como se puede ver la mayoría de las diferencias se encuentran en valores menores del 5% de diferencia respecto a la distancia calculada con el mayor grado de desagregación.

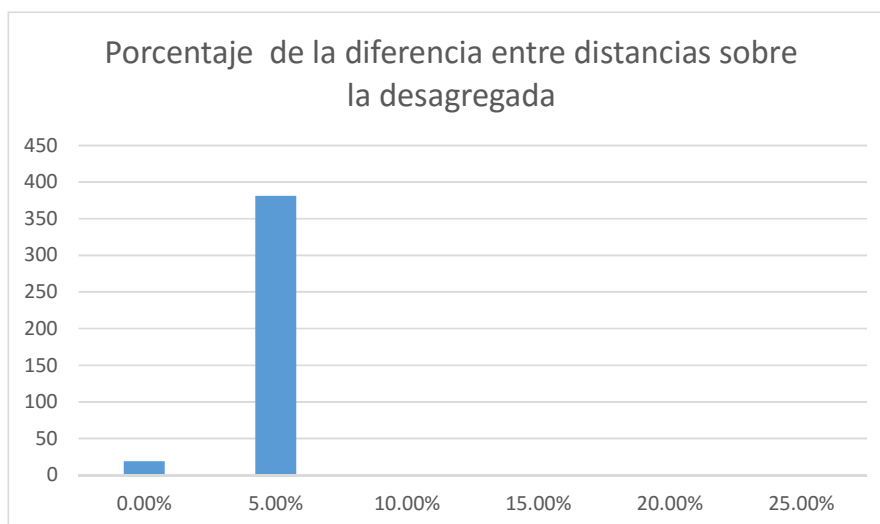


Figura 11: Porcentaje de la diferencia entre distancias respecto a la calculada con TAZs desagregadas.

Con esto se obtienen dos matrices comparables, tanto para valores agregados como desagregados, lo que permite comprobar si el error del uso de

áreas más agregadas es asumible en el análisis. Esto es necesario porque en muchos casos los datos disponibles no tienen el grado de desagregación que resultaría adecuado para el análisis y será necesario decidir si se busca un método de desagregación de los datos o se va a un grado de agregación mayor.

4.1.3. Datos de entrada al modelo.

En el presente apartado se presentarán los datos de entrada al modelo conceptual de transporte desarrollado para facilitar el análisis de los sistemas de transporte. Para ello se va a indicar la notación de los principales elementos que se repiten a lo largo de todo el modelo.

- i : TAZs origen de los transportes.
- j : TAZs destino de los transportes.
- k : Nodo intermodal.
- n : Nodo de la red.
- N : Conjunto de nodos de la red.
- t : Periodo temporal.
- m : Tipo de mercancía.
- β : Modo de transporte.
- α : Alternativa de transporte.
- P : Producción de mercancía.
- D : Demanda de mercancía.
- τ : Tiempos.
- c : Costes.
- pf : Precios fijos.
- pv : Precios variables.
- F : Flujos de mercancía.
- q : Cantidad de envío.
- E : Emisiones.
- I : Probabilidad de incidencias.
- R : Retrasos.
- Q : Capacidad.
- l : Tramo de la red.
- L : Conjunto de tramos de la red.
- γ : Criterio de minimización.
- ω : Frecuencia de servicio.

Todos estos elementos formarán parte del modelo de transporte completo. Como se indicaba anteriormente, las TAZs origen y destino son los puntos entre los que se va a mover la mercancía a través de su distribución sobre la red.

4.1.3.1. Datos de entrada externos al modelo.

El modelo estará conformado por un conjunto de datos de entrada, etapas de transformación y relaciones entre los mismos. Muchos de los datos de entrada a los diferentes pasos, necesarios en el modelo, no son externos. Es decir proceden de la aplicación de pasos previos. En este caso se explicará la mayoría de los datos de entrada a los diferentes pasos, sobre todo los que vienen del exterior del mismo.

- La red disponible para llevar a cabo el modelo. La disponibilidad de la misma es un elemento fundamental para el desarrollo del modelo. La forma en la que puede entrar a formar parte del modelo no es única. Por un lado se puede disponer de un SIG que contenga la cartografía con la representación real de las infraestructuras existentes. Pero su no disponibilidad se puede solventar mediante el empleo de grafos simplificados, que contengan la misma información de la que dispone cualquier sistema de información geográfico. De forma particular deberían de indicar como información mínima la distancia real de cada tramo, el tipo de vía de la que se trata y los nodos representativos de la red, es decir, por lo menos orígenes, destinos y nodos intermodales.
- La mercancía que se va a mover por la red viene representada por las matrices Origen-Destino (MOD), $F_{m,t,i,j}$. Representan el flujo de mercancías, en la unidad de medida correspondiente al estudio, entre origen y destino para cada periodo temporal y cada mercancía considerada.

Dichas matrices pueden proceder de dos vías fundamentales. La primera de ellas es que en el área de estudio se hayan realizados estudios previos o recopilaciones de información que hayan dado lugar a estas mercancías. La otra opción es que sea necesario establecer las condiciones socioeconómicas y sus relaciones con las cantidades producidas y demandadas. Aparte de los valores históricos, será necesario establecer cómo son las evoluciones esperadas o previstas

Además, las matrices que proceden de estudios previos pueden tener niveles de agregación diferentes a las zonas de análisis elegidas y esto puede hacer que sea necesario un proceso de transformación.

- Otra de las entradas necesarias en el modelo es la matriz de distancias mínimas entre pares origen y destino para cada una de los periodos considerados. Estas matrices serán entre los orígenes y destino del sistema, y será necesaria una por cada periodo temporal ya que la red puede variar con el tiempo, tanto es infraestructura como en servicios. El origen de estas matrices procederá de la red de transporte caracterizada que se

disponga para llevar a cabo el modelo. Así se deben disponer de las siguientes matrices:

$$d_{t,i,j} \forall t, i, j \quad (8)$$

- Es necesario caracterizar correctamente los nodos y arcos de la red, independientemente de la forma que esta adopte. Por lo tanto, también se necesitará información relacionada con estos elementos. El primero de los valores está relacionado con las penalizaciones en tiempos en los nodos de la red. Dependiendo del tipo de nodo y al tramo de red que pertenezca dicha penalización tendrá un significado diferente.

$$\tau_{h,t,m} \forall h \in N \text{ siendo } h \text{ un peaje de la red de carretera}$$

$$\tau_{a,t,m} \forall a \in N \text{ siendo } a \text{ una aduana de la red} \quad (9)$$

$$\tau_{k,t,m} \forall k \in N$$

El último de los tiempos es en los nodos intermodales, y que puede ser un valor externo, como los que se están describiendo, pero también puede ser el resultado de uno de los pasos implementados en el modelo, en particular del modelo de congestión de los nodos intermodales. Cuando se está hablando de transporte de mercancías, mientras que el nivel de agregación no sea tan pequeño que se está hablando de un servicio reparto, los retrasos por congestiones que pueden existir están relacionados con los nodos intermodales, por su dimensión y por los medios de movimiento de carga que poseen. Las congestiones en los tramos de la red en estos niveles de agregación no tienen tanta importancia, por quedar absorbida por los periodos de análisis y el tamaño de la red.

- Muchos de los modos dependen de un servicio de transporte comercial para su funcionamiento, es decir, las salidas y los números de viajes por unidad de tiempo están fijadas, y el uso que los viajes o envíos puedan hacer del mismo dependen de estas frecuencias de envío. Esto implica que los tiempos de los viajes que empleen esta alternativa dependerán de la frecuencia de los servicios. Esta frecuencia es parte de la información externa que debe de alimentar al modelo. Dicha entrada puede ser obtenida de dos maneras diferentes, como los valores en sí de esos tiempos o mediante su estimación a partir de un sistema de rutas definidas

para cada uno de los modos afectados. Los modos que se ven afectados por las frecuencias son todos menos la carretera, pues sus envíos de forma general no dependen de servicios fijos, al contrario que ocurre el medios como son el marítimo, aéreo o ferroviario.

$$\omega_{k,k,t,\beta} \forall k, t, \beta \quad (10)$$

- También es importante tener caracterizados ciertos elementos por su coste asociado, ya que el coste total de un transporte no solamente es debido al tramo atravesado, sino que al igual que los tiempos, depende de lo que pasa en los nodos de la ruta. Así de forma general será necesario tener en cuenta los siguientes costes asociados a la red:

$$\begin{aligned} c_{p,t,m} \forall p \in N \text{ siendo } p \text{ un peaje de la red de carretera} \\ c_{a,t,m} \forall a \in N \text{ siendo } a \text{ una aduana de la red} \\ c_{k,t,m} \forall k \in N \text{ siendo } k \text{ un nodo intermodal} \end{aligned} \quad (11)$$

- Para el cálculo de costes en los tramos de red se establecerán un conjunto de precios por unidad de longitud de la red (por ejemplo kilómetros), tanto fijos (pf) como variables (pv), que permitan obtener los costes debidos al movimiento de mercancías a lo largo de esos tramos.
 - Precios unitarios variables que dependen de la distancia recorrida y del tamaño del envío. Será por el tipo de mercancía transportada así como por el modo de transporte y el periodo temporal al que corresponden.

$$pv_{m,\beta,t} \forall m, \beta, t \quad (12)$$

- Precios unitarios fijos, los cuales representan los costes que puede llevar aparejado un envío por su tamaño, independientemente de los tramos recorridos. Es decir, determinado envío tiene un coste fijo independiente de la longitud del viaje. Dependerá del par origen destino del envío. Si no se especifica su valor será cero.

$$pf_{m,\beta,t,i,j} \forall m, \beta, t, i, j \quad (13)$$

- De la misma manera que hay unos costes en ciertos nodos de la red y debida a los tramos de la misma, también habrá unos costes importantes en los nodos intermodales, debidos a su propio funcionamiento. Por ejemplo, si se trata de un puerto, el coste se puede ver incrementado por las tasas portuarias, o por el coste del uso de los elementos de carga y descarga. De igual manera que en los precio de los tramos se va a definir un coste variable y otro fijo. Al no tratarse de un elemento con longitud, que se defina como fijo o variable tiene que ver con que dependa o no del tamaño que tiene el envío que está empleando las instalaciones del nodo.
 - El precio variable depende del tamaño del envío, y cuando no se especifique tomará el valor cero.

$$pv_{m,\beta,t,k} \forall m, \beta, t, k \tag{14}$$

- El precio fijo, no dependiente del tamaño del envío, tomará valor cero cuando no esté indicado. Dependerá como el anterior del tipo de nodo y del periodo temporal en el que se encuentre.

$$pf_{m,\beta,t,k} \forall m, \beta, t, k \tag{15}$$

Los tramos de la red se caracterizarán mediante un conjunto de atributos que son variables necesarias en los diferentes pasos del modelo. En particular son el atributo de incidencias y el de emisiones, para los tramos de la red, y la capacidad para los nodos intermodales.

- La probabilidad de incidencia puede venir definida de dos maneras. En primer lugar cuando se emplea una red altamente caracterizada puede que sea un valor conocido por cada uno de los tramos de la red, lo cual dará una exactitud al modelo muy alta. Por otro lado, existe una simplificación por la que según el modo, periodo temporal y tipo de mercancía se puede tener la probabilidad de incidencia. En el modelo se indicará mediante:

$$PI_{m,\beta,t} \forall m, \beta, t \tag{16}$$

- En cuanto a las emisiones, lo que se trata es de dar una aproximación a las emisiones de CO₂ del transporte, sirviendo de base para el estudio

de la huella de carbono de un envío. Es necesario introducir el coeficiente de emisiones de CO₂ por unidad de longitud de la red. Depende del modo de transporte empleado y del periodo temporal, ya que las mejoras tecnológicas pueden introducir variaciones en los coeficientes de emisión.

$$CE_{\beta,t} \forall \beta, t \quad (17)$$

- Anteriormente se ha indicado que los retrasos por congestión están directamente relacionados con la congestión en los nodos. Si este tiempo ha de ser calculado mediante un modelo de congestión es necesario conocer la capacidad máxima de los nodos intermodales. Estos dependen del tiempo, ya que al igual que en las infraestructuras de la red, en estos también se pueden producir ampliaciones o cambios en los medios de manipulación de la carga.

$$Q_{k,t} \forall k, t \quad (18)$$

- Una última entrada de información al modelo es para cada alternativa el conjunto de modo que la configuran.

4.1.3.2. Resultados intermedios del modelo.

Además de los datos procedentes del exterior del modelo hay un conjunto de datos de entrada a diferentes pasos dentro del modelo que proceden de cálculos dentro del mismo modelo. El proceso de cálculo se explicará con posterioridad en la tesis, pero a continuación se pasará a describir dichos elementos.

- El tamaño de envío por periodo temporal y tipo de mercancía. Contiene el tamaño medio en la unidad de peso elegida de mercancía, por ejemplo de toneladas, de cada envío de carga que se realiza en cada periodo de tiempo desde un origen a un destino. $q_{m,t,i,j}$. Su resultado procede de la aplicación del modelo de Cantidad de envío.

$$q_{m,t,i,j} \forall m, t, i, j \quad (19)$$

- Para cada par origen destino se obtendrán los valores de los costes de transporte. Será necesario obtener un valor por cada periodo temporal y tipo de mercancía que se está evaluando.

$$c_{m,t,i,j} \forall m, t, i, j \quad (20)$$

- Además de los costes para cada par origen destino también es necesario obtener el tiempo de viaje. De la misma forma que es necesario un coste para cada mercancía y periodo, lo será para el tiempo.

$$\tau_{m,t,i,j} \forall m, t, i, j \quad (21)$$

- Otro de los elementos que son entradas del modelo procedente de cálculos previos es la probabilidad de incidencia completa de un viaje entre par origen destino. La probabilidad de incidencias es dependiente del periodo temporal y de la mercancía que se transporta.

$$I_{\alpha,m,t,i,j} \forall m, t, i, j \quad (22)$$

- La importancia que el cuidado del medio ambiente tiene hoy en día, hace necesario que se tenga en cuenta este elemento. Para ello se obtendrá el valor de las emisiones de CO2 para cada envío entre origen y destino. Las mejoras que se puedan producir en las tecnologías hacen que su valor pueda variar de periodo en periodo, además de depender de la mercancía, pues esta fija los tamaños de envío y el vehículo.

$$E_{\alpha,m,t,i,j} \forall m, t, i, j \quad (23)$$

Toda esta información es la necesaria para llevar a cabo todos los pasos que conforman el modelo. A continuación se pasará a describir cada uno de los pasos del modelo conceptual.

4.1.4. Etapas que conforman el modelo.

Una vez definidas todas las necesidades de información que tiene el modelo, es necesario establecer como se obtienen los datos de entrada generados por el modelo, así como todos los pasos necesarios para llevar a cabo la planificación del sistema multimodal.

4.1.4.1. Generación de las matrices de flujos.

Uno de los primeros elementos que es necesario definir en el modelo son los modelos econométricos empleados para la estimación de la producción y demanda de mercancías en cada uno de los puntos considerados en el modelo. Para el modelo que se está definiendo, dichos modelos, serían un input de información, en particular el resultado de su estimación de los valores de las producciones y demandas y como se espera que evolucionen a lo largo del tiempo.

Existe una amplia metodología para esta parte de generación de carga, desde modelos de series temporales a modelos input-output. El modelo empleado depende mucho de la formación de analista, su procedencia y la disponibilidad de datos. La definición de un único modelo de generación queda descartada debido a esta alta variabilidad.

Los modelos más habitualmente empleados en la práctica son basados en regresión y series temporales ya que se adaptan mejor a las limitaciones habitualmente encontradas en la práctica respecto a disponibilidad de datos y son métodos estadísticos ampliamente empleados en análisis econométrico. Además, la proyección futura de las variables del modelo puede ser realizada de forma directa a partir de escenarios de evolución de los regresores del modelo. Otra ventaja de gran importancia es que pueden ser y han sido empleados tanto para modelar el tráfico internacional a gran escala (Nuzzolo, Crisalli, and Comi 2008) como el regional dentro de un país (Novak and Hodgdon 2011).

El mayor inconvenientes asociado al empleo de estos modelos es que, a largo plazo, sus coeficientes tienden a variar y no se pueden asumir estables (José Holguín-Veras et al. 2011) reduciendo la precisión de las estimaciones futuras de las variables. Sin embargo, a este respecto, se trata de un problema que afecta a todas las metodologías y que en este caso puede ser analizado con mayor facilidad mediante un adecuado planteamiento de los escenarios de experimentación ya que se trata de modelos con un número de parámetros manejable.

Los modelos basados en dinámica de sistemas han sido empleados en algunos modelos como el modelo ASTRA (2000). Estos modelos se basan en resultados previos de la literatura y en fundamentos de teoría económica. Una limitación es que no suelen permitir modelar adecuadamente los tráficos regionales y que no ofrecen contrastes estadísticos para validar la significación de los parámetros por lo que la validez de sus resultados es discutible (Gerard de Jong et al. 2013).

Los modelos de tasas de viaje zonales son principalmente usados como métodos para modelado rápido de efectos en el transporte y generalmente no se centran más que en un único modo. No reflejan relaciones de causalidad entre variables y la capacidad que tienen para modelar cambios en el comportamiento del sistema son muy limitadas.

Por último, se pueden destacar los modelos de insumo producto que han sido adoptados en algunos modelos como el modelo nacional belga o el modelo europeo SCENES. Su principal ventaja consiste en permitir modelar las relaciones entre sectores de forma detallada. Sin embargo, presentan como contrapartida diversas desventajas resumidas por (Martó Sargento 2009). Por un lado, requieren grandes cantidades de datos de entrada que suele ser difícil obtener en la práctica. Además, no son adecuados para modelar el tráfico regional en escalas de agregación espacial menores (Schuschny 2005). Asimismo, están afectados por importantes problemas de inestabilidad de los coeficientes en su proyección temporal debidos a cambios tecnológicos y organizacionales en las empresas que pueden tener un gran impacto a largo plazo sobre los coeficientes técnicos.

Cualquiera de estos modelos permite establecer el primero de los inputs del modelo, que son las producciones y demandas. Pero dichos valores no pueden ser empleado tal cual para ser distribuidos por la red, ya que no se conocen los destinos de las producciones y los orígenes de las demandas. Por lo tanto, será necesario implementar un método que distribuya en viajes origen y destino dichos valores.

La mayoría de los modelos de transporte tienden a emplear modelos gravitacionales para dicha distribución. Por ejemplo en Europa los modelos Dutch TEM-II (Tavasszy 1994), Dutch SMILE (Tavasszy et al 1999) y Great Belt traffic model (Fosgerau 1996) emplean un modelo gravitacional para la distribución de las producciones y demandas en viajes entre pares origen y destino. Esto funciona bien cuando la distribución de los viajes se está produciendo entre zonas en las que las relaciones comerciales se producen bajo las mismas condiciones, es decir, las relaciones comerciales no sufren grandes variaciones. En general, los intercambios económicos dentro de un país son iguales para todas las regiones que lo conforman, incluso en un área mayor como

la Unión Europea el marco comercial es el mismo para todos los países de la misma.

Sin embargo, cuando el intercambio se produce entre países con relaciones comerciales muy dispares, los modelos gravitacionales no recogen con detalle las variaciones de reparto que se puedan establecer debido a dichas relaciones, y sigue ponderando por el peso que se marque en su modelo gravitacional, que es la distancia en la mayoría de los casos.

Para en el modelo se plantea un **modelo de distribución mixto**. Para ello es necesario establecer que orígenes y destinos formarían parte del comercio o distribución interior sobre los que se aplicaría un modelo gravitacional y aquellos exteriores sobre los cuales se aplicaría un modelo de reparto.

Este modelo de reparto es un modelo de coeficientes estimados en base a datos históricos, y que repartirían las producciones en forma proporcional entre los distintos destinos y viceversa.

Así el esquema de dicho paso sería:

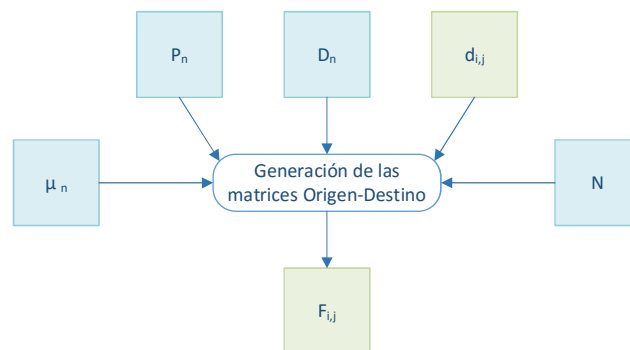


Figura 12: Modelo de distribución.

El cálculo de las matrices de flujos de mercancías, $F_{m,t,i,j}$, tendría en cuenta la diferenciación geográfica de los distintos nodos. Cada nodo que vaya a ser susceptible de ser origen o destino de carga debe ir marcado mediante un atributo llamado INTERIOR que tomará valores 0 o 1, dependiendo si forma parte del reparto regional o si es importación-exportación, respectivamente. Esta caracterización permitirá hacer dos grupos de nodos sobre los que se aplicara el método que le corresponde. Para obtener la matriz final será necesario aunar en una única matriz ambas soluciones.

$$\begin{aligned}
N_{interior} &= \text{select } * \text{ where } INTERIOR = 0 \\
N_{exterior} &= \text{select } * \text{ where } INTERIOR = 1 \\
d_{m,t,i,j} &= \min d'_{m,t,i,j} \forall m, t, i, j \\
&\text{if } i \in N_{interior} \ \& \ j \in N_{interior} \\
F'_{m,t,i,j} &= aP_{m,t,i} D_{m,t,j} f(d_{m,t,i,j}) \\
&\text{if } (i \in N_{interior} \ \& \ j \in N_{exterior}) \text{ or } (i \in N_{exterior} \ \& \ j \in N_{interior}) \\
F''_{m,t,i,j} &= \mu_{m,t,i,j} P_{m,t,i} \\
F''_{m,t,i,j} &= \mu'_{m,t,i,j} D_{m,t,j} \\
F_{m,t,i,j} &= F'_{m,t,i,j} + F''_{m,t,i,j}
\end{aligned} \tag{24}$$

Se crearían dos subconjuntos de nodos origen-destino, los interiores y los exteriores. En el caso de un origen y un destino interior se aplicaría un modelo del tipo gravitacional, donde la función generalizada del coste del viaje tiene como variable la distancia entre origen y destino, $d_{m,t,i,j}$. Esta matriz de distancias no es común para todas las mercancías, pues existen limitaciones en los modos utilizables por cada una. Así un gasoducto no será un modo admisible para una mercancía sólida o perecedera. Además, el periodo temporal hará que diferentes infraestructuras entren en funcionamiento o al contrario, que sean sustituidas por otras y dejen de tener uso. Se trata de una matriz de mínima distancia.

4.1.4.2. Cálculo de las matrices origen destino de diferentes variables de la red.

Por otro lado, se tiene en cuenta un **modelo de minimización**. Este modelo proporciona matrices origen-destino de costes, tiempos, longitudes, retrasos, incidencias y/o emisiones. Pero la minimización no se va a realizar por un único criterio, sino que de todas las variables de entrada que se han definido se podrá obtener una matriz de mínimo valor para cada par.

El funcionamiento del modelo de minimización sería el siguiente. En primer lugar se elige el criterio por el que se quiere minimizar, γ , (distancia, tiempo, coste, emisiones, incidencias). Con ese criterio se calcula el camino que minimiza el valor de dicha variable para cada par origen destino.

De manera paralela se calcula para dicho camino el valor del resto de variables que se quieren tener en cuenta en el modelo. En el caso de que se cal-

culase la matriz de camino mínimo, se generará de manera simultánea la matriz de costes, tiempos, emisiones y/o incidencias para ese camino mínimo. De la misma forma que se hace minimizando la longitud, se puede realizar con cualquiera de las otras variables. Se obtendrá un conjunto de matrices por cada una de las alternativas que se consideran en el modelo, lo mismo que para los periodos temporales.

$$d_{\gamma', \alpha, m, t, i, j} = \min d'_{\gamma', \alpha, m, t, i, j} = \min \{ \gamma'_{l_1} + \gamma'_{l_2} + \dots + \gamma'_{l_k} \} \forall \alpha, m, t$$

$$Ruta = \{l_1, l_2, \dots, l_k\} \quad (25)$$

$$d_{\gamma'', \alpha, m, t, i, j} = \gamma''_{l_1} + \gamma''_{l_2} + \dots + \gamma''_{l_k} \forall \gamma'' \neq \gamma'$$

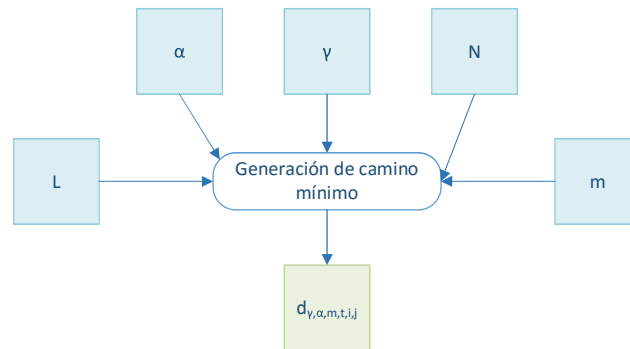


Figura 13: Modelo de minimización.

4.1.4.3. Cálculo de la cadena de tiempos y costes de viaje.

Los valores de los diferentes criterios se calcularán dentro del modelo a partir de los valores de entrada que se han definido para el modelo, de manera que es necesario indicar como se ha establecido el cálculo de cada uno de estos elementos.

El primero de ellos es el cálculo completo del viaje. Es importante tener en cuenta que el tiempo de un viaje no es solamente el tiempo que el vehículo está en movimiento, ya que debido al cumplimiento de regulaciones, o las condiciones de los nodos, es necesario tener los vehículos parados dentro de un mismo viaje. Tiempos de descanso, adunas, etc., pueden incrementar el tiempo de viaje, y no limitarlo únicamente a una relación entre la distancia recorrida y la velocidad a la que se está moviendo el vehículo. Además, los tiempos y costes son dependientes de la unidad de transporte.

Para la unidad de transporte se establece una doble forma de elección de la misma. La primera de ellas es establecer de principio el tipo de unidad de transporte, y con ello, el vehículo que emplea. Por ejemplo, se puede establecer, por conocimiento del sistema que la unidad de transporte va a ser un contenedor estándar de 20 pies, o TEU, para cualquiera de los modos de transporte que configuran las alternativas del modelo.

Por otro lado, se ha establecido un modelo que permite obtener el **tamaño óptimo de envío** y el vehículo necesario en el envío. Cada vehículo tiene sus velocidades, tiempo de descanso y costes asociados. Para su obtención se han establecido dos modelos en función de la disponibilidad de información:

- Si se dispone de los costes medios de inventario

$$q_{m,t,i,j} = \sqrt{\frac{2DS}{H}} = \sqrt{\frac{2 \times F_{\alpha,m,t,i,j} \times pv_{m,\alpha,t} \times d_{t,i,j}}{H}} \quad (26)$$

- Si no se conocen los costes de inventario.

$$q_{m,t,i,j} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (27)$$

Se trata de un modelo de regresión lineal, en base a datos históricos que dé el valor del tamaño de envío.

Una vez determinado el tamaño del envío y la unidad de transporte correspondiente, se puede construir la cadena de costes y tiempos correspondientes. Ambas cadenas están constituidas por más de un elemento. Para el cálculo de la cadena completa de tiempos hay que diferenciar si el transporte es solo por carretera o si es por un sistema multimodal. La diferencia radica en que los modos de transporte distintos de la carretera suelen estar asociados a un servicio y con una frecuencia en los envíos. Si se tratase de un modo de transporte que no esté limitado por las frecuencias podría emplear la cadena de tiempos de la carretera. No todos los elementos de la cadena tienen que tener valor, en el caso de que alguno de los elementos no aparezca su valor será cero.

Este cálculo no está únicamente asociado a los valores de tiempo que pueden cumplirse por atravesar los diferentes tramos de la red, sino que tiene en cuenta los tiempos de cada uno de los nodos que atraviesa la ruta obtenida de la minimización del criterio elegido.

Cadena de tiempos de carretera.



Figura 14: Alternativa solo carretera.

$$\begin{aligned}
 \tau_{carretera,m,t,i/k,j/k} &= \tau'_{m,t,i/k,j/k} + \tau_d + \tau_{h,m,t,i/k,j/k} \\
 &+ \tau_{a,m,t,i/k,j/k} \\
 \tau'_{m,t,i/k,j/k} &= \frac{d_{i/k,j/k}}{v} \\
 \tau_d &= coef_{des} \tau'_{m,t,i/k,j/k}
 \end{aligned} \tag{28}$$

Donde:

$\tau_{carretera,m,t,i/k,j/k}$	Tiempo completo de viaje por carretera entre origen y destino o entre el origen o destino y un nodo intermodal.
$\tau'_{m,t,i/k,j/k}$	Tiempo debido al vehículo en movimiento.
v	Velocidad del tramo en km/h, o unidad del sistema.
τ_d	Tiempo debido a descansos y legislación a cumplir. Se obtiene como un coeficiente por el tiempo total en tránsito.
$\tau_{h,m,t,i/k,j/k}$	Tiempo de espera en peaje.
$\tau_{a,m,t,i/k,j/k}$	Tiempo de espera en aduanas.

Cadena de tiempos de modos distintos de carretera.



Figura 15: Alternativa no_carretera.

$$\begin{aligned} \tau_{no_carretera,m,t,k,k} &= \tau'_{m,t,k,k} + \tau_d + f(\omega_{m,k,k,t,\beta}) \\ \tau'_{m,t,k,k} &= \frac{d_{k,k}}{v} \\ \tau_d &= coef_{des} \tau'_{m,t,k,k} \end{aligned} \tag{29}$$

Donde:

- $\tau_{no_carretera,m,t,k,k}$ Tiempo completo de viaje por medios de transporte distinto de carretera entre terminales del servicio.
- $\tau'_{m,t,k,k}$ Tiempo debido al vehículo en movimiento.
- v Velocidad del tramo en km/h, o unidad del sistema.
- τ_d Tiempo debido a descansos y legislación a cumplir. Se obtiene como un coeficiente por el tiempo total en tránsito.
- $f(\omega_{m,k,k,t,\beta})$ Función de tiempo dependiente de la frecuencia del servicio.

Cadena completa multimodal.

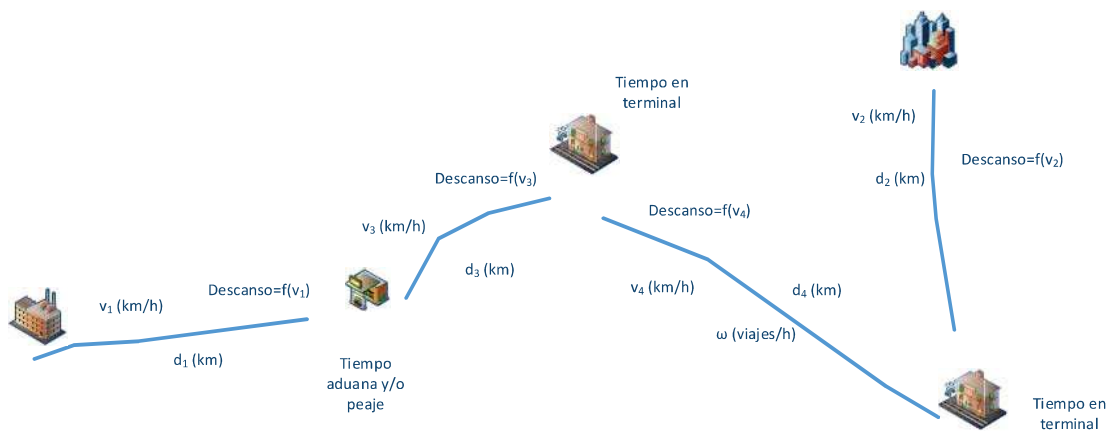


Figura 16: Alternativa multimodal completa.

$$\tau_{\alpha,m,t,k,k} = \tau_{carretera,m,t,i/k,j/k} + \tau_{no_carretera,m,t,k,k} + \sum_{r=1}^s \tau_{m,t,k} \tag{30}$$

Donde:

$\tau_{carretera,m,t,i/k,j/k}$	Tiempo completo de viaje por carretera entre origen y destino o entre el origen o destino y un nodo intermodal.
$\tau_{no_carretera,m,t,k,k}$	Tiempo completo de viaje por medios de transporte distinto de carretera entre terminales del servicio.
$\sum_{r=1}^s \tau_{m,t,k}$	Suma del tiempo de espera en todos los nodos intermodales atravesados por la ruta.

De manera análoga a lo que se ha hecho con los tiempos, se ha de construir una cadena de costes para cada una de las alternativas. En esta cadena de costes será necesario tener en cuenta tanto los costes del vehículo en movimiento como los costes asociados a los nodos de la ruta. Dichos nodos pueden ser nodos intermodales o nodos de características especiales como las aduanas o los peajes. De nuevo se diferencia entre puramente carretera y otros servicios de transporte.

Cálculo del coste de transporte por carretera.

$$\begin{aligned}
 c_{carretera,m,t,i/k,j/k} &= c_{p,m,t} + c_{a,m,t} + pv_{carretera,m,t} d_{m,t,i/k,j/k} q_{m,t,i,j} \\
 &+ pf_{carretera,m,t,i/k,j/k}
 \end{aligned} \quad (31)$$

Donde:

$c_{p,m,t}$	Coste debido a los peajes atravesados en la ruta.
$c_{a,m,t}$	Coste de las aduanas presentes en la ruta.
$pv_{carretera,m,t}$	Precio variable que depende del tramo recorrido y del tamaño del envío.
$pf_{carretera,m,t,i/k,j/k}$	Coste fijo por determinado tipo de envío.

Si alguno de los valores no es aplicable, tomará valor cero.

Cálculo de tiempos por modo distinto de carretera.

$$\begin{aligned}
 C_{no_carretera,m,t,k,k'} &= pv_{no_carretera,m,t} d_{m,t,k,k'} q_{m,t,k,k'} \\
 &+ pf_{no_carretera,m,t,k,k'}
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Donde:

$pv_{no_carretera,m,t}$ Precio variable que depende del tramo recorrido y del tamaño del envío.

$pf_{no_carretera,m,t,i/k,j/k}$ Coste fijo por determinado tipo de envío.

Como en el caso anterior, si alguno de los valores no es aplicable tomará el valor cero.

Cadena multimodal completa.

$$\begin{aligned}
 C_{\alpha,m,t,i,j} &= C_{carretera,m,t,i,k} + C_{k,t,m} + C_{servicio\ multimodal,m,t,k,k'} + C_{k',t,m} \\
 &+ C_{carretera,m,t,k',j}
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Donde:

$C_{k,t,m}$ Coste asociado a nodos intermodales, como puertos, terminales ferroviarias, etc.

4.1.4.4.Cálculo de emisiones e incidencias.

Las otras dos variables de las cuales se calculan matrices origen destino son emisiones y probabilidad de incidencia.

Cálculo de emisiones.

$$E_{\alpha,m,t,i,j} = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n \sum_{\beta=1}^x CE_{\beta,t,m} d_{a,b} \rho_{\beta,m,t}
 \tag{34}$$

Donde:

- $CE_{\beta,t,m}$ Es el coeficiente de emisiones de CO₂ para cada medio de transporte.
- $d_{a,b}$ Distancia del tramo recorrido en la ruta, de cada uno de los medios de transporte que la forman.
- $\rho_{\beta,m,t}$ Consumo, por unidad de distancia, de combustible.

Cálculo de probabilidades de incidencias.

$$I_{\alpha,m,t,i,j} = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n \sum_{\beta=1}^x PI_{\beta,t,m} d_{a,b} \quad (35)$$

Donde:

- $PI_{\beta,t,m}$ Es la probabilidad de incidente, por unidad de longitud, para cada medio de transporte.
- $d_{a,b}$ Distancia del tramo recorrido en la ruta, de cada uno de los medios de transporte que la forman.

Una vez están establecidas todas las matrices indicadas el modelo se encuentra en condiciones de aplicar los siguientes pasos del mismo, ya que se tienen las matrices origen destino de carga y las matrices de tiempos, costes, longitudes, emisiones e incidencias, obtenidas de la aplicación del criterio de minimización elegido. Incluido el tamaño del envío, ya sea por el paso implementado en el modelo como si se fija de antemano.

4.1.4.5. Cálculo de las matrices de flujos desagregados por mercancía.

Lo que se hace necesario en este punto es saber la proporción, de la carga total que se tiene, que usa cada una de las alternativas de transporte consideradas en el modelo. Para ello se plantea un modelo de **reparto modal** doble. Por un lado se plantea un modelo de elección discreta basada en elecciones individuales, mientras que por otra parte se plantea una elección en base a criterio, donde de forma conjunta se hace una selección de modo y ruta para un envío determinado.

Los modelos de elección discreta se basan en la elección hecha por cada individuo entre un conjunto finito de posibilidades. Dentro de estos modelos los más empleados son el logit multinomial y el logit jerárquico (Ortúzar and Willumsen 2011). Es importante indicar la necesidad de datos de encuestas previas, para su ajuste.

Estos modelos emplean el concepto de utilidad. La utilidad lo que representa es cuan atractiva es una alternativa de transporte para un envío. Para construir esa utilidad es necesario identificar el conjunto de variables que hacen que el usuario tome una decisión. Según Kreutzberger (2008) la distancia y el tiempo son elementos importantes de la competitividad del transporte intermodal y por lo tanto, los elementos fundamentales por los cuales se hace la elección de una alternativa de transporte determinada. Son dos de las variables que el modelo de elección considerado deberá tener en cuenta. Los usuarios le dan gran importancia al tiempo, pero no medido únicamente como el debido al transporte, sino las frecuencias que existen en los servicios y los retrasos en los que se puedan incurrir. Sobre todo los retrasos son importantes para algunos cargadores debido a la naturaleza de su mercancía o los contratos firmados.

Por ello en el modelo se ha tenido especial cuidado con los tiempos de espera en los nodos (que hacen que se produzcan o no retrasos) y de la frecuencia de los servicios. Como se puede observar en la descripción de la cadena de costes ambos elementos han sido considerados. Pero además, el modelo ha puesto especial cuidado en los retrasos. El nivel de agregación de los modelos de mercancías hace que los retrasos debidos a congestiones en los tramos sean absorbidos por el mismo. Mientras que los nodos intermodales si representan una importante fuente de retrasos, ya que si su capacidad no es lo suficientemente alta para absorber toda la mercancía que intenta emplearlo hará que se incurran retrasos, pues la mercancía se encontrará a la espera hasta tener disponible espacio o métodos de carga. Un ejemplo es el empleo del uso de los atraques de un puerto. Si están todos usados y hay gran flujo de mercancías por el él, a la entrada del puerto se podrá observar una gran congestión de barcos esperando su muelle de atraque.

Para tener en cuenta esto se ha implementado un modelo de retrasos que será explicado con más detalle en un apartado posterior.

En el modelo de elección discreta puede a mayores ser configurado con más variables del modelo como son las emisiones o las probabilidades de incidencias en el viaje.

Como se ha dicho, los modelos más empleados son los tipo Logit. Estos no dan en valor absoluto de modos elegidos por cada alternativa, sino que para

determinado envío, con determinadas características, se obtiene la probabilidad de uso de cada una de las alternativas disponibles para ese envío. Estos modelos se basan en la teoría de utilidad aleatoria que se fundamentan en:

- Los individuos pertenecen a una determinada población homogénea R , actúan racionalmente y poseen información perfecta, esto es, eligen siempre la alternativa que maximiza su utilidad neta personal en función de un conjunto de características.
- Existe un cierto conjunto de alternativas disponibles $\Delta = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$. Cada una de esas alternativas e individuos están caracterizados por un conjunto de atributos X . Cada individuo dispone de un conjunto $x \in X$ de atributos y tendrá que realizar su elección entre un conjunto de alternativas que pertenecen a Δ .
- Cada alternativa $\alpha_i \in \Delta$ tiene asociada una utilidad U_{ir} para cada individuo r . La función de utilidad tiene dos componentes principales:
- Una parte es la que se puede medir, representada por V_{ir} . Esta es función de los atributos X .
- Tendrá una componente aleatoria, que además de los errores que puedan proceder de la medición y observación tiene en cuenta las preferencias personales de cada individuo. Se representará mediante ε_{ir} .

Con ello se puede indicar que el modelo tiene la forma:

$$U_{ir} = V_{ir} + \varepsilon_{ir} \quad (36)$$

Este tipo de expresión permite explicar porque ante el mismo grupo de alternativas y restricciones dos individuos no hagan la misma elección o que un individuo no haga la que se considera mejor opción. Para que esto pueda ser aplicado es necesario tener una población lo más homogénea posible. Esto hace que en algunos casos sea necesario una división de esa población.

$$V_{ir} = \sum_{s=1}^X \theta_{si} x_{isr} \quad (37)$$

Para los residuos ε_{ir} se estima que sea una variable aleatoria, de media cero, a definir por una función probabilística.

- El individuo realizará su elección buscando la maximización de la utilidad.

$$\begin{aligned} \alpha_i &\leftrightarrow U_{ir} > U_{jr} \quad \forall \alpha_j \in \Delta \\ V_{ir} - V_{jr} &> \varepsilon_{jr} - \varepsilon_{ir} \end{aligned} \tag{38}$$

Como el error no es medible y desconocido, lo que se plantea es una probabilidad:

$$P_{ir} = Prob(\varepsilon_{jr} \leq \varepsilon_{ir} + V_{ir} - V_{jr}) \quad \forall \alpha_j \in \Delta \tag{39}$$

Como se ha indicado, en valor de los residuos es desconocido, pero si se conoce que son variables aleatorias con una distribución $f(\varepsilon) = f(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$, que sin pérdida de generalidad se puede suponer que tiene media cero. Esto hace que la distribución de la utilidad sea la misma, pero con media V en vez de cero. Por ellos se puede decir:

$$\begin{aligned} P_{ir} &= \int_{R_N} f(\varepsilon) d\varepsilon \\ R_N &= \begin{cases} \varepsilon_{jr} \leq \varepsilon_{ir} + V_{ir} - V_{jr} \\ \varepsilon_{ir} + V_{ir} \end{cases} \quad \forall \alpha_j \in \Delta \end{aligned} \tag{40}$$

En función de las distribuciones de los residuos que se elijan, se podrán obtener diferentes modelos de elección.

En el este caso se ha optado por un Logit Multinomial. En ella los residuos toman la forma de una distribución Gumble IID, donde el modelo tomará la siguiente forma:

$$P_{ir} = \frac{e^{V_{ir}}}{\sum_{\forall j \in \Delta} e^{V_{jr}}} \tag{41}$$

Con estas probabilidades se pueden obtener los flujos que emplean cada una de las alternativas de transporte. Es necesario multiplicar cada probabilidad por el flujo total de partida y así se obtendrán los flujos de cada una de las alternativas.

$$F_{\alpha,t,m,i,j} = F_{t,m,i,j} P_{\alpha,m,t,i,j} \quad (42)$$

Donde:

- $F_{\alpha,t,m,i,j}$ Flujo por alternativa para cada mercancía y periodo temporal, para cada par origen-destino.
- $F_{t,m,i,j}$ Flujo total para una mercancía y periodo temporal, para cada par origen-destino.
- $P_{\alpha,m,t,i,j}$ Probabilidad con la que cada una de las alternativas disponibles para un par origen-destino serán elegidas, para un periodo temporal y una mercancía.

El otro modelo implementado para la elección es un **modelo combinado elección de modo y ruta**. En este caso se asignarán los flujos totales mediante la minimización de la ruta en base a un coste mínimo generalizado, que puede estar formado un único atributo o por la combinación ponderada de varios atributos.

Se elegirá una variable para el cálculo del camino mínimo o se construirá una combinación de variables mediante un coste generalizado. La misma fórmula del costes generalizado se puede emplear para tener en cuenta una única variable, ya que si el coeficiente del resto es nulo y el de esa variable toma valor 1, solo esa será tenida en cuenta.

$$CG = \sum_{s=1}^n \beta_s V_s \quad (43)$$

$$R_{ij} = \min CG$$

Donde:

- CG Coste generalizado para una ruta determinada.
- β_s Coeficiente que representa la influencia de cada variable en el coste generalizado.

- V_s Cada una de las variables que pueden emplearse para la minimización.
- R_{ij} Ruta para cada par origen destino, que minimiza el coste generalizado.

4.1.4.6. Obtención de los flujos en cada tramo o nodo de la red.

En el segundo de los casos del punto anterior, la asignación a la red, es decir, la elección de ruta se hace de forma conjunta con la elección de modo. Pero cuando se trata de una elección modal de tipo discreto es necesario hacer esa selección de ruta con posterioridad al cálculo de los flujos por alternativa. Esto implica que en este punto del modelo sea necesario implementar un paso para la asignación de los flujos a la red, es decir, la ruta que seguirá cada uno de los envíos. En el modelo desarrollado se empleará un método de asignación del tipo Todo o Nada. Esto se hace porque no se considera la congestión en los tramos de red, sino en los nodos intermodales de la misma. Como se ha indicado con anterioridad, se explicará con más detalle en apartados posteriores, como se va a tener en cuenta la congestión en los nodos y como esto afecta tanto a la elección de modo como a la de ruta.

Este método es uno de los más sencillos de los aplicables y, como se ha dicho, no tiene en cuenta la congestión en los tramos de la red. No hay ninguna ponderación o peso que dirija la elección de la ruta para cada uno de los envíos.

Esta ausencia de congestión mantiene los costes generalizados de los arcos fijos. Se supone que bajo las mismas condiciones todos los viajes de un origen a un destino determinado emplearán la misma ruta. Es decir, todos optarán por una ruta y ninguna proporción optará por rutas menos atractivas.

El modelo de asignación calculará la ruta de mínimo coste generalizado y asignará al mismo el flujo correspondiente a ese envío. Después de la asignación de todas las matrices de flujo por alternativas calculadas en el paso anterior, se obtendrá el flujo total que atraviesa cada tramo y cada nodo de la red multimodal considerada.

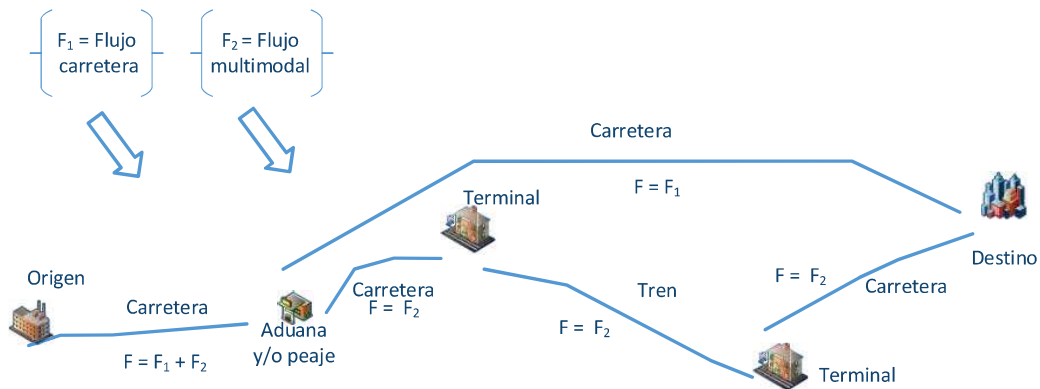


Figura 17: Asignación a la red.

Así se podría indicar como una asignación del tipo todo o nada:

$$\begin{aligned}
 CG &= \sum_{s=1}^n \beta_s V_s \\
 R_{ij} &= \min CG \\
 R_{ij} &= \{l_a, l_b, \dots, l_x\} \\
 F_{l_s} &= \sum_{y=1}^m F_{\alpha, y, t, i, j} \quad \forall \alpha, i, j
 \end{aligned} \tag{44}$$

Donde:

- CG Coste generalizado para una ruta determinada.
- β_s Coeficiente que representa la influencia de cada variable en el coste generalizado.
- V_s Cada una de las variables que pueden emplearse para la minimización.
- R_{ij} Ruta para cada par origen destino, que minimiza el coste generalizado.
- l Cada uno de los tramos que pertenecen a una ruta.
- F_{l_s} Flujo total en un tramo de la red.
- m Total de mercancías en el análisis.
- $F_{\alpha, y, t, i, j}$ Flujo de cada una de las alternativas que usan ese tramo de red.

Con esto se obtendrían los valores de los principales resultados del modelo que son los flujos en la red así como las matrices origen-destino por alternativa, costes y tiempos.

4.1.4.7.Cálculo de los retrasos en los nodos intermodales.

Como ya se ha ido apuntando en el transporte de mercancías de larga distancia, y con periodos temporales de análisis amplios, la congestión en la red no tiene en los tramos su elemento más representativo, sino en los nodos.

Los retrasos debidos a algún tipo de congestión en los tramos quedan absorbidos en el tiempo total del viaje, mientras que los retrasos en nodos intermodales, como puede ser un puerto no son desdeñables. Así un puerto muy congestionado puede aumentar los tiempos de un viaje en valores superiores a una semana. Estos retrasos si suponen un aumento importante en los tiempos y pueden influir en la forma en la que se toman las decisiones, tanto por el puerto elegido para la entrada o salida de un flujo, como de la alternativa de transporte empleada.

Estos nodos intermodales no solamente van a ser puertos, como se trata en la mayoría de los trabajos de la literatura, sino que se tendrán en cuenta el resto de nodos intermodales como son las terminales ferroviarias, u otro tipo de puerto diferente de los marítimos como son los de los ríos navegables o los puertos secos.

Lo que se ha buscado es establecer un modelo que mediante la capacidad del nodo y los flujos que intentan emplearlo, se puede obtener los tiempos de espera en los que se incurren. Para ello se ha propuesto un modelo de colas, que permitirá obtener el tiempo de espera de cada uno de los envíos y poder ver si el reparto de flujos varía en esas condiciones.

Se emplea un modelo en el que las llegadas tienen una tasa media constante. Muchas mercancías tienen la característica de estacionalidad, es decir, que su movimiento y llegada a los nodos intermodales dependen de sus momentos de producción o demanda.

Para evitar esto hay que tener muy en cuenta cómo se van a generar las matrices origen destino iniciales. De ellas provienen las llegadas a estos nodos intermodales. Los periodos temporales que se van a tener en cuenta para análisis y para la generación de estas matrices han de ser tal que recojan dicha estacionalidad.

Por ejemplo, si se trata del transporte de un producto agrícola, de carácter perecedero cuya producción se produce en los meses de enero, febrero y marzo el periodo temporal mínimo observable de ser trimestral, en el caso de que no pueda ser mensual, y un periodo ha de recoger esos tres meses. Está claro que en ese periodo habrá movimiento de esa mercancía mientras que el resto del año será residual, a no ser productos almacenables, cuyo transporte será más continuo, o caracterizado por los picos de demanda.

Se ha optado por un modelo e tipo M/G/1, que considera un solo sirviente con una tasa media de llegadas constantes e igual a λ . Se supone que tiempos de servicio son independientes para cada llegada, pero con la misma distribución de probabilidad. La distribución de dichos tiempos no está restringida a un tipo concreto. Esto es una ventaja para la modelización del tiempo de espera. Lo único necesario es conocer, o estimar, su media, $\frac{1}{\mu}$, y varianza, σ^2 .

$$\begin{aligned}
 L_q &= \frac{\lambda^2 \sigma^2 + \rho^2}{2(1 - \rho)} \\
 L &= \rho + L_q \\
 W_q &= \frac{L_q}{\lambda} \\
 W &= W_q + \frac{1}{\mu}
 \end{aligned} \tag{45}$$

Donde:

- W_q Tiempo medio de espera en cola.
- c Número medio de clientes esperando.
- W Tiempo de espera en el sistema, incluyendo el tiempo de servicio.
- L Número medio de clientes en el sistema.
- ρ Factor de utilización.

En este caso de flujos de mercancías la tasa media de llegada será el flujo de mercancía por unidad de tiempo que llega a la terminal. Para cada periodo temporal la tasa media de llegada será:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \sum_{a=1}^m \sum_{b=1}^{\alpha} F_{t,k,a,b} = F \\
 \rho &= \frac{\lambda}{Q_{k,t}}
 \end{aligned} \tag{46}$$

Donde:

$F_{t,k,a,b}$ Flujo en el nodo intermodal, para un periodo de tiempo, teniendo en cuenta todas las mercancías de análisis.

$Q_{k,t}$ Capacidad del nodo intermodal.

Mediante las siguientes transformaciones se puede expresar el tiempo de espera en el sistema como:

$$WT = \frac{F^2 \sigma^2 + \left(\frac{F}{Q}\right)^2}{F 2\left(1 - \frac{F}{C}\right)}$$

$$WT = \frac{\left(\frac{F}{Q}\right)^2 + \left(\frac{F}{Q}\right)^2 c_v^2}{F 2\left(1 - \frac{F}{Q}\right) c_v^2} = \left(\frac{1 + c_v^2}{c_v^2}\right) \frac{\left(\frac{F}{Q}\right)^2}{F 2\left(1 - \frac{F}{Q}\right)} \quad (47)$$

$$WT = e^{\beta_0} \frac{\left(\frac{F}{Q}\right)^{\beta_1}}{F^{\beta_2} \left(1 - \frac{F}{Q}\right)^{\beta_3}}$$

$$\ln(WT) = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{F}{Q}\right) - \beta_2 \ln F - \beta_3 \ln\left(1 - \frac{F}{Q}\right)$$

Sería necesario ajustar esta ecuación para el diferente tipo de nodo intermodal existente en el modelo. Con ello se podría estimar el tiempo de espera y tenerlo en cuenta en el modelo.

Este tiempo de espera hace que varíen los tiempos totales de viaje de cada par origen destino y, debido a ello, las elecciones de modo o alternativa de cada uno de estos envíos.

Para cada periodo lo que se hará es un proceso iterativo hasta que se alcance el criterio de convergencia indicado. Así se harán los cálculos de tiempos de viaje para la primera iteración con el valor inicial, y se aplicará tanto el modelo de elección discreta o en base a coste generalizado de manera que se obtenga el reparto de flujos. Con dicho reparto de flujos se calcularán los tiempos de espera y se calculará de nuevo todo el modelo. Con los nuevos flujos se hará una comprobación entre el cálculo de dos flujos sucesivos. Si la diferencia entre ambos es menor o igual que el criterio de convergencia este será el valor de reparto de flujos adoptado y se pasará a la evaluación del siguiente periodo temporal. Así queda completo el grafico del modelo completo que se muestra en la Figura 18.

4.1.5. Métodos de análisis de resultados.

En el modelo completo posee dos módulos de evaluación de resultados. El primero de ellos será un módulo de análisis económico basado en rentabilidad, y el segundo sienta las bases para el cálculo de la huella de carbono dejada por cada envío.

4.1.5.1. Modelo de evaluación económica.

Este modelo se empleará cuando se quiera evaluar la rentabilidad económica de un servicio o de una nueva infraestructura. Para ello se llevará a cabo el siguiente proceso de cálculo:

$$\begin{aligned}
 T &= C + B \\
 I &= T \times FM \\
 BAI &= I - C \\
 BDI &= (I - C) - IL \\
 CF &= BDI + A
 \end{aligned}
 \tag{48}$$

$$CF_0 + \frac{CF_1}{(1+r)^1} + \frac{CF_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{CF_{10}}{(1+r)^{10}} = 0$$

Donde:

T	Tarifa del servicio.
C	Coste del servicio.
B	Beneficio neto.
I	Ingresos.
FM	Flujo de mercancías.
BAI	Beneficio antes de impuestos.
BDI	Beneficio después de impuestos.
IL	Impuestos.
CF	Flujo de caja.
A	Amortizaciones.
r	Tasas interna de retorno

Lo que permitirá la evaluación del servicio o infraestructura es la obtención de la tasa interna de retorno, TIR.

4.1.5.2.Método de emisiones.

En cuanto a la huella de carbono lo que se hace es una primera aproximación al mismo, con el cálculo de la emisiones directas de cada una de las alternativas que se quieran evaluar.

Las emisiones de gases de efecto invernadero están muy relacionadas con el consumo de fuel del medio de transporte considerado. Así por ejemplo para el transporte marítimo hay una guía que recoge los factores de emisión llamada EMEP/CORINAIR. Esta establece, que la emisión de CO₂ de un buque depende de un factor (3173 g CO₂/kg fuel) y del consumo del mismo. Las fórmulas de consumo son lo que se implementa en el modelo de para cada tramo y cada alternativa, ya que dependen del tipo de vehículo y de la longitud del tramo indicado.

Así siguiendo con el ejemplo marítimo el consumo de fuel de un barco podría definirse como:

$$Q = 4 \times 10^8 \times \left(\frac{P}{N}\right)^2 - 0.0031 \times \frac{P}{N} + 179.69 \quad (49)$$

Donde P es potencia del buque a velocidad de crucero y N número de motores del buque. Las unidades de las emisiones así calculadas son en gr/CVh. Para la parte fluvial sería un modelo similar. Mientras que en carretera se adoptará el consumo medio del vehículo ya que es lo que ampliamente se emplea en este tipo de estudios.

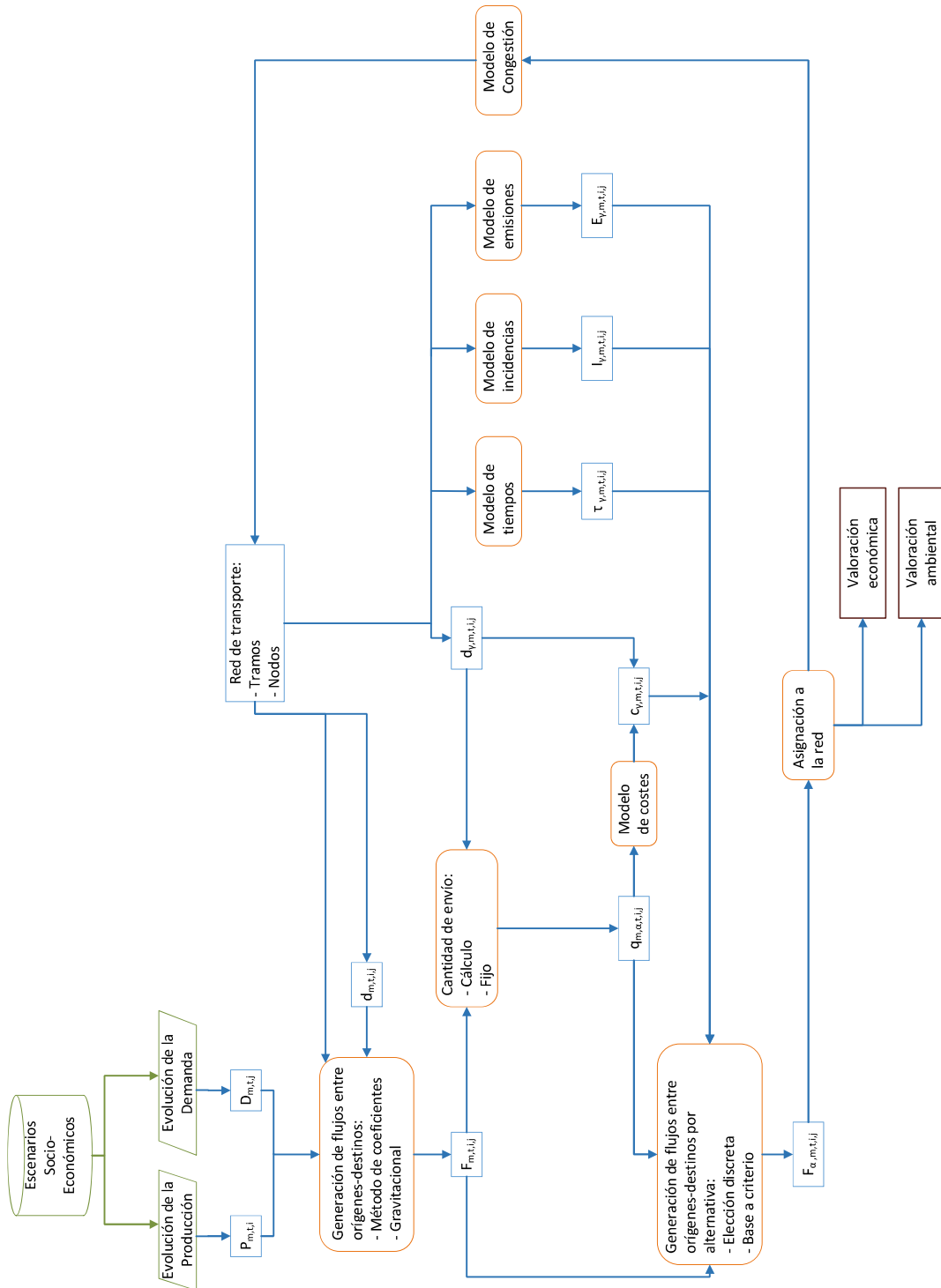


Figura 18: Modelo conceptual completo.

Desde el principio hasta la evaluación de los resultados el modelo funcionaria de la siguiente forma.

En primer lugar, como ya se indicó, es necesario tener una fuente de valores de producciones y consumos de los nodos considerados como orígenes y destino de carga. Además, como el modelo tiene fines de simulación es necesario tener una proyección a futuro de los mismos.

Los nodos origen y destino estarán clasificados en interiores y exteriores. Esta clasificación permitirá identificar que nodos son susceptibles de emplear un modelo gravitacional para convertir las producciones y consumos en viajes, y cuales por las importantes diferencias entre mercados necesitan emplear un modelo de tipo reparto por coeficientes. La aplicación del modelo gravitacional se dará entre nodos identificados como interiores, mientras que el método de coeficientes será aplicado cuando existe un par interior-exterior o exterior-interior. El caso exterior-exterior no se contempla, ya que empleará parte de la red interna, ya sea entrando por un puerto o una aduana que sería un nodo interior.

Una vez se tienen las dos matrices de flujos, tanto la debida al gravitacional como la de coeficientes, es necesario sumarlas en una única matriz. Esta matriz tendrá todos los orígenes y destinos considerados en el modelo, y para cada par se rellenará con el valor de las matrices calculadas. Con esto se obtendrían las matrices de flujo del modelo.

Un paso previo para el cálculo del modelo gravitacional es el cálculo de la matriz de impedancias del mismo. Para ello se calcula la matriz de distancias para cada mercancía y periodo. Para cada mercancía es por las limitaciones de uso de ciertas infraestructuras según el tipo de mercancía, y por tiempo por la disponibilidad de antiguas y nuevas infraestructuras.

Una vez se disponen de estas matrices es necesario dividir las en las diferentes alternativas Para ello es cuando entra en funcionamiento el método de reparto modal. Se puede elegir cualquiera de los dos pasos implementados. En el caso de elegir la opción conjunta selección de modo y de ruta, solo es necesario el obtener las rutas correspondientes al coste generalizado, mediante el módulo de cálculo de ruta de mínimo coste generalizado. En este caso ya se obtendrían las ocupaciones de la red.

Por otro lado, si se emplea un modelo de elección discreto es necesario de manera previa obtener la matriz origen-destino de las diferentes variables que forman parte de la función de utilidad. Para ello se decide cual es el camino mínimo entre origen y destino (podría emplearse otra variable de minimización de las disponibles). Se calcula tiempo, coste, emisiones, probabilidad de

incidencia y distancia de esa ruta de coste (no solo en términos monetarios) mínimo.

Estas matrices con los valores de las variables para cada par origen destino son las que alimentan a las funciones de utilidad. La función de utilidad se configurará con las variables necesarias en cada modelo implementado. Con la función de utilidad calculada para todas las alternativas, para cada par origen destino, periodo temporal, y tipo de mercancía se obtendrá la probabilidad de uso de cada alternativa. Multiplicando dichas probabilidades por los flujos totales se obtienen los flujos de cada alternativa.

Cuando se emplea el modelo de congestión, se producirá un proceso iterativo en el cual para los valores obtenidos de tiempo en los nodos intermodales con el modelo de colas, se vuelve a calcular el reparto de flujos sobre la red. Este proceso se repetirá hasta que se alcance el criterio de convergencia para cada periodo.

Estos flujos se asignaran a la red en el método de asignación. Este calculará para cada par origen destino la ruta de coste generalizado mínimo, y le asignará el flujo de ese par.

Los resultados así obtenidos son los que alimentarán al modelo de evaluación económica y dará los primeros resultados de emisiones al modelo de evaluación medioambiental.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.

El modelo ha sido definido de manera que pueda ser implementado en cualquier herramienta informática.

En particular para los casos de estudio el modelo ha sido implementado de dos formas diferentes. La primera de ellas es empleando un software comercial de planificación de transporte, TransCAD. Esta herramienta tiene un lenguaje de programación propio, denominado TransCAD, que permitió programar cada uno de los pasos del modelo que iban a ser empleados en la evaluación.

Así para los casos de Bolivia y Brasil, que se explicarán a continuación, se empleó esta herramienta. En el primero de los casos se desarrolló una interfaz donde se configuraban los experimentos, cuyos resultados procedían de la aplicación de un modelo de generación, distribución (gravitacional y por coeficientes), reparto modal mediante un modelo logit y una asignación toda o nada a la red.

En la interfaz se podía configurar si el modelo de generación se aplicaba o si se tomaban matrices O/D procedentes de otros estudios. También permitía la selección de la red sobre la que se iba a hacer el análisis, ya que se podía elegir el momento en el que ciertas infraestructuras comenzaban a funcionar.

El esquema general de funcionamiento implementado en este caso sería:

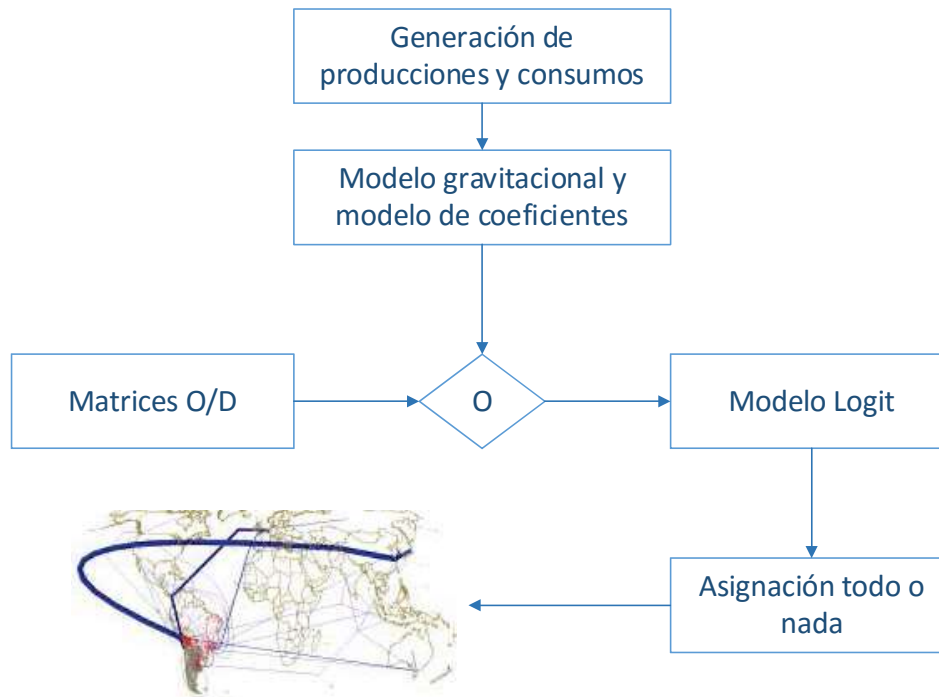


Figura 19: Implementación del modelo para el caso de Bolivia.

Para el caso de Brasil se empleó de nuevo TransCAD, pero en este caso en vez de los pasos de reparto modal y asignación se optó por el método de selección conjunta de modo y ruta, mediante la minimización del coste generalizado, cuyas variables son tiempo y coste, como se refleja en la Figura 20.

Además, durante la realización de la presente tesis se ha ido avanzando en el desarrollo de una aplicación JAVA en la que se han ido implementando las diferentes etapas del modelo conceptual. Se ha desarrollado de manera que sea totalmente configurable, decidiendo en cada análisis los pasos del modelo que se quieren tener en cuenta, y la información que entra al mismo. El esquema del mismo sigue una estructura similar a la mostrada en la Figura 18.

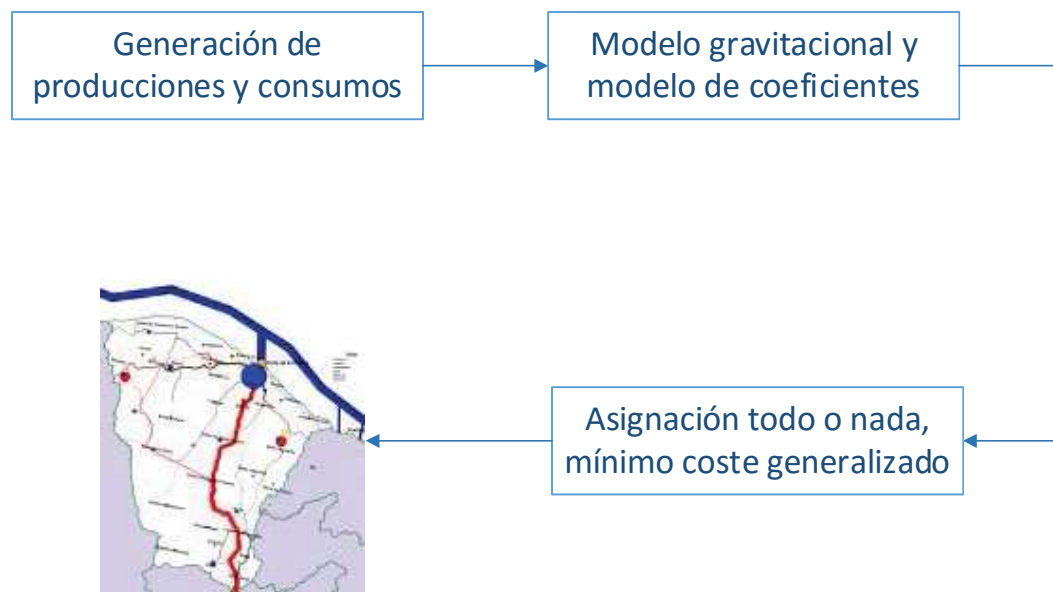


Figura 20: Implementación del modelo para el caso de Brasil.

CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO

Para comprobar la utilidad del modelo se presentará a continuación la aplicación del mismo a dos casos de estudio. Los dos son casos de aplicación reales, en los cuales se ha colaborado con empresas para desarrollar un modelo de transporte. Estos dos casos han permitido comprobar el funcionamiento del modelo tanto para la evaluación y diseño de una infraestructura (caso de Bolivia) como para el establecimiento de una política de inversiones en tema de transportes (priorización de proyectos en Brasil).

Con estos casos se quiere demostrar la utilidad del modelo propuesto, ya que estos casos, además de ser casos reales, validados por expertos de relevancia internacional, representan dos ejemplos diferentes de los usos del mismo. Como se ha indicado, en el primer caso se hace una evaluación de una nueva infraestructura, y el segundo es una priorización de inversiones en proyectos de infraestructuras. En este último caso, se empleará una matriz multicriterio para esa priorización. Los resultados que se obtienen con la experimentación con el modelo, formarán parte de las variables que se contemplan en dicha matriz, de toma de decisiones.

Para relacionar el modelo conceptual con el caso a evaluar, se irán identificando cada uno de los pasos empleados, los datos que maneja y los resultados que se obtuvieron.

5.1. CASO DE BOLIVIA: COREDOR FERROVIARIO BIOCEANICO CENTRAL.

5.1.1. Descripción del proyecto.

En este apartado se va a presentar el modelo llevado a cabo para la evaluación de un nuevo corredor ferroviario en América del sur que conectará la zona pacífica con la atlántica a través de Bolivia. El uso del modelo se enmarca en el Estudio de Prospectiva Comercial, Mercado y Alternativas Logísticas del Corredor Ferroviario Bioceánico Central (CFBC). Se trata de un proyecto del Gobierno Plurinacional de Bolivia financiado por el Banco Interamericano de

Desarrollo. Los trabajos desarrollados son de utilidad para el Viceministerio de Transporte de Bolivia.

A pesar de ser promovido por un único país, Bolivia, el ámbito del mismo es multinacional, ya que se intenta unir las costas del Pacífico y Atlántico, mediante un corredor ferroviario. Se tratan de 4000 km de ferrocarril donde se tendrán que desarrollar nuevos tramos y mejorar algunos de los existentes. Lo que busca es fomentar el desarrollo regional y un efecto integrador, además del intercambio comercial, principalmente entre Bolivia, Perú y Brasil. La nueva construcción se da en la parte central de Bolivia, ya que debido a su orografía la red existente está dividida en dos partes no conectadas, lo que hace que se pierda la conectividad entre ambas costas.



Figura 21: Propuesta de CFBC.

El modelo se empleó para la evaluación de esta infraestructura, es decir, para establecer bajo qué condiciones este corredor va a ser capaz de captar un tráfico de mercancías y pasajeros tal, que haga que sea viable y rentable. Además, permitió el dimensionamiento del mismo, capacidades, vehículos, etc., para alcanzar los objetivos de viabilidad y rentabilidad.

El modelo desarrollado se empleó para dar forma al sistema existente y futuro y plantear los diferentes escenarios de simulación que proporcionaron los valores necesarios para los posteriores análisis. Así a continuación, a partir del modelo conceptual definido con anterioridad, se explicará cada una de etapas tenidas en cuenta y como se han llevado a cabo.

Para la implementación del modelo se empleó la herramienta TransCAD. Este software integra un SIG junto a capacidades de modelización de transporte. Cuenta con un lenguaje propio denominado GISDK en el que se ha desarrollado el modelo para su ejecución iterativa, para diferentes periodos de tiempo y diferentes mercancías.

La flexibilidad del modelo permite el establecimiento de tres niveles geográficos de análisis relacionados entre sí: mundial, nacional y regional.

Tomando el esquema general, explicado en el modelo conceptual, la Figura 22 representa los pasos que se llevaron a cabo en la creación del modelo del CFBC.

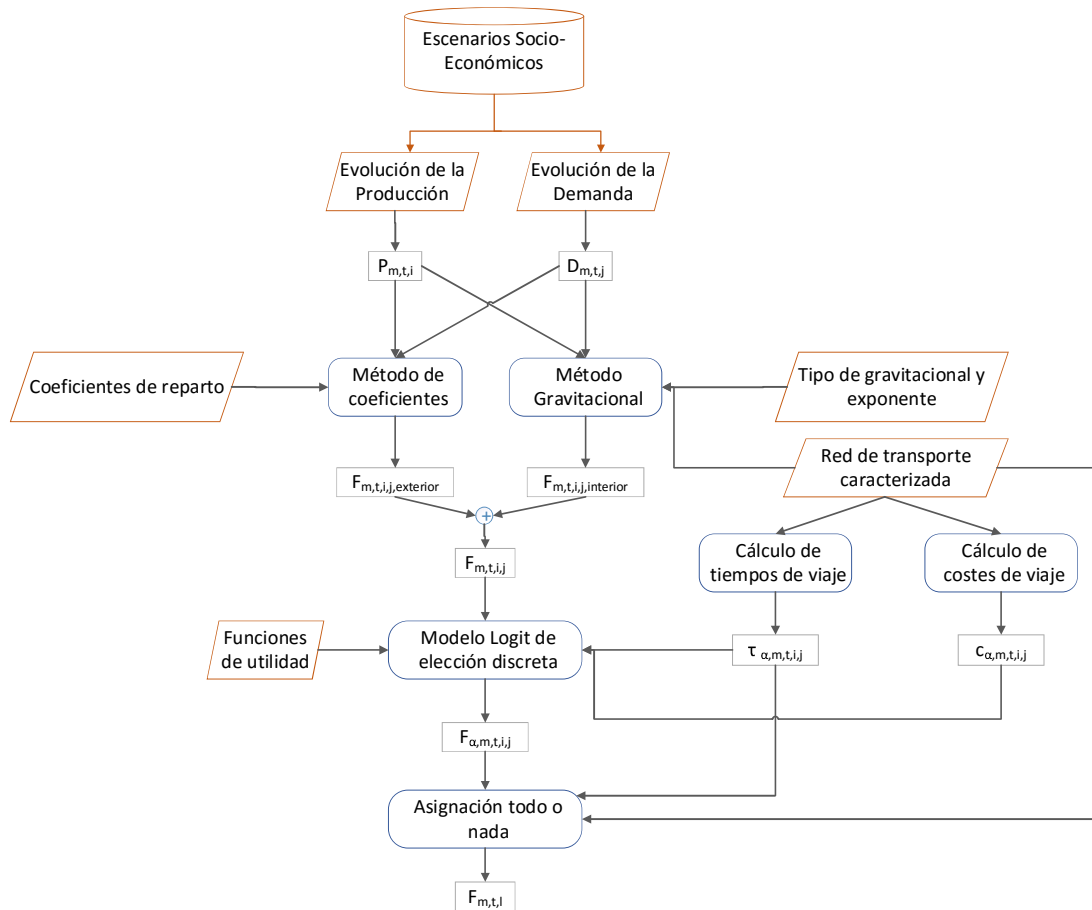


Figura 22: Modelo de transporte de CFBC.

El funcionamiento general del modelo comienza con el establecimiento de los escenarios socioeconómicos que se plantean para el futuro. Una vez obtenidos estos se adopta el primer paso del modelo conceptual, el cual con estos escenarios socioeconómicos calcula las proyecciones de producciones y demandas de las TAZs elegidas en el modelo. Tras esto, y al existir dos niveles principales de transporte (corta o larga distancia), se emplean los dos métodos desarrollados para el paso de distribución de carga, tanto el basado en coeficientes de reparto como el gravitacional. El resultado de ambos se une en una única matriz de flujos entre orígenes y destinos.

El siguiente paso del modelo conceptual empleado es el de elección modal. En este caso se optó por un modelo de elección discreta. Su configuración se explicará con más detalle en los apartados posteriores. Como era necesario conocer el movimiento de mercancía en cada tramo de la red, tanto para la evaluación económica como para el diseño del ferrocarril, fue necesario emplear también el paso de asignación a la red. El modelo empleado fue un “Todo o nada”, con minimización de tiempo de viaje.

Con todo ello se obtuvo:

- El porcentaje de toneladas que emplean cada alternativa por mercancía.
- El porcentaje de toneladas que emplean cada alternativa por el total de mercancías.
- Las toneladas movidas para una mercancía en cada tramo de la red.
- Las toneladas movidas para el total de mercancías en cada tramo de la red.
- Los tiempos de viaje para cada par origen destino.
- Los costes de viaje para cada par origen destino.

Estos elementos se obtuvieron para todos los escenarios que fueron configurados, siguiendo las indicaciones de los diferentes socios del proyecto.

5.1.2. Datos de entrada al modelo.

Como se indicó en la descripción del modelo hay un conjunto de datos que son necesarios para llevar a cabo tanto su configuración como sus diferentes pasos o etapas.

El primero de los elementos necesarios para llevar a cabo la modelización es la red de transporte. En este caso se han considerado los modos de transporte carretera, ferrocarril, mar e hidrovía. Para ello se han empleado las carreteras principales o fundamentales de Sudamérica, los tramos de vía ferroviaria en funcionamiento junto a las que se van a desarrollar para el futuro, los tramos navegables de la hidrovía Paraná-Paraguay y las conexiones marítimas desde los puertos del modelo hacia los países de importación y exportación de mercancías. No se ha considerado el transporte aéreo porque no está reservado para grandes volúmenes, sino para pequeñas cantidades de producto con alto valor añadido. Los tramos que todavía no existen, pero sí lo van a hacer en el futuro, solo se consideran en la red a partir del año en el que se estima que entren en funcionamiento.

Los diferentes modos están representados por tramos de red, mediante un atributo que indica el tipo de modo que puede utilizar ese tramo, y conectados entre sí, mediante nodos intermodales, en los puntos en los que lo están en la realidad. Están caracterizados por su longitud real, la velocidad de tramo y los precios kilométricos por tonelada para cada tipo de mercancía considerada. Todos estos valores dependen del tipo de modo que emplea ese tramo. Cada uno de ellos lleva aparejado el periodo de análisis en el que entra en funcionamiento, permitiendo que la red que se emplea al inicio del análisis no sea la misma que en periodos posteriores. De la misma forma los valores que se ha indicado que caracterizan cada uno de los tramos van variando en los diferentes periodos de análisis. Los tramos incluidos en el modelo son:

- Carreteras principales de Bolivia y países vecinos. En gris en la Figura 23.
- Red de ferrocarril de Bolivia y países vecinos. En marrón en la Figura 23, el CFBC en rojo.
- Hidrovía Paraguay-Paraná. En azul oscuro en la Figura 23.
- Rutas principales marítimas, partiendo de los puestos más representativos en la región. En azul claro en la Figura 23.

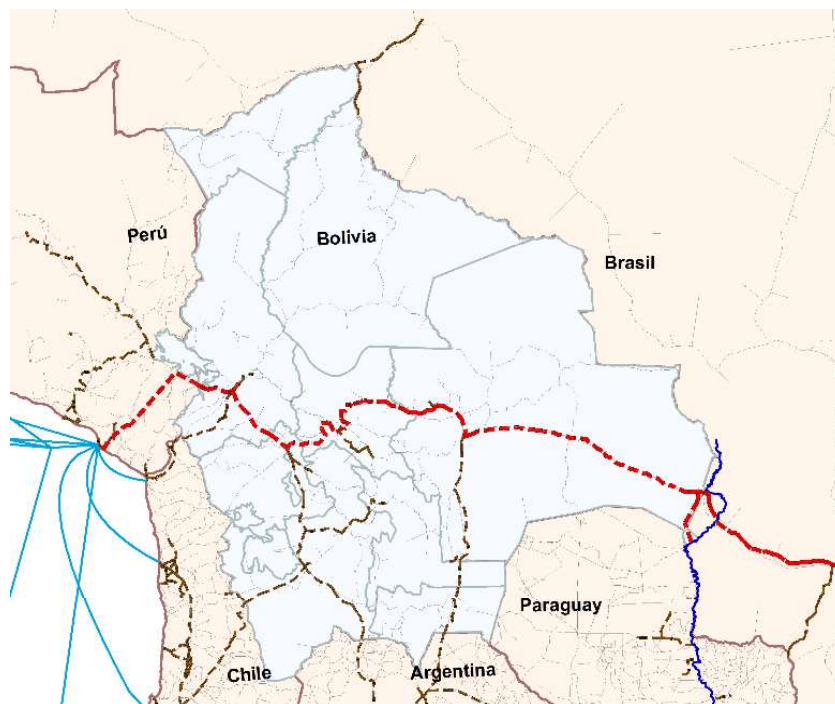


Figura 23: Red completa del modelo, detalle de Bolivia.

De la Figura 24 a la Figura 26 se muestran las infraestructuras existentes en Bolivia y los países vecinos. En primer lugar se muestran la red de carretera fundamental con los corredores principales de la misma. La Figura 25 representa la red ferroviaria, tanto de Bolivia como sus conexiones con los países limítrofes. En esa imagen se puede ver de forma clara la desconexión ferroviaria existente en el centro del país. Por último, se muestra el trazado de la hidrovía, desde sus puertos de acceso en Bolivia hasta la salida al mar, entre los países de Argentina y Uruguay.

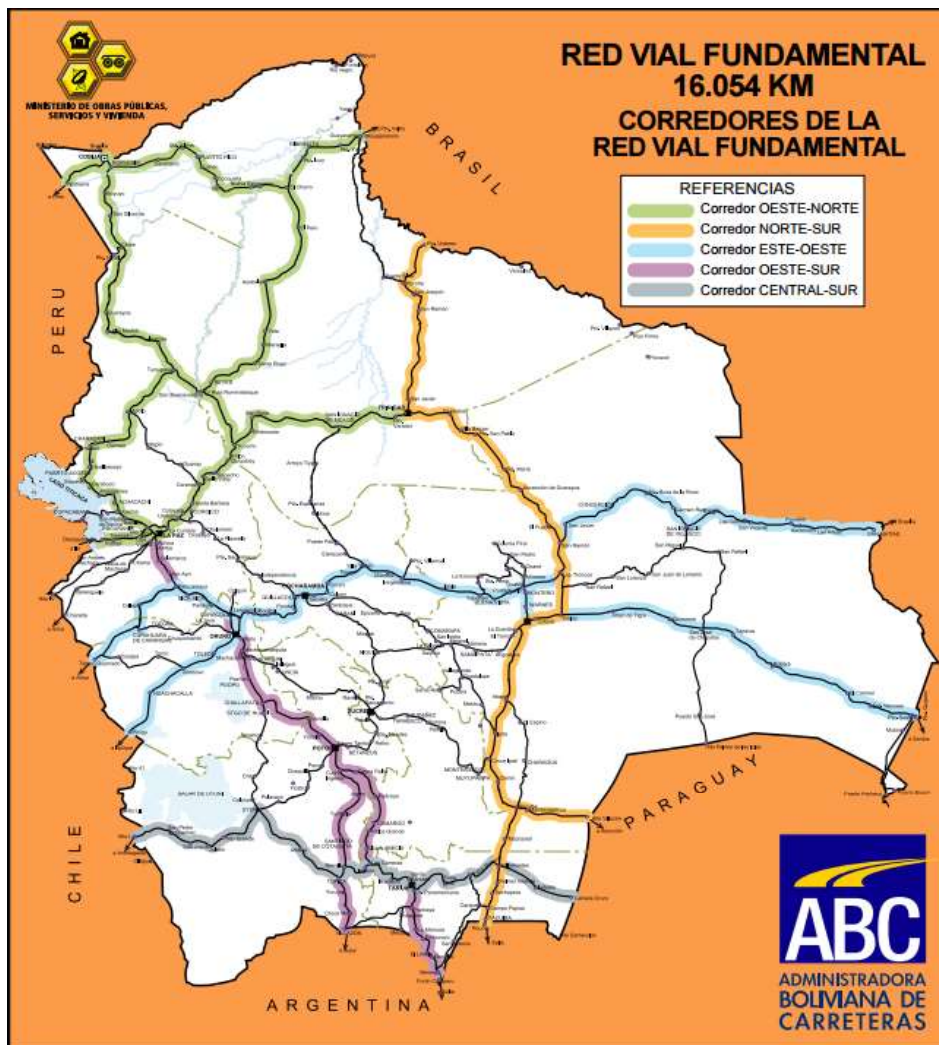


Figura 24: Red fundamental de carreteras de Bolivia (Fuente: Administradora Boliviana de carreteras).

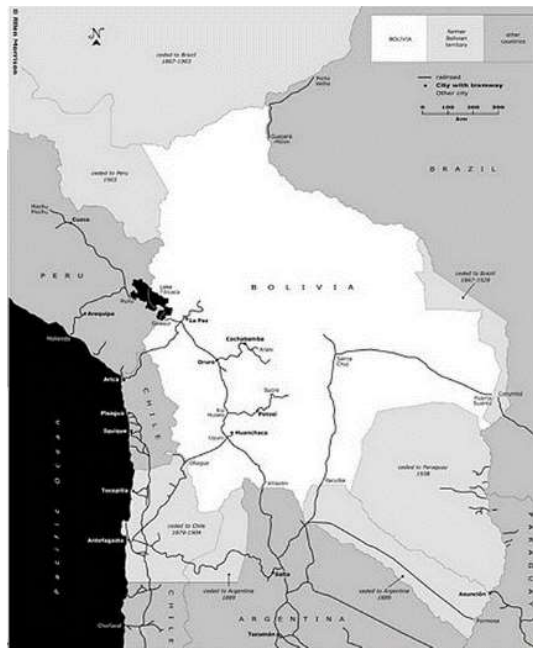


Figura 25: Red de ferrocarriles boliviana y sus conexiones con los países limítrofes. De Allen Morrison en Ferropedia publicado bajo los términos de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 3.0 Unported.



Figura 26: Trazado de la hidrovía Paraguay-Paraná (Fuente: <http://www.alai-net.org/es/active/81181>)

Por otra parte las redes no están formadas únicamente por tramos sino que, como se indicó en la definición del modelo, estos tramos están unidos en nodos. Dentro de ese conjunto de nodos es necesario extraer e identificar aquellos que van a tener especial relevancia dentro del análisis. Los primeros en ser tenidos en cuenta son los nodos que representan los orígenes y destinos de los movimientos, es decir las TAZs de análisis. En este caso se han tenido en cuenta dos niveles de TAZs, las interiores y las exteriores. Las interiores son las pertenecientes a Bolivia, ya que es el ámbito del estudio y donde se van a producir movimientos interregionales de mercancías. El nivel de detalle elegido son los departamentos del país. Por otro lado, hay unas TAZs externas, que son los países que rodean a Bolivia, con los que se producirán intercambios comerciales, así como otros países más lejanos, incluso con separación oceánica con los que el país tiene o espera tener relaciones comerciales (exportaciones e importaciones de diferentes productos). Las áreas que se han tenido en cuenta para el establecimiento de las TAZs son:

- Nivel internacional: Países con los que existen o se planea que existan relaciones internacionales y que se encuentran fuera del ámbito de Sudamérica.
- Nivel nacional: Países en el entorno de Bolivia, sin necesidad de transporte marítimo para el funcionamiento de sus relaciones mercantiles. Puntos que por sus características de producción o consumo son susceptibles de ser una TAZ independiente, como puede ser una mina.
- Nivel regional: Dentro del país, las regiones que lo forman.

Otro grupo de nodos que se han tenido en cuenta en el modelo son los nodos intermodales. Estos se agrupan en tres grupos: las terminales ferroviarias, los puertos interiores y los puertos marítimos. Algunos de ellos no se emplean desde el inicio, sino que se identifica en qué periodo comienzan a estar disponibles. Estos nodos están caracterizados por los tiempos perdidos en los mismos así como el coste que tiene para cada tipo de mercancía el emplearlo dentro de su ruta. Los costes dependen del tipo de mercancía que lo va a emplear. Otro de los nodos especiales que se han definido en el modelo conceptual son las aduanas. En este caso se han tenido en cuenta, ya que se han identificado como un elemento importante de introducción de demoras en el transporte por carretera. Según los colaboradores expertos, se ha indicado que pueden incurrirse en demoras de hasta 15 días en aduanas. En todos los casos los valores futuros se variarán en los diferentes análisis que se quieran llevar a cabo.

Con esto se tendría identificada toda la red, tanto tramos como nodos, y las variables principales que se han usado en el análisis. El modelo completo se muestra en la Figura 27.

Una vez se definieron dichos puntos de origen y destino se calcularon las producciones y consumos de esos puntos, así como la estimación del modelo de elección modal. Tanto la producción como el consumo, depende de las variables socioeconómicas del país. Por ello fue necesario el análisis de dichas variables socioeconómicas (producto interior bruto, tasas de crecimiento poblacional, etc.), e identificar como dichas variables tanto a las producciones como a la demanda. De esta manera estableciendo la evolución temporal de dichas variables, se puede estimar la evolución de producciones y consumos a lo largo del tiempo. Se obtuvieron también los valores de costes unitarios por mercancías y la caracterización de velocidades y tiempos de descanso de los diferentes modos de transporte.

Para llevar a cabo la configuración completa del modelo fue necesario emplear un conjunto de fuentes de información diversas, que reportasen información no solo de la red, sino para la caracterización y definición de las variables necesarias en el resto de pasos del modelo. Así las fuentes fundamentales que se manejaron fueron:

- Bases de datos del Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE).
- Encuestas realizadas in situ.
- Informes sectoriales.
- Proyecciones económicas de la OCDE y otros organismos internacionales.
- SIG con elementos de transporte para Bolivia y países limítrofes.

De forma específica los datos en los datos que han podido ser recopilados, y que van a ser utilizados en los pasos del modelo son los siguientes:

- Las producciones agrícolas, la superficie cultivada y la productividad del terreno desde 1990 hasta 2011, procedentes del INE.
- Producciones mineras en el mismo periodo, también del INE.
- Exportaciones e importaciones, procedentes del INE, para el periodo 2003-2012. Lo importante de estos valores es que además de su valor y volumen, se indica origen y destino, así como modo de transporte y tipo de carga. Se establecerán los valores desde los países del área de influencia del corredor y el resto del mundo
- Del INE también se obtienen valores como los índices de volumen físico de producción y cantidad de transporte. Son útiles para aquellos productos donde no se dispone de históricos de producción y que a pesar de ello entran en el análisis, y es necesario establecer sus proyecciones a futuro.
- Producciones y consumos de los productos generales. Basado en informes sectoriales, entrevistas con los productores y variables socioeconómicas.

- Las estimaciones de capacidades futuras se han establecido mediante entrevistas. También se han establecido las reservas minerales existentes y las extensiones agrícolas.

Con todos estos elementos se pudo caracterizar la red y disponer de los datos necesarios para la construcción de los modelos econométricos de producción, consumo, exportación e importación. También con ello se dispuso de la información necesaria para calibrar el modelo gravitacional y las funciones de utilidad del modelo de elección discreta.

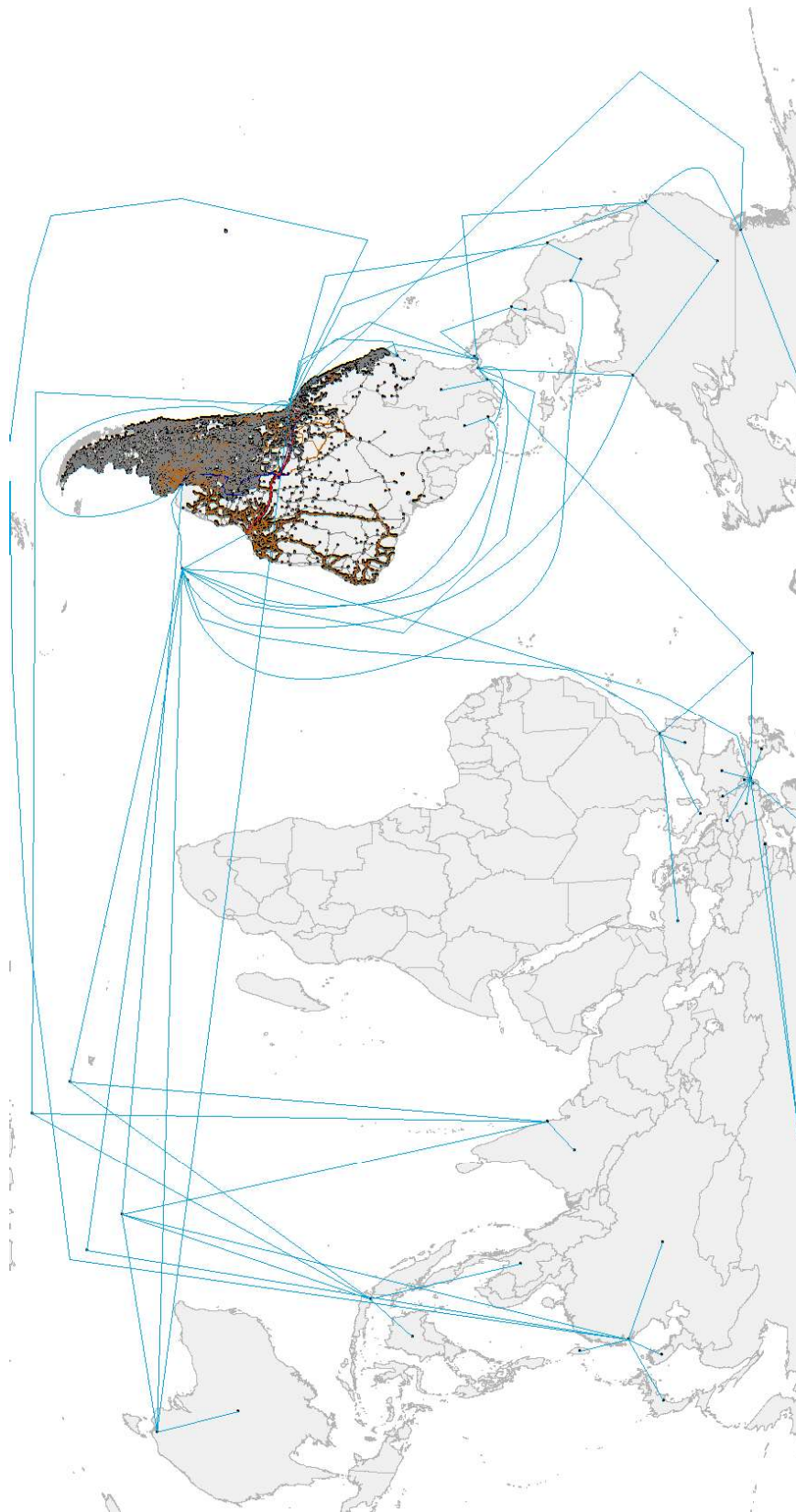


Figura 27: Modelo completo de transporte para la evaluación de corredor ferroviario.

5.1.3. Generación de carga y distribución.

Para el establecimiento de las mercancías que fue necesario tener en cuenta, se realizó un estudio prospectivo de mercancías. La carga considerada es aquella que por su situación es susceptible de entrar en el área de influencia del corredor, elemento objetivo del análisis. Como se ha indicado para la selección de los nodos de interés del modelo fue necesario la identificación de puntos de producción y consumo. No todos los productos tienen los mismos polos de generación y consumo, por lo tanto, para cada mercancía se estableció la localización de dichos polos.

Para ello se diferenció dos grupos principales de productos, los básicos y el resto de productos. Los primeros son productos de consumo general, en los que hay gran influencia en su consumo con las variaciones poblacionales. Mediante las estimaciones realizadas de crecimiento poblacional se generaron los coeficientes de reparto de consumo entre los diferentes nodos principales dentro del país. El consumo a ser repartido será el valor total debido a producción e importación menos la mercancía que sale del país en forma de exportaciones. Esto ha permitido establecer la evolución que se espera en las necesidades de consumo. Este tipo de metodología se ha empleado para todos los productos, excepto aquellos que son exclusivos para exportación, y los productos de importación.

Los productos que no entran en la categoría anterior han sido modelados mediante metodología particular dependiendo de las características de cada una de las producciones consideradas. Para elementos como los mineros, petrolíferos, etc., se han empleado las informaciones de explotación presente y futura que manejan gobiernos, empresas explotadoras o asociaciones pertinentes. También se han tenido en cuenta otro tipo de factores, como puede ser las mejoras en las producciones agrarias, aumentándose los rendimientos y las cantidades obtenidas por unidad de superficie cultivada. La confidencialidad del proyecto impide el que en este momento se recoja en la presente tesis los valores obtenidos.

Dependiendo de que se traten de productos específicos, donde su evolución depende mucho del sector, o productos generales, que depende más de la evolución de la economía, se emplearán diferentes modelos de estimación.

Para la obtención de los valores de producción y atracción de carga se emplearán modelos de regresión, regresión logística y series temporales. Hay un conjunto de variables que pueden hacer que los flujos captados por el CFBC varíen según los valores que tomen y que serán de interés para el establecimiento de los escenarios de análisis. Por consiguiente, la estructura del modelo

calibrado partirá de dichas variables. También se incluirán aquellas variables que caracterizan el entorno o las producciones. Las variables principales de las que se parte son las siguientes:

- Variables socioeconómicas: Proyecciones del PIB para los principales países de exportación e importación, y proyecciones de población de Bolivia.
- Variables de coste: Precios de importación y exportación. El análisis permitirá establecer cómo los cambios en los flujos y en los costes, debidos a la implantación del CFBC pueden, a su vez, provocar cambios en estos precios.
- Variables agrícolas: El rendimiento agrícola es un elemento que condiciona la evolución temporal de las producciones agrícolas.

De manera particular se estableció para cada gran grupo de mercancías un modelo econométrico que permitió obtener los valores de futuro para los análisis. En el caso de las mercancías agrícolas, la producción depende de tres elementos fundamentales, los cuales tendrán su propio modelo de producción. Estos son: la superficie cultivada, el porcentaje de superficie para cada mercancía y el rendimiento agrícola. Los modelos de previsión de ambos elementos permitirán establecer los valores futuros de las producciones agrícolas de cada uno de los cultivos considerados.

Por otro lado, es necesario la obtención de los valores de consumo. Este consumo, en función de los datos disponibles, se puede definir como lo producido más lo importado menos lo que no se consume en el país, que es lo que se exporta. Estos valores permitieron establecer un modelo de previsión en función de las variables socioeconómicas. Este modelo se recoge en la Figura 28.

Con esto lo que se obtiene son tanto los valores de producciones y consumo $(P_{i,t,k}, C_{j,t,k})$, para todas las mercancías que se van a tener en cuenta en el proyecto, así como sus proyecciones a futuro, para todos los nodos origen y destino considerados. Con esto se completa el primer paso del modelo, el de generación de las producciones y consumos, y con ello la entrada de datos principal del modelo junto con la red de transporte caracterizada.

Ambos elementos son las entradas necesarias al paso del modelo en el que se generan las matrices origen-destino. En este caso fue necesario el empleo de los dos métodos implementados, tanto el de reparto proporcional como el gravitacional.

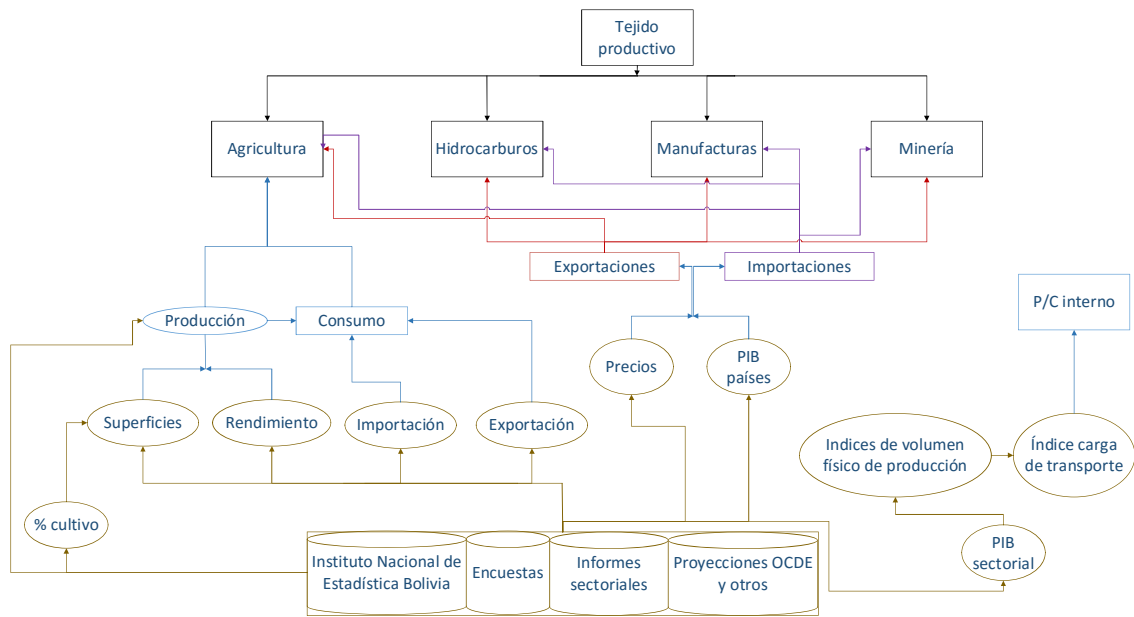


Figura 28: Generación de los modelos econométricos.

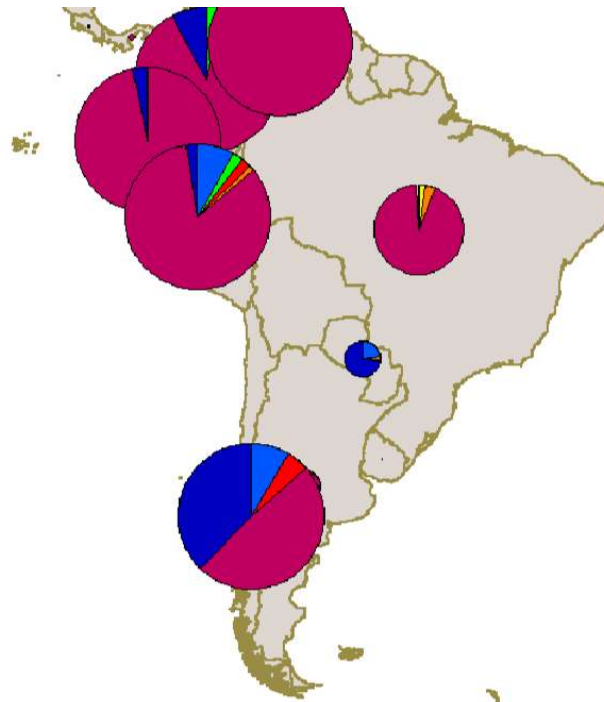


Figura 29: Representación de producciones de diferentes mercancías.

Para el caso de coeficientes de proporcionalidad lo que se ha hecho es lo siguiente:

- Identificación de los países con los que existe comercio internacional.

- Establecimiento de dos tipos de coeficiente de reparto, de exportaciones e importaciones, para todos los países del modelo y para los departamentos de Bolivia.
- Valor de las importaciones y exportaciones totales, por cada mercancía y período temporal, es decir con sus proyecciones.
- Para cada par origen destino, el flujo correspondiente se obtiene teniendo en cuenta a qué grupo pertenece el origen y el destino (país o departamento). Cuando el origen es un país, lo que se establece es un flujo de importación, y el destino será uno de los departamentos. Ese flujo se obtendrá como:

$$F_{i,j,t,m} = cip_i \times cid_j \times imp_{m,t} \quad (50)$$

Donde:

- $F_{i,j,t,m}$ Flujo entre pares origen destino por mercancía y periodo temporal.
 cip_i Coeficiente de reparto de importaciones por país.
 cid_i Coeficiente de reparto de importaciones por departamento.
 $imp_{m,t}$ Valor de las importaciones de una mercancía para un periodo determinado.
 i Índice de TAZ de origen.
 j Índice de TAZ de destino.
 m Índice de tipo de mercancía.
 t Índice de periodo temporal.

Si el origen es el departamento, el destino será un país al que se exporta mercancía. El valor de ese flujo:

$$F_{i,j,t,m} = cep_i \times ced_j \times exp_{m,t} \quad (51)$$

Donde:

- $F_{i,j,t,m}$ Flujo entre pares origen destino por mercancía y periodo temporal.
 cip_i Coeficiente de reparto de importaciones por país.
 cid_i Coeficiente de reparto de importaciones por departamento.

$exp_{m,t}$ Valor de las exportaciones de una mercancía para un periodo determinado.

Los índices i, j, m y t , representan lo mismo que en el caso anterior.



Figura 30: Departamentos de Bolivia.

Por otro lado, queda el reparto dentro del país, donde las características y reglas comerciales se comportan de una manera más homogénea que cuando se trata del movimiento de mercancías entre diferentes países y economías como es el caso de las exportaciones e importaciones. Para el reparto entre los diferentes departamentos del país se estimaron las producciones y consumos de cada mercancía para cada periodo temporal en cada uno de los departamentos.

Mediante un modelo gravitacional de tipo potencial, donde la matriz de impedancias es la distancia entre pares origen destino se obtendrán los flujos dentro del país debido al comercio interno.

$$F_{i,j,t,m} = A_{i,t,m} \times B_{j,t,m} \times P_{i,t,m} \times C_{j,t,m} \times d_{i,j,t,m}^{-n} \quad (52)$$

Donde:

$F_{i,j,t,m}$	Flujo entre pares origen destino por mercancía y periodo temporal, para el interior del país.
$A_{i,t,m}, B_{j,t,m}$	Coefficientes del modelo gravitacional.
$P_{i,t,m}$	Producción en el nodo de origen, por periodo temporal y mercancía.
$C_{j,t,m}$	Consumo en el nodo de destino, por periodo temporal y mercancía.
$d_{i,j,t,m}$	Distancia entre pares origen-destino, para cada mercancía y periodo temporal.
n	Exponente de la matriz de impedancia del modelo gravitacional.
i	Índice de TAZ de origen.
j	Índice de TAZ de destino.
m	Índice de tipo de mercancía.
t	Índice de periodo temporal.

La matriz final de flujos para análisis será la construida poniendo en la misma matriz los valores obtenidos mediante el modelo de coeficientes y los del modelo gravitacional. Con esto quedaría cubierto el modelo de generación de flujos entre pares origen destino del modelo. Se obtuvieron tantos grupos de matrices como mercancías se tuvieron en cuenta en el análisis. Cada uno de estos grupos está formado por el número de periodos de análisis. El periodo de evaluación va hasta 2055. La evaluación de los primeros periodos es anual, pasando a ser quinquenal a partir de 2020. Esto se hizo por la necesidad de apurar los análisis, viéndose que no representaba una mejora significativa el simular todos los años del periodo a emplear periodos superiores.

5.1.4. Reparto modal.

El siguiente componente del modelo conceptual que se empleó fue el de reparto modal. En este caso se empleó un modelo de elección discreta, en particular un sistema conjunto de Modelos logit multinomiales, en los cuales las variables de elección eran el tiempo, el coste o ambas, según fuesen representativas para cada uno de los casos.

El primer paso de la calibración del modelo de elección consiste en identificar el conjunto de alternativas que se tuvieron en cuenta en el estudio. Estas

alternativas dependen de la distancia geográfica, que es necesario cubrir. Así, para el movimiento interregional dentro de Bolivia o con los países vecinos, los modos relevantes serán la carretera y el ferrocarril. Sin embargo, cuando se trata de los movimientos de importación y exportación, se hace necesaria la salida marítima, dentro de la cual se consideró también el uso de la hidrovía Paraguay-Paraná, con su salida hacia otros países por medio del océano a través del puerto de Buenos Aires.

El caso más completo para el movimiento de mercancías es el de importaciones y exportaciones. Por ello es el que permite establecer las alternativas de transporte que se consideraron.

Estos dos tipos de transporte, interregional e internacional, llevaron a la diferenciación de las TAZs en dos grupos principales, los que están próximos a Bolivia y aquellos que no lo son, los cuales serán considerados como "TAZs lejanas". Esto no solo permitió la definición de las alternativas de transporte existentes sino que también permitió diferenciar la manera en que se comporta la elección para los dos tipos de transporte, el de corta o el de larga distancia.

Como se ha comentado, en Bolivia se han contemplado cuatro modos de transporte: carretera, ferrocarril, hidrovía y mar. Como es usual, el modo principal de transporte de mercancías es la carretera. Este será el modo base frente al cual el resto tienen que resultar competitivos. Una de las alternativas de llegada a puerto y de movimiento dentro del continente sudamericano será una cadena de transporte formada exclusivamente por tramos de carretera. En este caso, para los flujos de importación y exportación, el tramo marítimo hasta el puerto exterior completará la cadena de transporte. Los puertos considerados en el modelo son Arica, Ilo, Iquique, Antofagasta, Buenos Aires y Santos para el transporte marítimo, y Puerto Busch y Puerto Suarez para la hidrovía.

La otra opción que existe dentro de territorio boliviano es el empleo del ferrocarril tanto para la llegada a puerto como para el movimiento interior. Al contrario que la red de carreteras, la red de ferrocarril no tiene llegada a todos los puntos de la red. Hay nodos muy difíciles de llegar a ellos: en caso de tener acceso por algún medio de transporte será por carretera. Por consiguiente la alternativa de ferrocarril para llegar a los puertos tiene que combinarse con la opción de carretera, por lo que la segunda alternativa estará formada por carretera y ferrocarril.

Con todo ello se establecerán las siguientes opciones:

- Para el transporte de corta distancia, es decir dentro de Bolivia o con los países vecinos, solo se consideran dos opciones, solo carretera o multimodal carretera-ferrocarril.

- Para el transporte de larga distancia se establecen dos criterios para agrupar las alternativas disponibles. El primero de ellos es el conjunto de alternativas relacionadas con el puerto de importación/exportación. Como se indicó con anterioridad, en el modelo se consideran un conjunto de 8 puertos, tanto de la fachada atlántica como de la pacífica. La elección del puerto de entrada o salida, va a estar condicionada por las instalaciones del puerto y sus conexiones con su hinterland. Dicha elección también determina la ruta marítima seguida por el envío.
- El segundo de los criterios para la larga distancia está relacionado con el medio de transporte seguido para llegar a puerto. En este caso se mantienen las dos alternativas existentes, junto sus combinaciones con la hidrovía, dando lugar así a un conjunto de cuatro alternativas posibles.

Así, para la larga distancia, el modelo de elección recoge una elección conjunta de puerto y modo de transporte para llegar a puerto. Esto hace que la construcción completa de la cadena multimodal con el tramo marítimo dependa del puerto elegido. La hidrovía se toma como si fuese un tramo marítimo ya que tiene puertos de entrada y salida, además de acceso terrestre a los mismos.

Se consideran seis puertos marítimos y dos fluviales y el movimiento interior sin necesidad de salida a puerto. Las mercancías del análisis se agruparon en cuatro grupos: contenedorizado (principalmente productos manufacturados), gráneles sucios (principalmente minerales), gráneles limpios (soja principalmente) y gráneles líquidos (fueles de manera principal), dan lugar a cuatro grupos de mercancías diferentes, dentro de los cuales estarán englobadas todas las mercancías del estudio.

Esto llevó a que si se tenían en cuenta todas las opciones de puerto y los modos de llegadas a los mismos, el número de alternativas posibles era muy alto. En la práctica se desecharon algunas alternativas por su inviabilidad o falta de uso. Aunque la hidrovía es un medio de transporte que compite con carretera y ferrocarril para algunas mercancías, el único puerto disponible es Buenos Aires, así que otros serán descartados. La hidrovía no se debe tener en cuenta como alternativa de llegada al puerto de Buenos Aires, y como vía de salida a través del puerto fluvial, si no, se tendría en cuenta dos veces. Por lo tanto, será tomada como una alternativa de puerto más. Es importante considerar que no todas las alternativas de transporte son válidas para todas las mercancías. Todas estas restricciones fueron tenidas en cuenta para definir el conjunto final de alternativas del modelo. En la Tabla 15 se puede ver el conjunto final.

La opción multimodal de Ilo no está disponible en la actualidad, pero es uno de los desarrollos futuros que contempla el CFBC y ha de ser tenido en cuenta.

Tabla 15: Alternativas disponibles en el modelo.

Alternativas			
Puerto	Modo	Granel	Contenedorizado
Arica	Carretera	Si	Si
Arica	Multimodal	No	No
Ilo	Carretera	Si	Si
Ilo	Multimodal	Si	Si
Iquique	Carretera	Si	Si
Antofagasta	Carretera	Si	No
Antofagasta	Multimodal	Si	No
Puerto Busch (hidrovía)	Carretera	Si	Si
Puerto Busch (hidrovía)	Multimodal	Si	Si
Puerto Suarez (hidrovía)	Carretera	Si	Si
Puerto Suarez (hidrovía)	Multimodal	Si	Si
Buenos Aires	Carretera	Si	Si
Santos	Carretera	Si	Si
Santos	Multimodal	Si	Si

Los datos para la calibración del modelo se obtuvieron de manera principal de las bases de datos sobre comercio internacional del Ministerio de Asuntos Exteriores de Bolivia. Aunque también se dispusieron de algunas entrevistas de exportadores e importadores, esa información no fue válida para la calibración. Esto fue así porque para la calibración del modelo se necesitan tiempos y costes de cada alternativa, y los entrevistados daban respuesta de su medio de transporte pero no de las alternativas. Sin embargo, en los datos de comercio internacional sí se encontraron importantes cantidades de datos relativos a importaciones, exportaciones y modo elegido. Los datos principales que contiene:

- Origen y destino para cada flujo de importación y exportación. Además de la calibración del modelo de elección permite el establecimiento de las TAZs internacionales.
- Tipo de mercancía.
- Modo de transporte.
- Punto de entrada y salida de Bolivia.
- Año y mes.
- Toneladas transportadas, con sus valores CIF (Cost, insurance and freight) y FOB (Free on board). Ambos son términos comerciales internacionales (ICOTERMS). El primero indica el precio de la mercancía puesta en puerto con flete pagado y seguro cubierto, mientras que la

segunda sería los gastos generados hasta que la mercancía está a bordo del buque.

Los datos de tiempos y costes necesarios en la calibración fueron obtenidos mediante los valores implementados en la cartografía, por medio del método de camino mínimo. Con todo ello se generó una base de datos que permitió la calibración del modelo. El proceso para la obtención de dicho conjunto de datos se hizo de la siguiente forma:

1. Descargar la información de la base de datos de comercio internacional (con los datos indicados anteriormente).Esta es la “tabla de datos observados”.
2. Obtener y depurar la cartografía SIG.
3. Obtención del coste medio unitario por modo y las velocidades medias, a partir de las encuestas de mercado.
4. Empleo del SIG para la obtención de los tiempos y costes para cada par O/D y alternativa.
5. Añadir los valores de costes y tiempos a la “tabla de datos observados”.

El modelo de elección discreta empleado es un modelo Logit Multinomial, basado en las funciones de utilidad de cada una de las alternativas. Las funciones de utilidad, para los flujos de importación y exportación, tienen la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 U_{i,j,m,t,carretera,p} &= \beta_0 + \beta_1(\tau_{i/p,p/j,m,t,carretera} + \tau_{p/i,j/p,m,t,mar}) \\
 &\quad + \beta_2(c_{i/p,p/j,m,t,carretera} + c_{p/i,j/p,m,t,mar}) \\
 U_{i,j,m,t,multi,p} &= \beta_0 + \beta_1(\tau_{i/p,p/j,m,t,multi} + \tau_{p/i,j/p,m,t,mar}) \\
 &\quad + \beta_2(c_{i/p,p/j,m,t,multi} + c_{p/i,j/p,m,t,mar})
 \end{aligned}
 \tag{53}$$

Y para los flujos internos, sin salida a mar:

$$\begin{aligned}
 U_{i,j,m,t,carretera} &= \beta_0 + \beta_1\tau_{i,j,m,t,carretera} + \beta_2c_{i,j,m,t,carretera} \\
 U_{i,j,m,t,multi} &= \beta_0 + \beta_1\tau_{i,j,m,t,multi} + \beta_2c_{i,j,m,t,multi}
 \end{aligned}
 \tag{54}$$

Donde:

$\tau_{i/p,p/j,m,t}$ Tiempo entre nodo de salida (flujos de exportación) o de llegada (flujos de importación) y puerto de la ruta. Tanto para carretera

	como para el combinado de carretera y ferrocarril, para cada par origen destino en cada periodo temporal y mercancía.
$\tau_{p/i,j/p,m,t,mar}$	Tiempo entre nodo de salida o de llegada y puerto de la ruta, por mar, para cada par origen destino en cada periodo temporal y mercancía.
$c_{i/p,p/j,m,t}$	Coste entre nodo de salida o de llegada y puerto de la ruta, tanto para carretera como para el combinado de carretera y ferrocarril, para cada par origen destino en cada periodo temporal y mercancía.
$c_{p/i,j/p,m,t,mar}$	Coste entre nodo de salida (flujos de exportación) o de llegada (flujos de importación) y puerto de la ruta, por mar, para cada par origen destino en cada periodo temporal y mercancía.
$\tau_{i,j,m,t}$	Tiempo de viaje entre par origen destino interior tanto para carretera como para multimodal.
$c_{i,j,m,t}$	Coste de viaje entre par origen destino interior tanto para carretera como para multimodal
i	Índice de TAZ de origen.
j	Índice de TAZ de destino.
p	Índice de puerto.
m	Índice de mercancía.
t	Índice de periodo temporal.
$multi$	Ruta multimodal.

Estos valores se obtienen de la red de transporte representada por la misma cartografía donde, como se dijo al principio, se recogen los precios unitarios y las velocidades que permiten la obtención de los costes y tiempos totales por trayecto. Tal y como se indicó en el modelo, se tienen en cuenta los valores de descanso así como las penalizaciones en los nodos relevantes, aduanas, puertos etc. Los tiempos y costes se calculan con los valores fijados para los diferentes escenarios, tanto de simulación tarifaria, de velocidades y de tiempos de espera como de configuración de la red.

Para la calibración del modelo Logit se emplean modelos de máxima verosimilitud, los cuales necesitan observaciones discretas de los modos elegidos y sus atributos. Con el fin de obtener una muestra de este tipo, se adoptó simulación de Monte Carlo. Para ello se empleó el conjunto de flujos observados para ponderar la probabilidad de cada uno de los viajes generados. Con ello se busca generar una muestra de observaciones que coinciden con el patrón observado para los datos conocidos. Se crea una tabla de 800 viajes simulados,

para cada categoría de mercancía, lo que permite obtener la llamada “Tabla de encuesta de viajes simulada”. Para ponderar la probabilidad de cada uno de los viajes simulados se utilizarán los datos de la “tabla de datos observados”. La tabla simulada ha sido obtenida siguiendo los siguientes principios:

1. La probabilidad de generar un viaje de un origen a un destino usando un medio de transporte determinado está dada por el flujo total entre origen y destino dividido entre el flujo total.
2. La muestra de 800 combinaciones origen-destino-alternativa se generan de forma aleatoria a partir de los valores observados de flujo, empleando las probabilidades en el paso anterior. En la tabla se añadirá una fila por cada alternativa para cada par O/D, con el valor “Verdadero” si es la alternativa usada, y “Falso” para el resto.
3. Para cada combinación anterior se obtiene los valores de tiempo y coste para cada alternativa.

La herramienta de calibración empleada fue el software R. Fue necesario calibrar un modelo completo para cada uno de los grupos de mercancías seleccionados en el proyecto. En alguno de los casos se observó que los parámetros de ajuste no tenían significación estadística, lo que implicó que en algunos de los casos no aparezcan todas las variables. Como se comentó con anterioridad, también se tuvo en cuenta que algunas alternativas para la carga no son viables, o no se van a tener en cuenta, debido a diferentes restricciones.

El ajuste del modelo no aparece en la presente tesis debido a la confidencialidad de los datos del proyecto. Pero sí es importante destacar que se han obtenido una serie de conclusiones:

- Para los contenedores:
 - Tanto los parámetros de coste como los de tiempo tienen significación estadística y aparecen en el modelo.
 - La inclusión de un parámetro dependiente alternativo para Arica incrementaba la potencia del modelo. Esto procede del atractivo de las instalaciones de dicho puerto para el transporte de contenedores.
 - El puerto de Santos, a pesar de mover gran volumen de contenedores, es menos atractivo para Bolivia debido a la distancia y a la congestión del mismo.
- Para los graneles sucios tanto el tiempo como el coste pertenecen al modelo.
- Para los graneles limpios la variable significativa es el tiempo. Esto es debido a que la principal mercancía es la soja. En este momento los ex-

portadores están condicionados por las variaciones estacionales del precio de la soja, por lo que les interesa minimizar los tiempos de viajes en periodos de precios altos.

- Para los graneles líquidos se emplea el coste debido a que el tiempo no mejora la potencia del modelo.

La aplicación del modelo Logit, con las anteriores funciones de utilidad, permitieron estimar el reparto de flujos entre las dos alternativas terrestres propuestas, tanto para cada mercancía en particular como para todas en conjunto. El resultado es un conjunto de matrices origen destino de flujos separados por alternativas α , $F_{\alpha,t,m,i,j}$, con los que ya se pueden obtener las tasas de absorción globales de cada uno de los medios, o plantearse análisis posteriores como son la asignación a la red. En las figuras que se muestran a continuación se ve un ejemplo de algunos de los resultados para las dos alternativas propuestas:

Matriz	(Carretera)																		
	11960	11996	11999	12002	12004	12006	12008	12010	12012	12025	17517	17736	17737	17739	17741	17743	17745		
11960																			
11996																			
11999																			
12002																			
12004																			
12006																			
12008																			
12010																			
12012																			
12025																			
17517																			
17736				83630.54	49838.00	0.00	41800.13	205106.04	26325.36			0.00		55215.04	14203.72	2595.15	3475.00	4845.24	
17737				121.92	200.71	0.00	227.51	1100.25	83.95			0.00	45144.54		73026.03	29559.04	114694.54	13091.15	
17739				880.02	836.63	0.00	1051.27	3533.55	729.62			0.00	23034.15	144496.97		6454.91	2758.04	2601.11	
17741				100.66	162.95	0.00	141.27	600.16	71.90			0.00	2761.70	37794.11	4106.00		1216.57	229.56	
17743				5177.50	7200.20	0.00	7671.77	37644.21	2241.57			0.00	2322.24	105026.77	1302.63			325.62	
17745														4675.90	15905.49	1658.13	223.15	366.70	
17746														1207.77	34410.11	6473.03	2646.01	413.04	140.76
17748				2763.00	8583.73	0.00	5842.71	31940.02	1837.52			0.00	1043.73	116256.19	1465.82	376.17	1296.63	1043.27	
17750				625.86	1204.15	0.00	649.42	4461.64	247.82			0.00	503.90	4889.25	454.36	64.65	124.70	531.35	
17752														113640.77	152.23	29797.77	143.98	66196.09	
17754														126495.09	160.21	31958.73	160.21	70177.52	
17756														47717.79	83.19	17272.32	73.71	32159.51	
17758														10153.69	12.00	2821.29	12.07	5066.73	
17761														30983.31	13.70	3336.64	22.21	9329.62	
17771														6548.86	9.67	1956.02	9.18	4110.18	
17775																			

Figura 31: Flujos de mercancía entre pares origen destino para la alternativa carretera.

	11560	11996	11999	12002	12004	12006	12000	12010	12012	12025	17517	17736	17737	17739	17741	17743	17745
11560																	
11996																	
11999																	
12002												5024.31	0.68	681.03	3.66	460.89	
12004												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12006												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12008												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12010												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12012												4107.94	0.54	595.82	2.95	365.16	
12025																	
17517												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
17736				3306.12	8746.08	0.00	0.00	0.00	3437.95		0.00		18771.02	3232.60	655.08	1265.07	1303.77
17737				23.93	19.16	0.00	0.00	0.00	29.66		0.00	17502.27		36247.00	12998.32	31315.93	3689.94
17739				79.92	64.24	0.00	0.00	0.00	134.25		0.00	5823.55	78944.16		2045.02	1407.28	1006.96
17741				18.06	11.66	0.00	0.00	0.00	30.10		0.00	764.04	16619.62	1445.01		445.13	80.58
17743				802.56	646.65	0.00	0.00	0.00	1330.54		0.00	783.32	29952.29	664.63	321.84		77.82
17745												1152.96	2003.65	407.45	57.55	122.45	
17746												436.31	16902.25	2293.29	1161.24	214.95	74.22
17748				653.28	452.40	0.00	0.00	0.00	1090.70		0.00	414.31	33195.55	772.68	177.60	368.93	174.31
17750				70.70	54.74	0.00	0.00	0.00	117.08		0.00	123.08	1394.38	223.08	28.43	32.33	41.99
17752												21037.37	18.40	4295.95	26.05	8584.91	
17754												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
17756												38827.81	26.46	4598.12	26.94	15869.94	
17758												8628.61	11.88	1925.07	11.72	5295.70	
17761												1235.96	0.16	167.23	0.89	110.31	
17771												2962.49	2.38	447.54	2.87	1168.24	
17775																	

Figura 32: Flujos de mercancía entre pares origen destino para la alternativa multi-modal carretera-ferrocarril.

5.1.5. Asignación a la red.

En este caso se optó por no aplicar el paso de cantidad de envío. Se estableció que la unidad de análisis fuese las toneladas transportadas, ya que uno de los objetivos que se busca con los análisis a posteriori de los datos es el establecimiento del tipo de tren, capacidades, máquinas etc. Es decir el diseño completo del medio de transporte. El valor de las toneladas y las toneladas-kilómetros, son los valores que los diseñadores necesitan para llevar a cabo su trabajo.

Esto hace que la asignación a la red no sea de vehículos, sino de toneladas de cada una de las mercancías del análisis. La asignación a la red se llevó a cabo mediante un modelo Todo o Nada. Este tipo de modelos se emplea a veces para la asignación de viajes de camiones o para la asignación entre ciudades o entre regiones, como es el caso. Estos modelos se emplean cuando se puede omitir la congestión en los tramos de la red o es imposible tenerla en cuenta

El modelo hace el reparto de mercancías a la red, mediante la elección de la ruta que va a elegir cada uno de los pares origen destino. Esta ruta se elige mediante la minimización de una de las variables, que en este caso es el tiempo. Se asume que el tiempo de viaje a través de cada tramo no depende de su carga, y por lo tanto, los flujos entre pares pueden ser asignados por el método de camino mínimo en función del tiempo. En la estimación de tiempos de viaje

para analizar el flujo a gran escala (nacional e internacional) el impacto de la congestión es relativamente menor que a menores escalas como la urbana.

Como se han obtenido flujos separados por cada alternativa, el modelo funciona creando una red para cada alternativa. Cada una de esas redes estará configurada con los tramos de los diferentes modos que conforman la alternativa, junto con los tramos marítimos. Debido a que se va a evaluar un horizonte temporal largo, los tramos de dicha red van a variar con el tiempo, principalmente la de ferrocarril mediante la construcción de los tramos que faltan en Bolivia y la conexión con los puertos del pacífico. Esto significa que la red es dinámica pues es diferente para cada periodo de evaluación y para cada mercancía su configuración.

Cada asignación a la red va a tener tres elementos fundamentales:

- Configuración de la red para cada alternativa, periodo temporal y mercancía.
- La matriz origen destino de flujos por cada alternativa.
- Tiempos de viaje de cada par origen destino. Estos proceden de la configuración de la red para ese análisis.

El funcionamiento del modelo es el siguiente. Para una mercancía y una alternativa dada se elige la red y la matriz de flujos separados. Mediante la obtención de la ruta de camino mínimo en función del tiempo para cada par origen destino se asigna a cada tramo de esa ruta el valor del flujo de ese par. Esto se hace para todos los pares que forman la matriz, obteniéndose la asignación de una mercancía a la red en cada periodo temporal. Esto se hace para todo el conjunto de mercancías que han sido consideradas relevantes. Sumando los diferentes flujos en un tramo se obtiene el flujo total en cada tramo. Para saber el flujo total en un nodo se suman los flujos de todos los tramos que tienen entrada a ese nodo. Así se conocen los flujos totales que atraviesan un puerto o una terminal ferroviaria. En la Figura 33 se recogen los flujos de mercancía contenedorizada por cada uno de los tramos de la red del modelo para uno de los escenarios de análisis.

Estos resultados están en matrices y tablas, que es la forma más cómoda y útil para el tratamiento de la información, y pueden ser representados de forma visual. Muchos programas de tratamiento SIG permiten representar anchos de trazo o gráficos en función de ciertos valores de los atributos de la cartografía. En este caso se empleó el propio programa en el que se implementó el modelo, TransCAD, lo cual permitió generar una serie de gráficas que facilitan la comprensión de los resultados obtenidos, así como una primera validación rápida del modelo. Es decir, si en la calibración del modelo se representaban flujos por tramos o salidas que no existían, esto permitía afinar el

modelo de reparto modal. Algunos ejemplos de estas representaciones gráficas de los resultados se muestran a continuación (de Figura 34 a Figura 36).

ID1	AB_Flow	BA_Flow	Tot_Flow
1	1128058.92	434973.87	1563032.79
2	15781.65	109895.64	125677.29
3	85302.98	29732.41	115035.39
5	68150.62	13001.17	81151.79
6	0.00	0.00	0.00
7	490.38	43570.91	44061.28
8	318427.94	470397.70	788825.64
9	346889.52	23881.48	370771.00
10	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00
12	543520.81	2299415.28	2842936.08
13	21029.66	164902.66	185932.32
14	21029.66	164902.66	185932.32
15	21029.66	164902.66	185932.32
16	164902.66	21029.66	185932.32
17	490.38	43570.91	44061.28
18	490.38	43570.91	44061.28
19	0.00	0.00	0.00
20	43570.91	490.38	44061.28
21	112341.53	1023181.20	1135522.72
22	112341.53	1023181.20	1135522.72
23	164902.66	21029.66	185932.32
24	181986.86	2851.82	184838.68
25	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00
31	2851.82	181986.86	184838.68
32	2851.82	181986.86	184838.68
33	164902.66	21029.66	185932.32

Figura 33: Ejemplo de asignación a la red de mercancía contenedorizada.

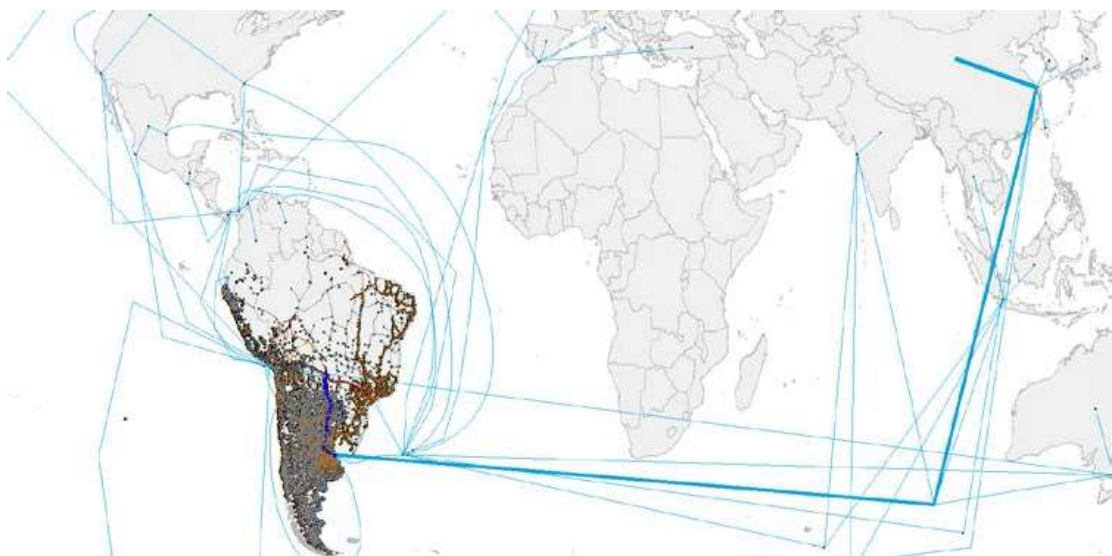


Figura 34: Ejemplo de asignación a red, modelo completo.

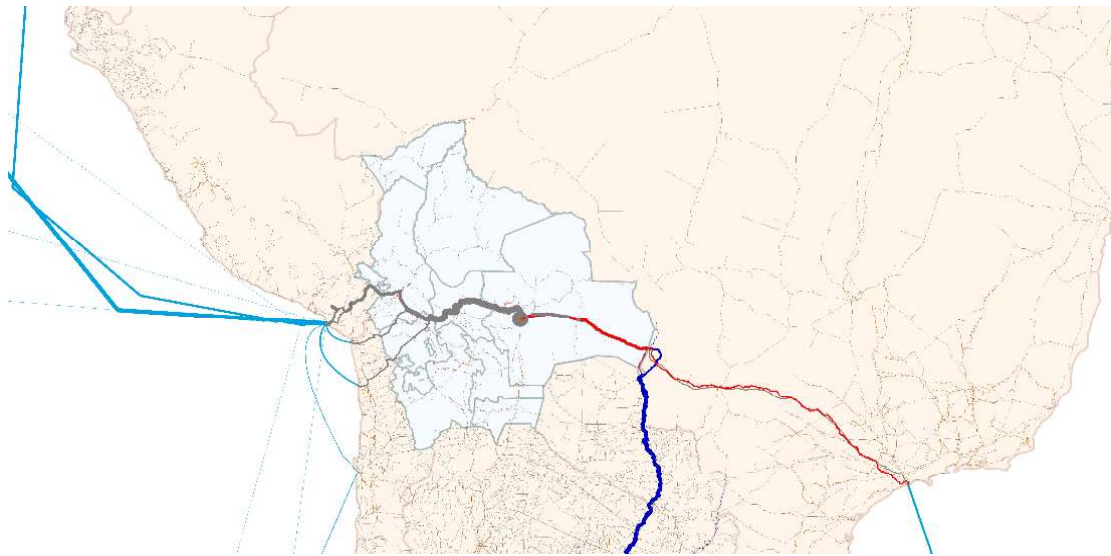


Figura 35: Detalle de asignación a la red, producto agrícola.

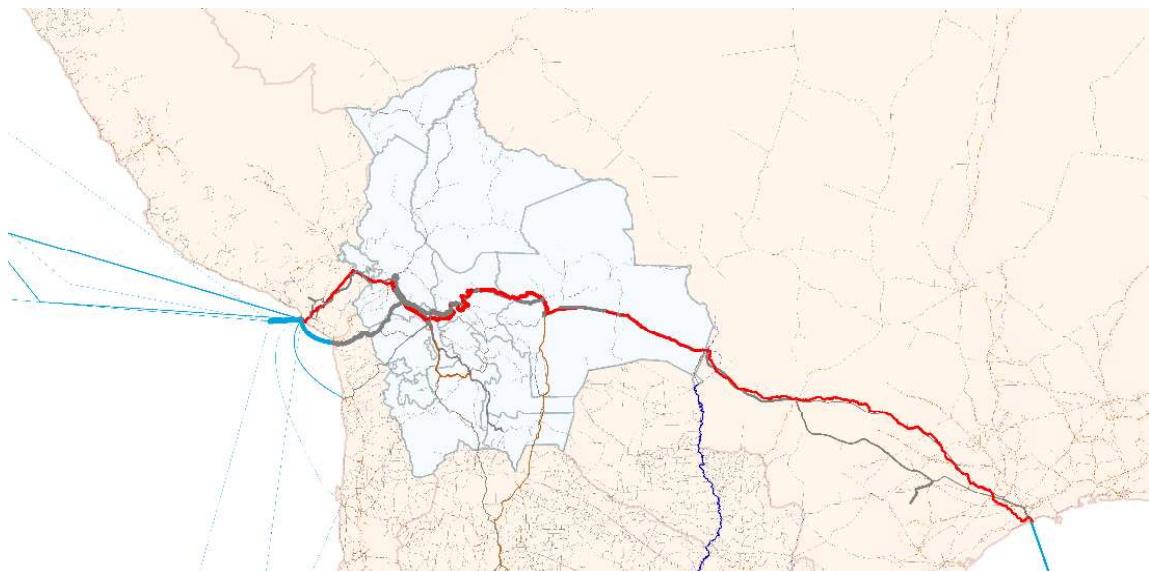


Figura 36: Detalle de asignación, mercancía manufacturada.

Las imágenes representan casos de asignación a la red del modelo. Cada medio de transporte aparece representado por un color: carretera en gris, ferrocarril en rojo, marítimo en azul claro y fluvial en azul oscuro. El ancho de cada uno de los modos es proporcional a las toneladas transportadas en cada tramo. Por motivos de confidencialidad no se indican las cantidades transportadas ni el tipo de mercancía y año de análisis.

El marco del proyecto no incluía otro tipo de análisis como son los de emisiones o incidencias, que permiten establecer otro tipo de análisis como puede ser el multicriterio o de beneficio social, por lo que no se tuvieron en cuenta en la implementación del modelo.

El análisis económico no era parte del alcance del modelo, sino que se planteó un modelo económico complementario al de transporte, pero que basaba sus resultados de los obtenidos en el modelo de transporte, en particular las absorciones que tenía cada modo de transporte así como los precios y tarifas estimados para los diferentes servicios.

El modelo fue evaluado y aceptado por los expertos tanto del consorcio como de las entidades financiadoras. La aplicación desarrollada para implementar el modelo y hacer los análisis correspondientes fue entregada al Vice-ministerio de Transporte de Bolivia. Para que fuese de fácil uso por parte de personal no experto se generó una interfaz de configuración de escenarios de fácil uso, junto con un curso de formación a los posibles usuarios del mismo.

La evaluación favorable por parte de los expertos, así como la utilidad de los resultados obtenidos para los posteriores análisis llevados a cabo en el proyecto real, apoyan la utilidad y validez del modelo generado.

5.2. CASO DE BRASIL: PRIORIZACIÓN DE INVERSIONES.

5.2.1. Descripción del proyecto.

El siguiente caso de análisis del modelo se enmarca en el proyecto PRODEPRO. Se trata de un proyecto del Banco Interamericano de Desarrollo, para la región nordeste de Brasil, Programa de Desarrollo Productivo del Nordeste. Busca atender las limitaciones en términos de infraestructura, logística y de capacidad institucional que limitan la productividad de las empresas, así como la integración de los estados, la expansión de los comercios interno y externo, la atracción de inversiones y la generación de empleo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2015). El objetivo que la economía de la zona nordeste de Brasil siga creciendo a tasas superiores a las de la economía brasileña, de manera que las desigualdades, existen dentro del país, se vean reducidas.



Figura 37: Regiones de Brasil (Fuente: www.embajadadebrasil.org).

Para ello es necesario, además de aquellas herramientas que fomenten dicha mejora, estudiar qué es lo que está frenando la competitividad de la región y buscar las soluciones pertinentes. Debido a ello, el Banco Nordeste de Brasil, BNB, junto con el BID lanzan este programa de apoyo, donde se apoya el desarrollo de las cadenas productivas más relevantes de la región en términos de competitividad.

Que el proyecto se centre en la zona nordeste viene derivado del bajo nivel de desarrollo y alta pobreza de la zona. Brasil está dividido en cinco regiones geopolíticas, de las cuales la región nordeste es la tercera en extensión, representando el 18% del territorio brasileño. Los estados que la forman son Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe y Bahia.

Brasil tiene, desde 2006, su propio Plan Nacional de Transporte y Logística (PNLT). Comparando con otros países de igual extensión y restricciones logísticas, Brasil presenta un uso mucho mayor de la carretera que del resto de modos disponibles. Esto hace que el uso de otros modos como el ferrocarril se convierta en una opción importante a mejorar. El PNLT establece una serie de acciones que se basan en la mejora de la multimodalidad, de forma que se consiga un crecimiento equilibrado de las regiones. Este Plan analizó los 110 productos principales que representan más del 90% del PIB del país. Para ellos se desarrollaron recursos y proyectos para la consolidación y mejora de la transferencia modal desde la carretera a otros modos.

Buscando este desarrollo es donde se enclava el proyecto PRODEPRO. Su objetivo principal es la definición y propuesta de nuevas infraestructuras logísticas y de transporte que puedan canalizar los flujos de mercancía presentes y futuros, para aumentar la productividad y competitividad de las compañías de la región. Esto se consigue mediante la comunicación física entre los diferentes estados de la región y con el resto de país, mejorando tanto el comercio interno como los flujos de importación y exportación.

Para el correcto desarrollo de PRODEPRO se diseñó un Plan Maestro de Inversiones, IMP. Este Plan permite la identificación y la propuesta de priorización de las infraestructuras requeridas para el desarrollo de los flujos de producción de manera que se cumplan los objetivos buscados. El plan tiene, entre otros, los siguientes objetivos:

- Caracterización de los sectores productivos de la región.
- Estimaciones futuras de los flujos, dependientes del crecimiento económico.
- Identificar y priorizar las inversiones en infraestructuras.
- Identificar y mejorar la capacidad de los ejes de flujos de producción por medio de nueva infraestructura para todo tipo de comercios.
- Desarrollo de un Plan Ejecutivo describiendo las propuestas de inversión.

Un elemento fundamental para el desarrollo del plan ha sido el modelo de simulación de transporte desarrollado. Como en el caso anterior, para facilitar las labores de ejecución y análisis, el modelo fue desarrollado en TransCAD.

Con él se pudo estudiar, en primer lugar, la capacidad actual de la red de transporte con el fin de hacer frente al aumento de flujos esperados para el horizonte temporal de análisis de 10 años. En segundo lugar se estableció el impacto que las posibles nuevas infraestructuras tienen sobre el reparto modal de la carga.

El análisis llevado a cabo para la priorización de las inversiones utilizó un proceso multicriterio, donde junto a los valores obtenidos de la simulación de transporte, se han tenido en cuenta otros de tipo ambiental o poblacional para la toma de decisiones. Alguno de ellos, como la población afectada por los proyectos, procede también de la configuración del modelo de transporte. Es decir, el objetivo del modelo de simulación es la obtención de un conjunto de Indicadores Claves de Rendimiento, ICR, que permitan dicha asignación de prioridades a los proyectos.

Para llevar a cabo el análisis se empleó el modelo desarrollado en la presente tesis. En particular se adoptaron los pasos de generación y distribución de cargas, en donde se empleó tanto el método con coeficientes como el método gravitacional. Tras esto se eligió el paso de elección de modo y ruta conjunto, mediante la elección en base a criterio, para el cual se construyó una cadena de coste generalizado. En la Figura 38 se recogen los pasos elegidos para llevar a cabo el análisis.

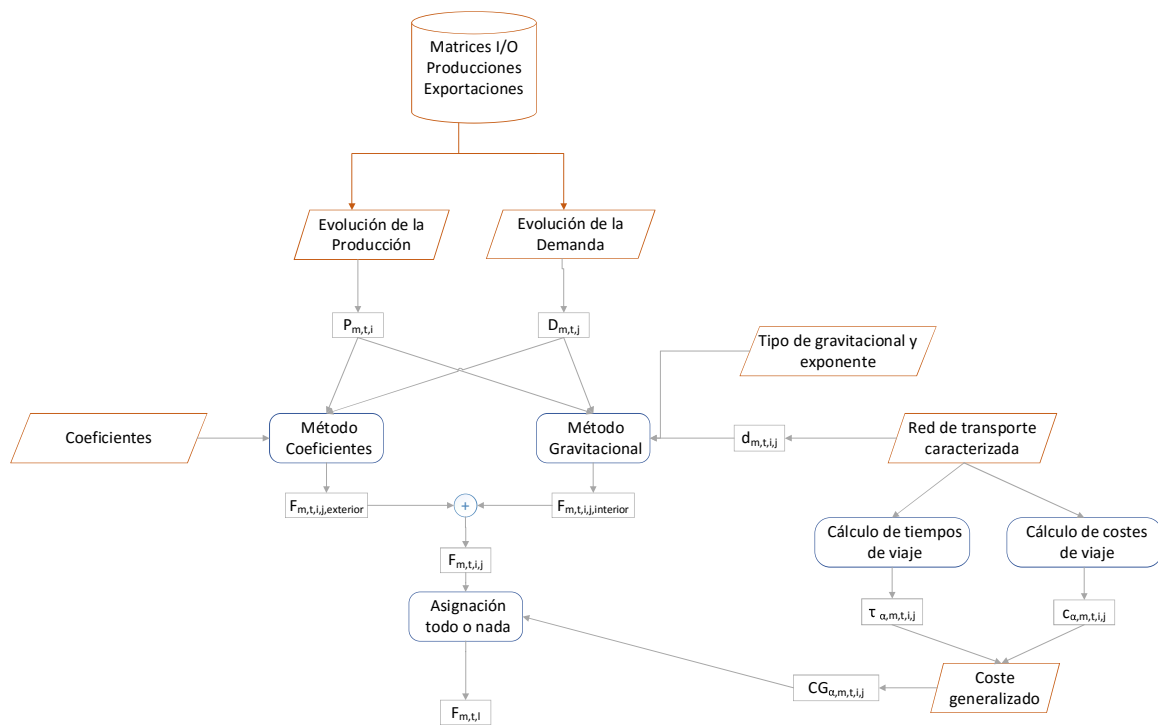


Figura 38: Pasos del modelo de Brasil.

5.2.2. Datos de entrada al modelo.

Para la obtención de todos los datos del modelo, y elegir los necesarios, lo primero que se realizó fue un análisis de los estudios anteriores desarrollados por el país, como el de política de Desarrollo Productivo de Brasil, en el que se establecen 31 cadenas productivas en la región NE del país. De esas 31, la Confederação Nacional de Indústria en su trabajo “Nordeste competitivo” de 2012, identifica que son 13 las que se pueden considerar como prioritarias. Pero esto es para la totalidad del país, en el presente estudio se estableció para cada uno de los estados que sector era realmente prioritario, con la colaboración de cada uno de los mismos. Al final se generó un conjunto de 33 productos o cadenas productivas de relevancia para la región. Esto hizo que la evaluación de los diferentes escenarios fuese costosa, en términos de tiempo.

Para la red necesaria en los modelos de simulación de transporte se empleó la desarrollada para los trabajos previos del PNLT, actualizando los tramos que entraron en funcionamiento tras su realización. También fue necesario incluir algunos tramos que representan los proyectos a estudio. Las Figura 39 y Figura 40 muestran la configuración de la red.

Como se puede ver en la imagen, son varios los medios de transporte que tuvieron que ser empleados en el modelo. Estos son: carretera, ferrocarril, hidrovía, cabotaje, marítimo y ductos. Todos los puntos de intercambio modal están configurados con los accesos y transferencias necesarios, donde se aplican los costes y retrasos de las actividades de cambio de modo y son configurables para los escenarios de evaluación.

Todos los tramos están caracterizados por la velocidad correspondiente, dependiendo de modo y tipo de vía, así como por los precios según el tipo de cadena productiva de la que se trate, pues así se puede obtener el coste de viaje para cada una de ellas de forma independiente.

Al contrario que el caso anterior, aquí solo hay dos niveles de resolución, uno regional donde se tiene en cuenta los flujos entre las meso-regiones y los flujos debidos a transporte internacional, que serán tenidos en cuenta como las entradas y salidas de los puertos. Esto permite establecer las TAZs del modelo.

Por otro lado, para la obtención de las matrices O/D se partió de información del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística, el cual desarrolló las matrices I sumo-Producto de las diferentes cadenas productivas. Estas son un elemento fundamental para la obtención de los valores necesarios para el cálculo de las producciones y consumos de las TAZs elegidas en el modelo.



Figura 39: Red del modelo de la región NE de Brasil, sin carreteras.

En la imagen se recogen tanto las infraestructuras existentes en el momento del estudio como aquellas que están en ejecución o proyectadas, junto al conjunto de proyectos que se buscan priorizar. Al igual que en el caso de Bolivia, la red estará únicamente conformada por aquellos elementos que se esperan que se encuentren en funcionamiento en el periodo que se está analizando.

En rojo se representa la red de ferrocarril, en azul claro la hidrovía, en violeta los ductos y en azul, por la parte externa del mapa, se representan las líneas de cabotaje, entre los puertos del área de estudio.

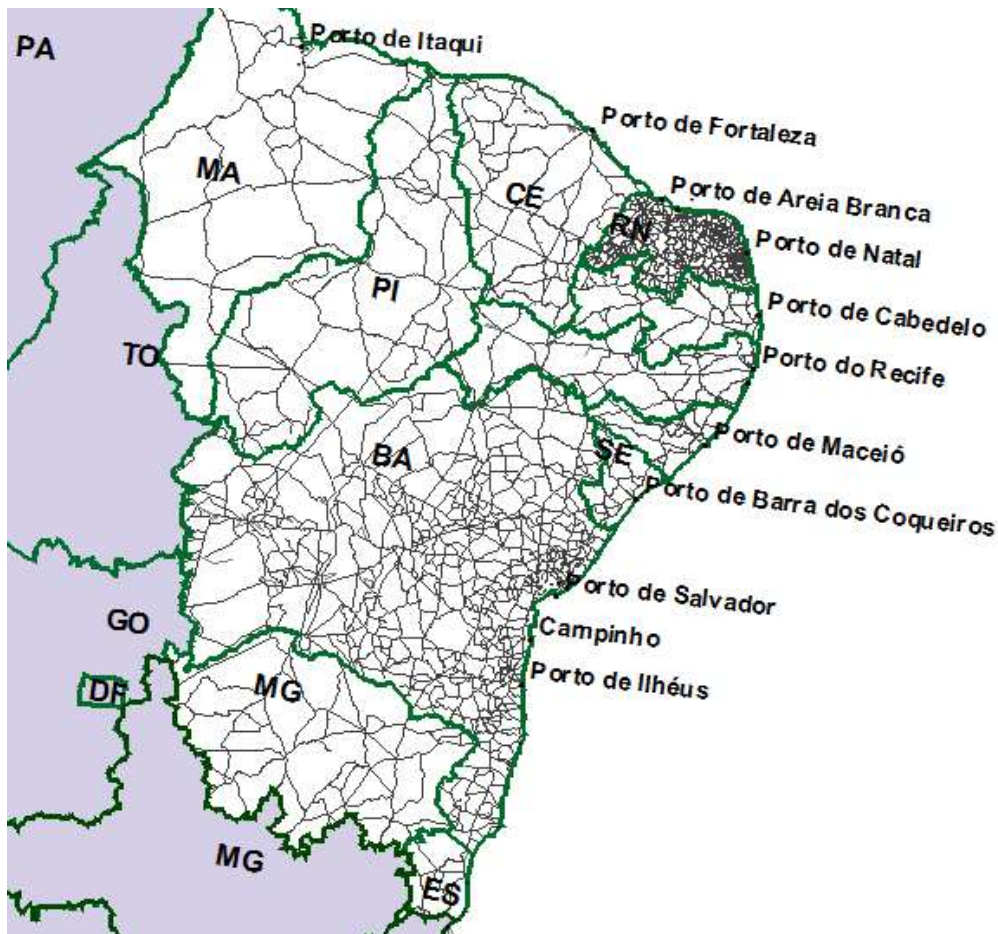


Figura 40: Red de carreteras de la región NE de Brasil.

5.2.3. Generación de carga y distribución.

Como se explica en el apartado anterior la red de transporte queda preparada para el análisis, y por lo tanto, es necesario establecer el segundo input del modelo, que son las producciones y consumos que van a ser tenidos en cuenta en el mismo. En este caso se empleó un modelo de tipo Input/Output, en el cual se emplean las matrices Input/Output estimadas por el Instituto Brasileño de Geografía y Estadística, junto con:

- Predicción de las producciones regionales.
- Nuevos centros de producción que serán construidos durante el periodo de análisis.
- Estimación de producciones para exportación.

Estas matrices I/O recogen la interrelación existente entre industrias, ya que se basan en el principio de que la salida (Output, O) de una es la entrada (Input, I) de otra. Se agrupa la producción industrial por sectores, de manera que parte de la producción de un sector puede ser el consumo de otro.

Lo primero que se hizo fue estimar los consumos de mercancías de cada nodo, expresadas en matrices I/O que contiene la fracción de cada producto que son consumidas por cada sector. Las exportaciones cuyo origen es un punto i se restan de las producciones para obtener únicamente el consumo nacional:

$$\sum_i (P_i - E_i) = \sum_j C_j \quad (55)$$

Donde:

i	Índice de orígenes.
j	Índice de destinos.
P_i	Producciones en origen.
E_i	Exportaciones en origen.
C_j	Consumos en destino.

Es necesario desagregar el total de consumo entre todos los nodos existentes. Para ello tuvieron en cuenta los sistemas productivos del mismo y los consumos inducidos descritos en las matrices I/O:

$$C_{i,k'} = \sum_k P_{i,k} \frac{P_k}{F_{k',k}} \quad (56)$$

Donde:

$F_{k',k}$	Valor de la matriz I/O correspondiente al elemento entre el sector k y el k' .
k, k'	Diferentes cadenas productivas relacionadas porque las entradas de una son productos de la otra.

Con esto se pueden calcular los datos de producciones y consumos que son necesarios para establecer las matrices origen destino que alimentan a cualquier tipo de modelo de transporte, por ser la representación de los flujos que se van a distribuir por toda la red. El conjunto inicial de información requerida,

junto con la red de transporte, queda completada por las producciones y consumos de la red regional y los flujos de exportación del comercio internacional.

La siguiente etapa del modelo que entra en funcionamiento es la de generación de las matrices origen-destino. En la Figura 41 se puede ver la relación entre los datos de producciones, consumos y exportaciones y la generación de las matrices origen destino. En azul se representan los datos que son externos al modelo, en amarillo los que se calculan mediante alguno de los pasos del modelo y en blanco los métodos de generación de consumos, como se explicó con anterioridad, y el de distribución o generación de las matrices origen destino para simulación y análisis mediante el uso del modelo de transporte.

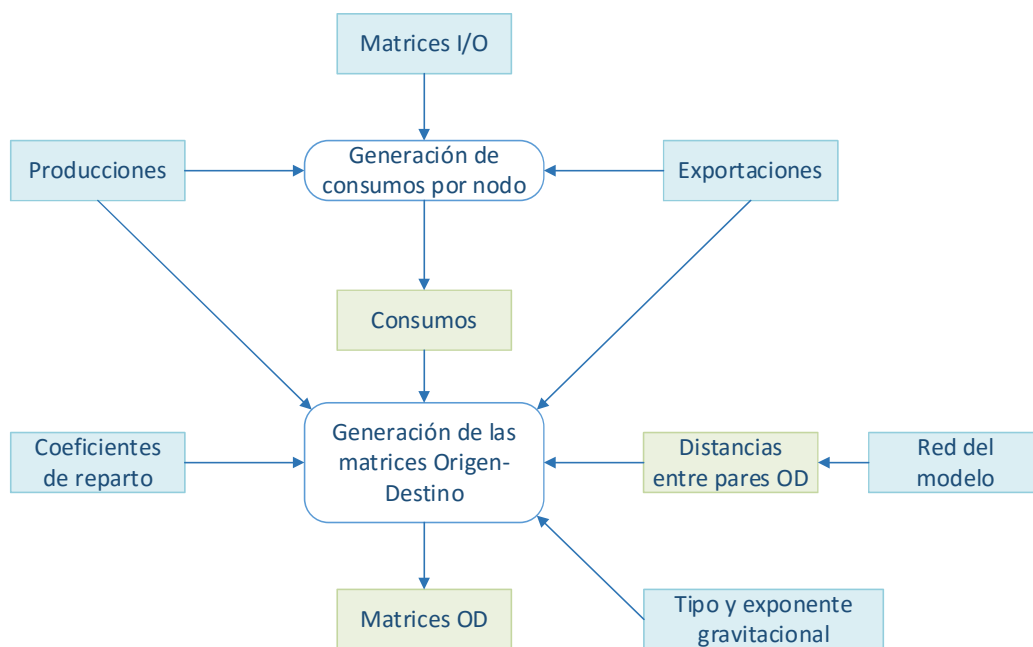


Figura 41: Generación de las matrices origen-destino del modelo de PRODEPRO.

Una vez obtenidos todos los datos de entrada se puede iniciar la obtención de las matrices origen destino. Se establecieron dos niveles de resolución, el regional y el internacional. En el regional se obtuvieron los flujos entre orígenes y destinos dentro del país, donde se mantienen las condiciones comerciales. Por otro lado, está el nivel internacional relacionado con las exportaciones del país.

Esto llevó al empleo del modelo combinado de matrices origen-destino, donde para la parte interior del país se empleó un modelo gravitacional, donde la impedancia venía dada por la distancia entre pares. Dependiendo del tipo

de mercancía, dicha matriz variaba, debido a las limitaciones de uso de algunas infraestructuras como son los ductos. El modelo gravitacional empleado fue de tipo potencial, cuyo exponente se calibró con los datos históricos disponibles.

Para la parte de exportaciones internacionales se empleó el modelo basado en coeficientes. En este caso los pares origen-destino están formados por una TAZ y un puerto de salida. Para el establecimiento de los coeficientes se obtienen de los datos históricos, es decir de cómo se está produciendo hasta ahora el reparto de una mercancía desde cada una de las TAZs a los puertos considerados en el modelo.

Con ambos resultados se construyeron las matrices O/D completas que tienen como índices de cada uno los elementos todas las TAZs y puertos del modelo.

5.2.4. Elección modal y asignación a la red.

Una vez obtenidas estas matrices, se planteó qué tipo de modelo se iba a aplicar, uno en dos pasos con elección modal y asignación a la red o directamente un modelo de elección-asignación conjunta en base a criterio. Se estudió la información disponible, requerimientos de resultados y restricciones existentes y se decidió que la mejor opción era el modelo conjunto. En este modelo lo que se hizo fue la selección combinada modo y ruta mediante el empleo del criterio de minimización de coste generalizado. Las razones que llevaron a adoptar este método son las siguientes:

- La información disponible no era lo suficientemente buena y abundante para la calibración de un modelo de elección discreto, como son los tipo logit.
- Los elementos geográficos considerados son numerosos pues se tienen en cuenta 230 meso-regiones en la zona nordeste de Brasil y los 33 productos anteriormente indicados. De este modo los flujos de mercancías a menudo representan flujos desde un único centro de producción en una meso-región a otra o a un puerto. La selección conjunta de modo y ruta indica que se asume que la ruta de transporte solo depende del origen, destino y tipo de mercancía.

Por todo ello se optó por la selección conjunta de modo y ruta. Para esta selección conjunta fue necesario establecer una función de coste generalizado para cada uno de los tipos de mercancía considerada en el modelo. La elección

se hace mediante la obtención de camino mínimo entre origen y destino minimizando dicho coste generalizado.

Como se indicó en la descripción del modelo conceptual, el coste generalizado será una combinación lineal de diferentes atributos que caracterizan la red. En este caso en particular las variables que aparecen en dichos costes generalizados, para cada mercancía, son coste y tiempo:

$$CG_{i,j,t,m} = \delta_{t,m} + c_{i,j,t,m} + \delta_{\tau}\tau_{i,j,t,m} \quad (57)$$

Donde:

$CG_{i,j,t,m}$	Coste generalizado para cada par O/D. El par está indicado por los índices i y j .
$\delta_{t,m}$	Coefficiente de ajuste según el tipo de mercancía.
$c_{i,j,t,m}$	Coste del trayecto entre origen y destino.
$\delta_{\tau}\tau_{i,j,t,m}$	Coste debido al tiempo de viaje entre los nodos del par O/D.
t	Índice de periodo temporal.
m	Índice de tipo de mercancía.

El parámetro δ_{τ} representa el valor del coste del tiempo, y se ajusta de forma independiente para cada mercancía, m , dependiendo del precio por tonelada de la misma.

Los modelos de costes y tiempos que permitieron obtener los valores para cada par origen-destino se construyeron de la siguiente forma:

- Coste: El modelo de costes tiene en cuenta tanto los tramos como los nodos. Para los tramos se tiene un valor kilométrico según tipo de mercancía, periodo de análisis y modo de transporte. El coste será el producto de la longitud del tramo recorrido por ese valor. En cuanto a los nodos, se penaliza en los intercambios modales con el valor monetario de las cargas y descargas entre dos medios de transporte diferentes (mar/ferrocarril, carretera/ferrocarril, mar/carretera, carretera/hidrovia, mar/hidrovia). Así el coste para cada nodo se representa representado por $pf_{k,m,t}$, mientras que para cada tramo se calculará de la siguiente forma:

$$c_{i,j,t,m,\beta} = pv_{\beta,m,t}d_{i,j,\beta} \quad (58)$$

Donde:

$pv_{\beta,m,t}$	Precio kilométrico para cada modo de transporte, mercancía y periodo temporal.
$d_{i,j,\beta}$	Distancia de un tramo, entre dos nodos de la red.
$pf_{k,m,t}$	Coste en los nodos de intercambio intermodal. Varía con la mercancía y el periodo temporal.

Los índices i, j, m y t , representan lo mismo que en el caso anterior, tanto para los costes como para los tiempos.

- **Tiempos:** A igual que para los costes, es necesario obtener el tiempo de recorrer los diferentes tramos, así como el tiempo añadido en los nodos de intercambio modal. Los tramos están caracterizados por una velocidad que permiten la obtención de los tiempos incurridos en atravesar el tramo. Pero es necesario tener en cuenta el aumento de este tiempo debido, por ejemplo, a descansos. Por eso se tiene en cuenta un factor que minora la velocidad. En cuanto a los nodos de intercambio se tiene en cuenta los retrasos en los mismos. El tiempo en los nodos de intercambio intermodal se representa por $\tau_{k,m,t}$, mientras que en los tramos se calculará de la siguiente forma:

$$\tau_{i,j,t,m,\beta} = \frac{d_{i,j,\beta}}{\alpha_t v_{\beta,t}} \quad (59)$$

Donde:

$v_{\beta,t}$	Velocidad del tramo, por modo (β) y periodo (t).
α_t	Coefficiente de minoración de velocidad para tener el tiempo de descanso en cuenta.
$\tau_{k,m,t}$	Tiempo en los nodos de intercambio intermodal (k), por mercancía (m) y periodo temporal.

La asignación no tiene en cuenta, de forma consciente, los efectos de la congestión de forma directa. Sí se consideran, de alguna manera en la minoración de la velocidad y los retrasos en los nodos. Esto es así porque no se tienen en cuenta todas las mercancías existentes sino las relevantes, y tampoco hay información sobre los pasajeros, lo que no sería un modelo de congestión muy

exacto. Es mejor introducir estos efectos como valores que pueden ser configurados en los análisis, es decir los tiempos de retrasos en nodos y el coeficiente de minoración de la velocidad.

Con esto se obtienen los flujos sobre la red de cada una de las mercancías consideradas en el estudio, así como los flujos totales. Se obtuvieron los flujos por cada tramo conociendo la ocupación que podrían tener los proyectos desarrollados, así como la población afectada por cada uno de ellos.

La cartera de proyectos futuros estaba formada por 852 proyectos de diferente tipo, desde mejora de infraestructura a nueva construcción, de diferentes tipos de vías y modos. Esta lista fue reducida a un total de 350 proyectos mediante un análisis previo, que fueron los incorporados al modelo. Otro tipo de proyectos, como pueden ser los de inversión en nueva industria, fueron tratados de forma independiente, alguno de ellos incorporados en el modelo de generación de producciones y consumos como nuevos puntos de producción.

En la Figura 42 se muestran en amarillo el conjunto de proyectos que se quieren jerarquizar.

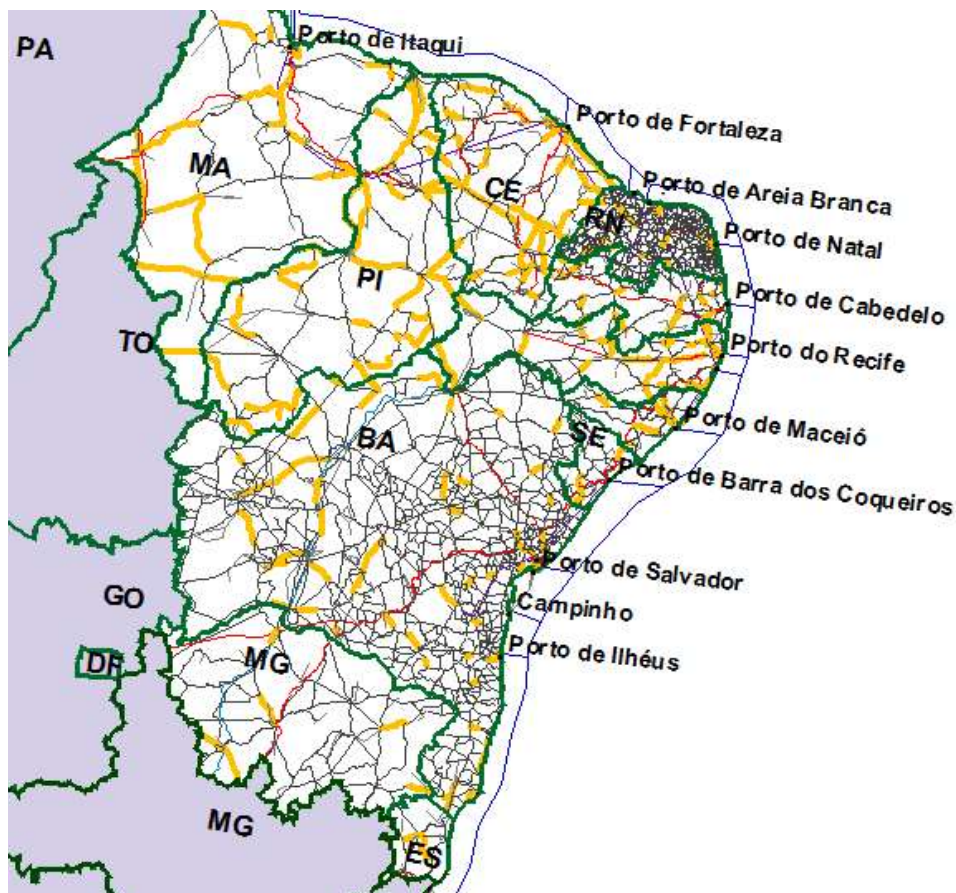


Figura 42: Mapa de proyectos considerados, amarillo.

Se simularon diferentes escenarios para poder obtener diferentes medidas de mejora. Primero de todo es el escenario base, para conocer cómo está funcionando en la actualidad. En segundo lugar la infraestructura actual con los flujos futuros, para ver cómo sería el comportamiento de los flujos sobre la red y por último, los flujos futuros sobre la red con los proyectos a tener en cuenta. De la Figura 43 a la Figura 46 se muestran esas asignaciones a la red. En el primer caso la zona del nordeste completa, con los tramos de los diferentes modos empleados por dos tipos de mercancía. En el segundo son mapas de detalle de asignación en el estado de Maranhão y Ceará.

Todo ello, además de ver cómo sería la utilización de la red, permitió analizar los ahorros en tiempos y costes en los que se incurriría de realizar o no las inversiones en dichos proyectos. Con esto se tiene diferentes elementos para incorporar a la matriz multicriterio y priorizar esos 350 proyectos señalados.

Dentro de los criterios que se eligieron para la matriz multicriterio, hay un conjunto de variables que proceden de los resultados de la experimentación con el modelo de transporte. Estas variables son: los flujos de mercancías absorbidos por cada uno de los proyectos, el ahorro en tiempos y costes que se producen en el sistema de transporte debidos a llevar a cabo los proyectos y el número de estados y microrregiones afectados. Esto último permite de forma indirecta la obtención de población afectada por los proyectos, empleos generados, la obtención del valor de la cadena de suministro, etc.

Esto muestra la utilidad del modelo para el apoyo a la toma decisiones en políticas de desarrollo, tanto del transporte como de logística, y por lo tanto, en el establecimiento de dichas políticas e inversiones asociadas.



Figura 43: Asignación de mercancía ganadera a la red de la zona NE de Brasil.

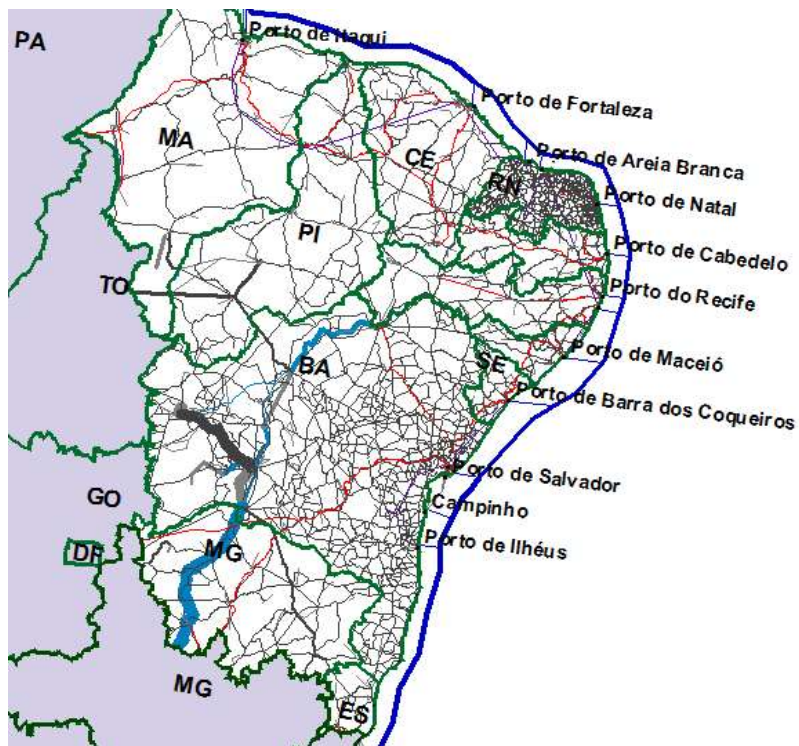


Figura 44: Asignación mercancía agrícola en la región NE de Brasil.

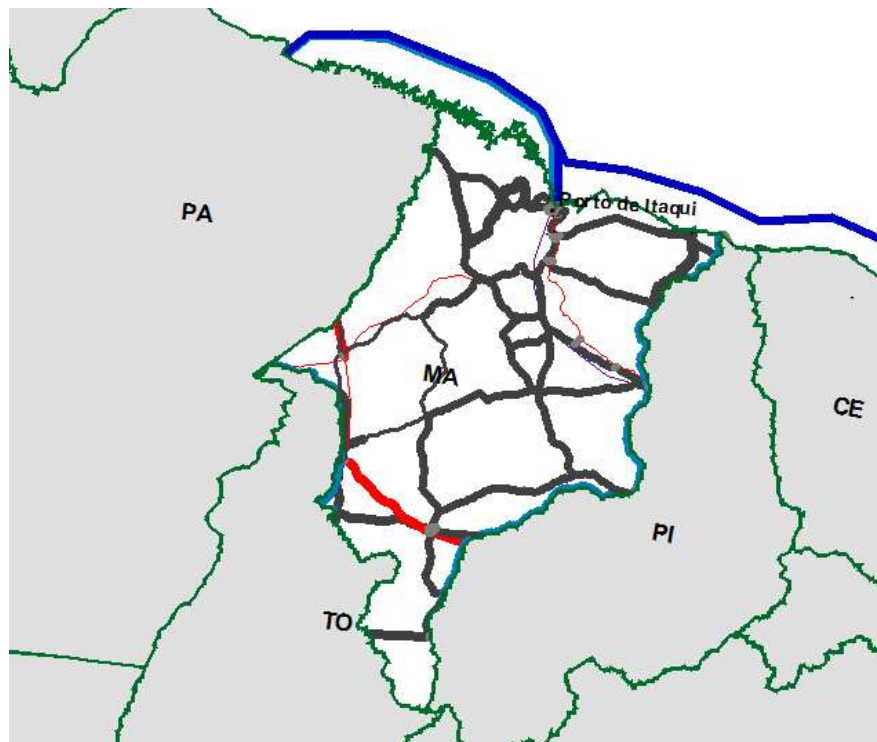


Figura 45: Detalle asignación mercancía manufacturada en Maranhão.

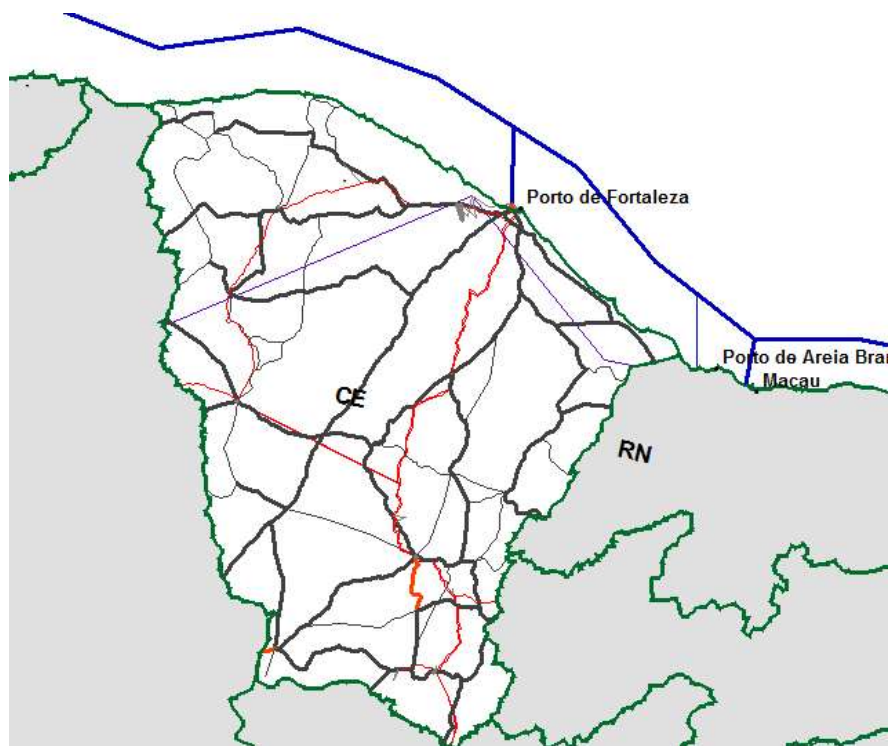


Figura 46: Detalle asignación estado de Ceará.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

6.1. GENERALES.

En esta tesis se ha llevado a cabo la definición de un modelo de transporte de mercancías completo, versátil y configurable, que permite la evaluación de sistemas multimodales de transporte de mercancías desde múltiples puntos de vista.

El desarrollo de un modelo completo de transporte es un trabajo complejo, no solo por la existencia de diferentes alternativas que han de ser tenidas en cuenta sino por la dificultad de obtener los datos necesarios y decidir la metodología que se ha de emplear. En este sentido el modelo desarrollado permite establecer los pasos acordes con la información disponible, sin perder de vista la obtención de unos resultados realistas y con la mayor precisión posible.

El fin principal de este modelo es la realización de análisis basados en simulación, es decir, plantear un análisis “que pasaría si” en el que el modelo de transporte es el elemento principal y sobre el que se van a plantear diferentes escenarios de análisis. De esta manera se podrá establecer cuál de los escenarios propuestos es el que permite obtener mejores resultados. Como el modelo está formado por diferentes métodos y datos de entrada, los escenarios se podrán establecer en base a múltiples elementos:

- Red de análisis dinámicas: Se podrá tener en cuenta una red que varía con el tiempo, donde se anulan o entran en funcionamiento diferentes tramos. Se pueden evaluar diferentes soluciones para el mismo problema, por ejemplo, la conexión entre dos puntos por distintos trazados.

También se pueden establecer escenarios en donde cambian las características de esa red, como puede ser la velocidad media de cada uno de los tramos, o el número de carriles que tiene.

- Variables del sistema: Se podrán establecer escenarios basados, entre otras variables, en costes y tarifas. Esto permitirá no solo evaluar ocupaciones de la red sino los precios que hacen que un servicio resulte más o menos rentable.

Si se tiene en cuenta el tiempo, que es otro de los elementos fundamentales del sistema, se podrán establecer escenarios de tiempos tanto en lo referente a tramos, sobre todo relacionados con la

velocidad, como en nodos , permitiendo ver las variaciones sufridas en el sistema.

Los resultados obtenidos de la experimentación de los diferentes escenarios, resultantes tanto de la variación de red como de las variables o datos del modelo, permitirán establecer cómo se distribuirán los flujos en los nodos y tramos de la red. Esto se hará bajo las condiciones económicas, de red o de servicio, que se establezcan en cada escenario. Será una herramienta fundamental en la toma de decisiones. Por ejemplo, si lo que se está evaluando es un nuevo servicio, se podrán establecer las tarifas, el tipo de vehículo y las frecuencias que permitirán hacer que este servicio sea rentable, y si es necesario apoyo gubernamental, por medio de subvenciones, o no.

El modelo permite tener en cuenta diferentes niveles de resolución geográficos y económicos, lo que presenta una importante ventaja cuando se está teniendo en cuenta el flujo total de mercancías de una región. Es decir, que además de considerar los flujos generados y consumidos dentro de la misma región, se van a tener en cuenta flujos de importación y exportación, en los que las transacciones pueden estar sujetas a múltiples sistemas económicos.

La parametrización del modelo permite no sólo establecer un análisis del sistema basado en diseño de experimentos, sino que lo deja preparado para la aplicación de métodos de optimización, en los que la función a optimizar puede ser elegida en base a múltiples criterios, ya que, como se indicó antes, las variables empleadas en el modelo son de diferente naturaleza, modelo que por otra parte está abierto a la inclusión de nuevas variables y parámetros. Ejemplos de funciones objetivo que se podrían emplear son la tasa interna de retorno, como la especificada en el modelo de evaluación económica, o las captaciones de mercancía.

Una característica fundamental del modelo es la versatilidad. Esto se refiere a que el diseño modular de la arquitectura facilita la sustitución de las etapas descritas en esta tesis por otras alternativas utilizando la misma estructura para manejo de datos, y también para la adquisición de los mismos. Los datos resultantes del modelo se generan con un formato que facilita su importación en sistemas de visualización SIG para obtener una buena representación gráfica. Por todo ello es fácil integrar la herramienta de modelización con software SIG para ofrecer un servicio de modelización completo que abarque todas las etapas de desarrollo de un proyecto. En los casos de estudio se ha visto cómo un software comercial, TransCAD, se ha adaptado a la ejecución del modelo con el empleo de distintos pasos para cada uno de los casos.

Cuando se habla de movilidad urbana es bastante fácil establecer la unidad de transporte y su tamaño: por ejemplo cuando existe una comparación

entre vehículo privado y bus. En el caso de las mercancías, la multitud de tipos de vehículo disponibles y las necesidades de la carga hacen que esta selección sea un poco más complicada. Por ello en el modelo se ha tenido en cuenta la implementación de una cantidad óptima de pedido en cada caso, donde en función del tipo de mercancía y sus costes, se establecerá el tamaño del envío. Cada caso particular decidirá si lo importante es la frecuencia o el tamaño, lo que permitirá aprovechar economías de escala. En función de los costes se tendrán los tamaños necesarios para cada uno de los modos existentes en el sistema. Todo esto dota al modelo de un gran potencial ya que el modelo de elección depende de los costes, y por lo tanto, el establecimiento de la unidad de transporte permite obtener de manera más adecuada el coste total del transporte y en consecuencia la elección de modo. Como indican Jose Holguín-Veras, Xu, de Jong y Maurer (2011), la selección modal se ve necesariamente afectada por la cantidad de envío y viceversa, siendo necesaria la consideración conjunta de ambos aspectos.

StadieSeifi et al. (2014) concluye que en los trabajos de planificación existe una carencia relacionada con las congestiones que se pueden dar en nodos de consolidación o intercambio modal. El transbordo y sus costes asociados es otro de los elementos que, pese a su gran relevancia práctica no han sido suficientemente investigados en la literatura sobre modelos de planificación de transporte. En la presente tesis se han tenido en cuenta tanto los elementos de coste como de tiempo en los nodos, y estos son tenidos en cuenta en todo el proceso. Se han tenido en cuenta no solo los nodos de intercambio modal sino también en aquellos susceptibles de incurrir en tiempos y costes como son las aduanas, peajes, etc. Por otra parte, la posibilidad de configurar múltiples escenarios permite establecer diferentes escenarios de tiempos y costes, debidos a la congestión que pueden sufrir dichos nodos, y con ello, la influencia que puede ejercer esa congestión sobre el reparto de flujos en la red.

Los casos de estudio en los que se ha empleado el modelo también permiten llegar a conclusiones adicionales a las de la definición formal del modelo.

6.2. CASO DE BOLIVIA.

La aplicación al caso del Corredor Ferroviario Bioceánico Central permitió comprobar la utilidad del modelo en un sistema altamente complejo. Esta complejidad procede tanto del ámbito geográfico del modelo como de las opciones disponibles.

Se tuvo en cuenta no solamente el tráfico interno del país, sino de los países en al área de afectación del corredor y con los que Bolivia tiene relaciones comerciales. Esto hace que el área geográfica del modelo sea global, aunque los

flujos estudiados se han limitado a aquellos países que mantienen relaciones comerciales significativas con Bolivia. Los análisis llevados a cabo con el modelo permitieron comprobar que dicha amplitud, en cuanto a extensión geográfica se refiere, no supone una limitación a la hora de ejecutar y obtener resultados del modelo de transporte.

Fue posible el establecimiento de los modelos econométricos que representan cómo las exportaciones e importaciones de las mercancías, consideradas en el modelo, van a comportarse en el futuro, además de los flujos internos del país. Para ello fue necesario seleccionar cuáles eran las mercancías fundamentales y las variables de las que dependía la evolución de cada una de ellas. Con esto se pudo emplear el método mixto de generación de matrices O/D y comprobar su funcionamiento, evaluando si lo obtenido se ajustaba a lo que realmente estaba sucediendo, es decir, si los flujos calculados entre los pares O/D se ajustaban a los existentes. Todo esto permitió validar la utilidad del método propuesto: que las matrices O/D finales construidas de esta forma mantenían la estructura de las reales, teniendo en cuenta todos los movimientos existentes.

Por otro lado, se consiguió definir un modelo de elección modal tipo Logit. En particular del tipo Logit Multinomial. Este modelo permitió la obtención de los porcentajes de mercancía captados por cada una de las alternativas consideradas. La importancia del desarrollo del modelo Logit reside en la complejidad del sistema ya que estaba formado por cuatro modos de transporte diferentes, carretera, ferrocarril, hidrovía y marítimo, junto con ocho opciones portuarias posibles. El empleo de simulación de Montecarlo para la generación de una base de datos útil y válida, permitió la estimación del modelo de elección discreta. El modelo de elección ha sido configurado para la alternativa "solo carretera" o "carretera y ferrocarril" para los movimientos dentro del país o con los países vecinos, y la elección combinada entre estas dos alternativas y el puerto de salida para los movimientos internacionales de larga distancia.

Con todo ello fue posible la estimación de los flujos sobre la red, obteniéndose los valores de toneladas-kilometro para todos los escenarios de experimentación planteados, que sirvieron de base a los analistas para definir las características que deberían cumplir la infraestructura y el servicio para conseguir los objetivos de viabilidad marcados.

Los resultados obtenidos fueron consistentes con los datos y la literatura disponibles, además de ser avalados por expertos de relevancia internacional externos al proyecto.

6.3. CASO DE BRASIL.

En cuanto a los resultados del caso de estudio de Brasil se puede concluir que, dentro del proyecto PRODEPRO, se ha podido emplear el modelo para la evaluación de proyectos de diferente naturaleza. No solo ha sido importante haber priorizado estos proyectos, sino que el ámbito de aplicación ha consistido en un extenso ámbito geográfico, con un alto número de variables involucradas. El resultado del análisis ha sido la obtención de los indicadores buscados para el modelo multicriterio de jerarquización de los proyectos.

El ámbito geográfico del modelo desarrollado en este proyecto es menor al de Bolivia ya que los flujos de exportación e importación se han modelado hasta los puertos de entrada y salida. Sin embargo, la resolución geográfica del modelo es mayor ya que, al emplearse las mesorregiones de Brasil como unidad de agregación de carga, hay más de 200 TAZ en el modelo. Esto permite evaluar el funcionamiento del modelo bajo unas condiciones diferentes a las del caso anterior, lo que es especialmente relevante para estudios con alcance nacional.

Este caso de estudio permitió comprobar la utilidad del modelo cuando no se lleva a cabo la elección discreta, sino que se emplea la elección conjunta de modo y ruta, mediante la minimización del mínimo coste generalizado, cuya composición se explicó con anterioridad en la presente tesis. Además, se puede comprobar el funcionamiento del mismo y validarlo con los datos anteriores disponibles.

Con la aplicación del modelo se pudo observar si iban a ser o no utilizados los nuevos proyectos con las características supuestas para cada uno de ellos, el flujo captado, los ahorros de tiempo y el coste del sistema de transporte en los que se traducían su implementación y la población afectada por los mismos. Como se indicó en el apartado del Caso de estudio de Brasil, la priorización de los proyectos se hizo mediante una matriz multicriterio. Los resultados que se han indicado de la experimentación, son algunas de las variables principales de dicha matriz.

Queda comprobada otra de las utilidades de las que se quería dotar al modelo: ser una importante herramienta de apoyo a la toma de decisiones en las políticas de desarrollo en temas de transporte para la función pública o incluso de decisiones de las inversiones cuando se está hablando de la cartera de negocio de una empresa privada.

CAPÍTULO 7. LÍNEAS FUTURAS

El trabajo desarrollado en la presente tesis ha permitido alcanzar la definición completa de un modelo de transporte para mercancías. Este modelo, versátil y fácilmente configurable, permite la planificación de sistemas de transporte y la realización de análisis para la evaluación de infraestructuras o servicios, priorización de inversiones, políticas de transporte, etc. El estudio realizado pone de manifiesto la importancia de los modelos de transporte en la planificación del mismo, en sus diferentes vertientes, como demuestran las múltiples iniciativas por parte de diversos países para llevar a cabo sus propios modelos de transporte o aplicar los existentes.

En la mayoría de los casos la principal limitación a la que se presentan los analistas es la falta de información. Cada día son más los datos recopilados referentes tanto a lo que está más relacionado con la carga movida, generación, tipo, rutas, etc. como a las variables que están directamente relacionadas con el transporte en sí. Aunque el modelo propuesto intenta presentar diferentes alternativas a emplear en función de los datos disponibles, una línea importante sería buscar las herramientas necesarias que permitiesen salvar la limitación de información y establecer un método que permitiese identificar un mínimo indispensable de información con el que se pudiese asegurar la exactitud de los datos disponibles.

En este sentido, el trabajo desarrollado en la presente tesis relativo a la elección de TAZs es una contribución para la resolución del problema. Este trabajo podría ser ampliado considerando otras variables o parámetros necesarios en el modelo.

Por otro lado, el modelo se ha desarrollado para llevar a cabo diferentes análisis obteniendo la mejor opción o el mejor escenario resultante de una experimentación mediante análisis de escenarios. Al estar parametrizado, la aplicación de algoritmos de optimización es directa, aunque esto plantea el problema de decidir qué técnicas de optimización son adecuadas. Una línea que se abre de forma clara en este sentido es la investigación e implementación de una metodología que permita la optimización, ya no tanto de una de nueva infraestructura, sino de un nuevo servicio. La posibilidad de permitir la selección de diferentes rutas, precios o tiempos, configuraría de manera completa un nuevo servicio multimodal optimizado. La importancia creciente que la intermodalidad apoyaría un desarrollo, en el que se podría establecer un criterio

de rentabilidad para el explotador del servicio, o de beneficio social si se trata, sobre todo, de las administraciones públicas.

Otra línea importante sería la investigación en términos medioambientales. En el modelo se ha empleado un método sencillo de cálculo de emisiones basado en consumos y coeficientes de emisiones. A día de hoy cada vez tiene mayor importancia el cálculo de la huella de carbono de los productos que se comercializan. El método de estimación directa de emisiones permite estimar el CO₂ emitido directamente en el transporte y fácilmente aplicable a cada unidad o tonelada de producto transportado.

Pero la huella de carbono de un producto desde producción a venta no está referida únicamente al transporte. Para el cálculo de la huella de carbono es indispensable identificar tres tipos de alcance (Manual de cálculo y reducción de la Huella de Carbono en el sector comercio, 2011):

- Alcance 1: Cálculo de las emisiones directas.
- Alcance 2: Cálculo de las emisiones indirectas debidas, por ejemplo, a consumos de electricidad.
- Alcance 3: El más complicado de establecer. Sería el cálculo de otras emisiones indirectas.

El transporte pertenecería tanto al Alcance 1, cuando se trata de vehículos pertenecientes a la empresa y más fáciles de controlar, como al Alcance 3, vehículos de contratistas. Al formar parte de dos elementos fundamentales, el establecimiento de un método completo, no solo de emisiones directas del vehículo sino de las actividades intermedias necesarias en una cadena multimodal, se daría un gran paso en la determinación de unos valores cada vez más próximos a los reales de la huella que está dejando un producto.

Si lo que se quisiese fuera únicamente conocer la huella de carbono de la empresa de transporte, el estudio quedaría limitado a establecer el Alcance 1 y 2 de la misma (Manual de cálculo y reducción de la Huella de Carbono para actividades de transporte por carretera, 2011b).

La implementación de la herramienta completa de dicho cálculo permitiría no solo conocer el valor de esta huella sino poder optimizar el sistema en función de la misma, pudiendo formar parte de un análisis de beneficio social o multicriterio.

En paralelo a la estudio del modelo se ha desarrollado una aplicación en Java. Siendo la red un elemento fundamental y dependiendo todavía la aplicación de elementos comerciales, será importante seguir trabajando en la línea de la obtención de la información SIG de forma independiente de herramientas comerciales así como la visualización de resultados. Esto podría dar lugar

a una herramienta comercial fácilmente utilizable por analistas no expertos en modelización.

El empleo de sistemas de agentes podría resolver el problema que la elección modal representa en la planificación del transporte. El análisis de este tipo de sistemas, la adecuación al problema y su validación mediante los casos de estudio disponibles abren una línea interesante de trabajo en planificación de transporte.

Cuando se está hablando de transporte de mercancías, las congestiones más importantes se dan en los nodos del sistema. Estas congestiones son un gran problema, no solo por la saturación en dichos nodos, sino porque afectan a la distribución de los flujos en la red y a los riesgos a los que se puede someter a la población cuando lo que se está transportando son mercancías peligrosas.

Casi todos los trabajos en los que se tienen en cuenta retrasos (como ocurre generalmente en los puertos) emplean modelos de colas para la modelización de dichos tiempos. Se ha visto la utilidad que este tipo de modelos tiene en la estimación de tiempos de espera debido a la utilización de la red. Esto plantea la oportunidad que presenta el desarrollo de un modelo combinado entre un modelo de transporte y un modelo de eventos discretos para modelar las congestiones de los nodos intermodales. Estos nodos no solamente van a ser puertos, como se trata en la mayoría de los trabajos de la literatura, sino que se tendrán en cuenta el resto de nodos intermodales como son las terminales ferroviarias u otro tipo de puerto diferente de los marítimos como son los de los ríos navegables o los puertos secos. Por ello se ha implementado una primera aproximación de cálculo.

Una línea importante que se abre en este sentido, es el desarrollo de algoritmos iterativos para la asignación de mercancías con congestión en nodos intermodales. La asignación con congestión requiere procesos de cálculo iterativos ya que la estimación de flujos y porcentajes de ocupación de los modos requiere la ejecución completa del modelo y los tiempos de retraso en los nodos que se usan para la determinación de los porcentajes de reparto modal dependen a su vez de estas ocupaciones. El propio cálculo de rutas óptimas entre pares origen destino que se realiza como paso previo al reparto modal depende de los tiempos de demora en nodos. Por tanto si una variación en los tiempos de demora origina un cambio en la ruta óptima entre un par origen destino se producirá una discontinuidad con respecto a las asignaciones realizadas con los valores anteriores de demoras. Esto conduce a que lograr un algoritmo que sea capaz de converger a la solución de este problema de forma eficiente sea un reto que requiera futuro trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- A Papola, V Marzano. 2004. "Modelling Freight Demand At a National Level: Theoretical Developments and Application to Italian Demand." In *European Transport Conference*. Strasbourg.
- Abdelwahab, Walid M. 1998. "Elasticities of Mode Choice Probabilities and Market Elasticities of Demand: Evidence from a Simultaneous Mode Choice/shipment-Size Freight Transport Model." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 34 (4): 257–66.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554598000143>.
- Abdelwahab, Walid, and Michel Sargious. 1992. "Modelling the Demand for Freight Transport. A New Approach." *Journal of Transport Economics and Policy* 26 (1): 49–70. doi:10.2307/20052965.
- Arunotayanun, Kriangkrai. 2009. "Modelling Freight Supplier Behaviour and Response." Imperial College London.
<http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.505303>.
- Assadipour, Ghazal, Ginger Y. Ke, and Manish Verma. 2015. "Planning and Managing Intermodal Transportation of Hazardous Materials with Capacity Selection and Congestion." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 76 (April): 45–57.
doi:10.1016/j.tre.2015.02.003.
- Banco Interamericano de Desarrollo. 2015. "BR-L1352 : Programa de Apoyo Al Desarrollo Productivo Del Nordeste - PRODEPRO." Accessed July 27. <http://www.iadb.org/es/proyectos/project-information-page,1303.html?id=BR-L1352>.
- Beuthe, Michel, Bart Jourquin, Jean-François Geerts, and Christian Koul à Ndjang' Ha. 2001. "Freight Transportation Demand Elasticities: A Geographic Multimodal Transportation Network Analysis." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 37 (4): 253–66.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1366554500000223>.

- Blauwens, G, and E VAN DE VOORDE. 2014. "THE EVALUATION OF TIME SAVINGS IN COMMODITY TRANSPORT." *International Journal of Transport Economics = Rivista Internazionale de Economia Dei Trasporti* 15 (1). Accessed September 30. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=294515>.
- Bovenkerk, M. 2005. "AET PAPERS - SMILE+: The New and Improved Dutch National Freight Model System." In *European Transport Conference*. Strasbourg.
<http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/2208/confid/11>.
- Bussieck, M. R., T. Winter, and U. T. Zimmermann. 1997. "Discrete Optimization in Public Rail Transport." *Mathematical Programming* 79 (1-3). ELSEVIER SCIENCE BV: 415-44. doi:10.1007/BF02614327.
- Cantillo, Victor, Miguel Jaller, and Jose Holguín-Veras. 2014. "The Colombian Strategic Freight Transport Model Based on Product Analysis." *PROMET - Traffic&Transportation* 26. doi:10.7307/ptt.v26i6.1460.
- Caris, An, Cathy Macharis, and Gerrit K. Janssens. 2011. "Corridor Network Design in Hinterland Transportation Systems." *Flexible Services and Manufacturing Journal* 24 (3): 294-319. doi:10.1007/s10696-011-9106-3.
- Carlo Secchi. 2015. *Atlantic Corridor Work Plan*. Brussels.
http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/doc/2015-05-28-coordinator-work-plans/wp_atl_final.pdf.
- Carrillo, Manuel, Richard Hillestad, Patricia G. J. Twaalfhoven, Joseph G. Bolten, Odette van de Riet, and Warren Walker. 1996. "PACE-FORWARD." RAND Corporation.
http://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR732.html.
- Ceuster, Griet De, Tom Voge, Ming Chen, Martijn de Kievit, James Laird, Andrew Koh, Carlo Sessa, Riccardo Enei, and Roberto Mascellaro. 2010. *FINAL REPORT Trans-European Transport Network Planning Methodology*. LEUVEN, Belgium.
- Chen, Lichun, and Elise Miller-Hooks. 2012. "Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport." *Transportation Science* 46 (1). INFORMS: 109-23. doi:10.1287/trsc.1110.0376.

- Chiang, Yu-Sheng. 1981. *Development of a Policy Sensitive Model for Forecasting Freight Demand: Final Report*. Cambridge Mass.: Massachusetts Institute of Technology Center for Transportation Studies.
- Combes, Francois. 2009. "The Choice of Shipment Size in Freight Transport." Université Paris-Est.
- Council of Supply Chain Management Professionals. 2014. "CSCMP: Council of Supply Chain Management Professionals, Supply Chain Management Definitions." Accessed September 24.
<http://cscmp.org/about-us/supply-chain-management-definitions>.
- Crainic, T G. 1989. "STRATEGIC PLANNING OF FREIGHT TRANSPORTATION: STAN, AN INTERACTIVE GRAPHIC SYSTEM."
<http://trid.trb.org/view.aspx?id=349983>.
- De Jong, G., and H.F. Gunn. 2001. "Recent Evidence on Car Cost and Time Elasticities of Travel Demand in Europe." *Journal of Transport Economics and Policy*. JTEP.
http://eprints.whiterose.ac.uk/2014/2/ITS199_Recent_evidence_on_car_cost_UPLOADABLE.pdf.
- De Jong, Gerard, and Moshe Ben-Akiva. 2007. "A Micro-Simulation Model of Shipment Size and Transport Chain Choice." *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (9): 950–65.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261507000549>.
- De Jong, Gerard, Inge Vierth, Lori Tavasszy, and Moshe Ben-Akiva. 2013. "Recent Developments in National and International Freight Transport Models within Europe." *Transportation* 40 (2): 347–71.
doi:10.1007/s11116-012-9422-9.
- De Jong, G.; Gunn, H.F.; Walker, W. 2004. "National and International Freight Transport Models: An Overview and Ideas for Further Development." *Transport Reviews* 24 (1): 103–24.
- De la Cruz Leiva, José Luis, and Mónica Chao Janeiro. 2011a. "Manual de Cálculo Y Reducción de La Huella de Carbono En El Sector Comercio." Observatorio de la Sostenibilidad en España.
http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual_comercios_final_tcm7-230140.pdf.

- — —. 2011b. "Manual de Cálculo Y Reducción de La Huella de Carbono Para Actividades de Transporte Por Carretera." Observatorio de la Sostenibilidad en España.
http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/servicios/publicaciones/manual_huella_de_carbono_transporte_tcm7-230142.pdf.
- Di Francesco, Massimo, Michela Lai, and Paola Zuddas. 2013. "Maritime Repositioning of Empty Containers under Uncertain Port Disruptions." *Computers & Industrial Engineering* 64 (3): 827–37.
doi:10.1016/j.cie.2012.12.014.
- "ETIS." 2014. Accessed October 16. [http://www.etisplus.eu/data/MetaData/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2fdata%2fMetaData/Documents%2fD6 Report%2d 2010 Database and Methodology&FolderCTID=0x012000EF5BC224F0FDE64C84FA8EBE9BF2C53D&View=%7b71E29534%2d30B6%2d4AF4%2dB9AF%2dDC8582A1A0BC%7d](http://www.etisplus.eu/data/MetaData/Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2fdata%2fMetaData/Documents%2fD6%20Report%2d%202010%20Database%20and%20Methodology&FolderCTID=0x012000EF5BC224F0FDE64C84FA8EBE9BF2C53D&View=%7b71E29534%2d30B6%2d4AF4%2dB9AF%2dDC8582A1A0BC%7d).
- "Europa - RAMON - Classifications Download List." 2014. Accessed October 2.
http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_CLS_DLD&StrNom=NUTS_33&StrLanguageCode=EN.
- European Transport Commission. 2011. "White Paper 2011."
http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/2011_white_paper_en.htm.
- Eurostat. 2014. "Europa - RAMON - Classifications Download List." Accessed October 2.
http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/nomenclatures/index.cfm?TargetUrl=LST_CLS_DLD&StrNom=NUTS_33&StrLanguageCode=EN.
- Fan, Lei, William W. Wilson, and Bruce Dahl. 2012. "Congestion, Port Expansion and Spatial Competition for US Container Imports." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48 (6): 1121–36. doi:10.1016/j.tre.2012.04.006.
- Fierek, Szymon, and Jacek Zak. 2012. "Planning of an Integrated Urban Transportation System Based on Macro – Simulation and MCDM/A Methods." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 54 (October): 567–79.
doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.774.

- Fosgerau, M. 1996. "FREIGHT TRAFFIC ON THE STOREBAELT FIXED LINK." In *TRANSPORTATION PLANNING METHODS. PROCEEDINGS OF SEMINAR E HELD AT THE PTRC EUROPEAN TRANSPORT FORUM, BRUNEL UNIVERSITY, ENGLAND 2-6 SEPTEMBER 1996. VOLUME P404-2*.
<http://trid.trb.org/view.aspx?id=575156>.
- Friedlaender, Ann F., and Richard H. Spady. 1980. "A Derived Demand Function for Freight Transportation." *The Review of Economics and Statistics* 62 (3): 432. doi:10.2307/1927111.
- Friedrich, Hanno. 2010. "Simulation of Logistics in Food Retailing for Freight Transportation Analysis." Karlsruhe.
- Friesz, Terry L., Joel A. Gottfried, and Edward K. Morlok. 1986. "A Sequential Shipper-Carrier Network Model for Predicting Freight Flows." *Transportation Science* 20 (2). INFORMS: 80–91.
<http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/trsc.20.2.80>.
- Friesz, Terry L., Reetabrata Mookherjee, José Holguín-Veras, and Matthew A. Rigdon. 2008. "Dynamic Pricing in an Urban Freight Environment." *Transportation Research Part B: Methodological* 42 (4): 305–24.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261507000756>.
- G de Jong, J Baak, K Ruijs, T Bellemans, D Janssens, G Wets. 2010. "Passenger and Freight Transport in Flanders 2010-2040 Under Three Scenarios." In *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. Glasgow.
<http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/3335/confid/16>.
- Geerts, Jean-Francois, and Bart Jourquin. 2001. "Freight Transportation Planning on the European Multimodal Network The Case of the Walloon Region." *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 1: 91–106.
- Gerard de Jong; Daniel Johnson. 2009. "Discrete Mode and Discrete or Continuous Shipment Size Choice in Freight Transport in Sweden." In *European Transport Conference*. Noordwijkerhout, The Netherlands.
- Groothedde, Bas, Cees Ruijgrok, and Lóri Tavasszy. 2005. "Towards Collaborative, Intermodal Hub Networks." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 41 (6): 567–83.

http://www.researchgate.net/publication/227427183_Towards_collaborative_intermodal_hub_networks_A_case_study_in_the_fast_moving_consumer_goods_market.

- Habibi, Shiva. 2010. "A Discrete Choice Model of Transport Chain and Shipment Size on Swedish Commodity Flow Survey 2004/2005." http://beta.diva-portal.org/smash/record.jsf?dswid=-4703&pid=diva2%3A609739&c=325&language=no&searchType=SIMPLE&query=&aq=%5B%5B%5D%5D&aq2=%5B%5B%5D%5D&aqe=%5B%5D&af=%5B%22personOrgId%3A7953%22%5D&noOfRows=100&sortOrder=publicationType_sort_asc&onlyFullText=false&sf=all&jfwid=-4703.
- Hansen, Chistian Overgard. 2011. "Freight Modelling and Policy Analysis in Denmark." In *Presentation at the CTS-Seminar European and National Freight Demand Models*. Stockholm.
- Hansen, Christian Overgård. 2011. "TenConnect (Trans-Tools Version 2)." In *Presentation at the CTS-Seminar European and National Freight Demand Models*. Stockholm.
- Hensher, D. 2003. "Models of Organisational and Agency Choices for Passenger and Freight-Related Travel Choices: Notions of Inter-Activity and Influence." In *International Conference on Travel Behaviour Research, 10th, 2003, Lucerne, Switzerland*. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1211224>.
- Holguín-Veras, José, Iván Sánchez, Carlos González-Calderón, Iván Sarmiento, and Ellen Thorson. 2011. "Time-Dependent Effects on Parameters of Freight Demand Models." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2224 (-1): 42–50. doi:10.3141/2224-06.
- Holguín-Veras, José, Ellen Thorson, and Juan C. Zorrilla. 2008. "Commercial Vehicle Empty Trip Models With Variable Zero Order Empty Trip Probabilities." *Networks and Spatial Economics* 10 (2): 241–59. <http://link.springer.com/10.1007/s11067-008-9066-7>.
- Holguín-Veras, Jose, Ning Xu, Gerard de Jong, and Hedi Maurer. 2011. "An Experimental Economics Investigation of Shipper-Carrier Interactions in the Choice of Mode and Shipment Size in Freight Transport."

Networks and Spatial Economics 11 (3): 509–32. doi:10.1007/s11067-009-9107-x.

Horn, Mark E. T. 2003. “An Extended Model and Procedural Framework for Planning Multi-Modal Passenger Journeys.” *Transportation Research Part B: Methodological* 37 (7): 641–60.
<http://ideas.repec.org/a/eee/transb/v37y2003i7p641-660.html>.

Ibáñez-Rivas, Nicolás. 2010. “Peer Review of the TRANS-TOOLS Reference Transport Model.” European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies.

JIN, Y, I WILLIAMS, and M SHAHKARAMI. 2005. “Integrated Regional Economic and Freight Logistics Modelling: Results from a Model for the Trans-Pennine Corridor, UK.” *PROCEEDINGS OF ETC 2005, STRASBOURG, FRANCE 18-20 SEPTEMBER 2005 - TRANSPORT POLICY AND OPERATIONS - FREIGHT AND LOGISTICS - FREIGHT MODELLING I*. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=846405>.

Jong, Gerard, Inge Vierth, Lori Tavasszy, and Moshe Ben-Akiva. 2012. “Recent Developments in National and International Freight Transport Models within Europe.” *Transportation* 40 (2): 347–71.
doi:10.1007/s11116-012-9422-9.

Jourquin, Bart, and Michel Beuthe. 1996. “Transportation Policy Analysis with a GIS : The Virtual Network of Freight Transportation in Europe.” *Transportation Research C*.
http://dial.academielouvain.be/handle/boreal:20931?site_name=BOREAL.

K Arunotayanun; J Polak. 2009. “Accounting for Supply Chain Structures in Modelling Freight Mode Choice Behaviour.” In *European Transport Conference*. Noordwijkerhout, The Netherlands.

Kaspi, Mor, and Tal Raviv. 2013. “Service-Oriented Line Planning and Timetabling for Passenger Trains.” *Transportation Science* 47 (3): 295–311. doi:10.1287/trsc.1120.0424.

Kleven, Oskar. 2011. “No Freight Modelling and Policy Analyses in Norway.” In *Presentation at the CTS-Seminar European and National Freight Demand Models*. Stockholm.

- Kreutzberger, Ekki D. 2008. "Distance and Time in Intermodal Goods Transport Networks in Europe: A Generic Approach." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42 (7): 973–93. doi:10.1016/j.tra.2008.01.012.
- Leachman, Robert C., and Payman Jula. 2011. "Congestion Analysis of Waterborne, Containerized Imports from Asia to the United States." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47 (6): 992–1004. doi:10.1016/j.tre.2011.05.010.
- Liedtke, Gernot. 2006. "An Actor-Based Approach to Commodity Transport Modelling /." Universität Karlsruhe.
- Macharis, Cathy, E. Pekin, and A. Caris. 2008. *A Decision Support System for Intermodal Transport Policy*. Asp / Vubpress / Upa. <http://books.google.com/books?id=o8j-x3SNsuwC&pgis=1>.
- Marto Sargento, Ana Lúcia. 2009. "INTRODUCING INPUT-OUTPUT ANALYSIS AT THE REGIONAL LEVEL: BASIC NOTIONS AND SPECIFIC ISSUES." Illinois: Regional Economic Applications Laboratory, University of Illinois. <http://www.real.illinois.edu/pubs/>.
- Maurer, Hedwig Hildegard. 2008. *Development of an Integrated Model for Estimating Emissions from Freight Transport*. http://books.google.es/books/about/Development_of_an_integrated_model_for_e.html?id=ElAjPwAACAAJ&pgis=1.
- McFadden, D, C Winston, and A BOERSCH-SUPAN. 1985. "JOINT ESTIMATION OF FREIGHT TRANSPORTATION DECISIONS UNDER NONRANDOM SAMPLING." *ANALYTICAL STUDIES IN TRANSPORT ECONOMICS*. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=231806>.
- Miller, Harvey J. 2010. "Potential Contributions of Spatial Analysis to Geographic Information Systems for Transportation (GIS-T)." *Geographical Analysis* 31 (4): 373–99. doi:10.1111/j.1538-4632.1999.tb00991.x.
- Ming Chen. 2011. "ETIS and TRANS-TOOLS v1." In *Presentation at the CTS-Seminar European and National Freight Demand Models*. Stockholm. <http://www.slideserve.com/pillan/etis-and-trans-tools-v1-freight-demand>.

- Ministerio de Fomento Gobierno de España. 2003. *Análisis, Información Y Divulgación Sobre La Aportación Del Transporte Por Carretera a La Intermodalidad*. http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/17FBCF00-91E0-4761-A11C-88A16277D8A4/1550/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf.
- NEA, DEMIS, IWW, MKMETRIC, OSC, and TINA Vienna. 2009. *WORLDNET Final Report*. Zoetermeer.
- NEFFENDORF, H, M Wigan, R Donnelly, I Williams, and M COLLOP. 2001. "THE EMERGING FORM OF FREIGHT MODELLING." In *PROCEEDINGS OF THE AET EUROPEAN TRANSPORT CONFERENCE, HELD 10-12 SEPTEMBER, 2001, HOMERTON COLLEGE, CAMBRIDGE, UK - CD-ROM*. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=728921>.
- Novak, DC, and Christopher Hodgdon. 2011. "Nationwide Freight Generation Models: A Spatial Regression Approach." *Networks and Spatial ...* 11 (1): 23–41. doi:10.1007/s11067-008-9079-2.
- Nuzzolo, Agostino, Umberto Crisalli, and Antonio Comi. 2008. "A Demand Model for International Freight Transport by Road." *European Transport Research Review* 1 (1): 23–33. doi:10.1007/s12544-008-0003-0.
- — —. 2013. "An Aggregate Transport Demand Model for Import and Export Flow Simulation." *Transport* 30 (1). Taylor & Francis: 43–54. doi:10.3846/16484142.2013.820215.
- Olga Ivanova; Christophe Heyndrickx;Karel Spitaels;Lori Tavasszy, Walter Manshanden, Maaïke Snelder ;Olaf Koops. 2007. *RAEM Version 3.0*. Leuven, Belgium.
- Ortúzar, J, and L. G Willumsen. 2011. *Modelling Transport*. Edited by John Wiley&sons. 4th ed. Chichester, West Sussex.
- Oum, Tae Hoon. 2014. "ALTERNATIVE DEMAND MODELS AND THEIR ELASTICITY ESTIMATES." *Journal of Transport Economics and Policy* 23 (2). Accessed September 30. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=306795>.
- Pazour, Jennifer A., Russell D. Meller, and Letitia M. Pohl. 2010. "A Model to Design a National High-Speed Rail Network for Freight Distribution."

Transportation Research Part A: Policy and Practice 44 (3): 119–35.
doi:10.1016/j.tra.2009.11.006.

Pekin, Ethem, An CARIS, Thomas Crépin, Cathy Macharis, Bart Jourquin, and Gerrit JANSSENS. 2008. "Integrated Decision Support Tool for Intermodal Freight Transport." In *Nectar Cluster Meeting on Freight Transport and Intermodality*. Delft, the Netherlands.

Quandt, Richard E., and William J. Baumol. 1966. "THE DEMAND FOR ABSTRACT TRANSPORT MODES: THEORY AND MEASUREMENT†." *Journal of Regional Science* 6 (2): 13–26.
<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9787.1966.tb01311.x>.

S Newton. 2008. "AET PAPERS - WORLDNET: Applying Transport Modelling Techniques to Long Distance Freight Flows." In *European Transport Conference*. Noordwijkerhout, Netherlands.
<http://abstracts.aetransport.org/paper/index/id/2839/confid/14>.

Samimi, A, A Mohammadian, and K Kawamura. 2010. "Freight Microsimulation in the U.S." In *TRANSPORT CHICAGO CONFERENCE*. Chicago.

Schuschny, Andrés Ricardo. 2005. *Tópicos Sobre El Modelo E Insumo-Producto: teoría Y Aplicaciones*. Santiago de Chile.
<http://www.cepal.org/deype/>.

Sean Newton. 2001. "Freight Mode Choice on the Cross-Channel Market." In *THINK-UP Workshop 9*. Rotterdam.

SIGNIFICANCE; NEA;DEMIS. 2010. *Schatting BASGOED, Rapportage DP1*. The Hague, Netherlands.

Sokolowski, John A., and Catherine M. Banks. 2010. *Modeling and Simulation Fundamentals*. Edited by John A. Sokolowski and Catherine M. Banks. *Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.
doi:10.1002/9780470590621.

SteadieSeifi, M., N.P. Dellaert, W. Nuijten, T. Van Woensel, and R. Raoufi. 2014. "Multimodal Freight Transportation Planning: A Literature

- Review." *European Journal of Operational Research* 233 (1): 1–15.
doi:10.1016/j.ejor.2013.06.055.
- Tan, Zhijia, Wan Li, Xiaoning Zhang, and Hai Yang. 2015. "Service Charge and Capacity Selection of an Inland River Port with Location-Dependent Shipping Cost and Service Congestion." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 76 (April): 13–33.
doi:10.1016/j.tre.2015.01.009.
- Tavasszy, L S, MJM VAN DER VLIST, C J Ruijgrok, B GROOTHEDDE, and H Van Der Rest. 1999. "SCENARIO-WISE ANALYSIS OF TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEMS WITH A SMILE." In *World Transport Research: Selected Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research*. <http://trid.trb.org/view.aspx?id=639545>.
- Tavasszy, L.A., B. Smeenk, and C.J. Ruijgrok. 1998. "A DSS For Modelling Logistic Chains in Freight Transport Policy Analysis." *International Transactions in Operational Research* 5 (6): 447–59.
<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-3995.1998.tb00128.x>.
- Tavasszy, Lorant A. 1994. *Characteristics and Capabilities of Dutch Freight Transportation System Models*. Leiden: RAND Corporation.
http://www.rand.org/pubs/monograph_reports/MR382.html.
- Tavasszy, Lóránt, Michiel Minderhoud, Jean-François Perrin, and Theo Notteboom. 2011. "A Strategic Network Choice Model for Global Container Flows: Specification, Estimation and Application." *Journal of Transport Geography* 19 (6): 1163–72.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966692311000524>.
- Tetraplan, A/S. 2009. *TENCONNECT*. Copenhagen.
http://ec.europa.eu/transport/wcm/infrastructure/studies/2009_12_ten_connect_final_report.pdf.
- TNO M&L (The Netherlands). 2006. *TRANS-TOOLS, Deliverable 6: TRANS-TOOLS Final Report*. http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201003/20100304_172116_94411_TRANSTOOLS - Final Report.pdf.
- Vold, Arild; Jean-Hanse, Viggo. 2007. *PINGO: A Model for the Prediction of Regional and Interregional Freight Transport in Norway*. Edited by

Norwegian Center for Transport Research Institute of Transport Economics. Oslo.

Wang, Qian, and Jose Holguin-Veras. 2009. "Tour-Based Entropy Maximization Formulations of Urban Freight Demand." In *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*.
<http://trid.trb.org/view.aspx?id=881020>.

Winston, Clifford. 1981. "A Disaggregate Model of the Demand for Intercity Freight Transportation." *Econometrica* 49 (4). Econometric Society: 981–1006. <http://ideas.repec.org/a/econ/emetrp/v49y1981i4p981-1006.html>.

Wong, K.I., S.C. Wong, C.O. Tong, W.H.K. Lam, H.K. Lo, H. Yang, and H.P. Lo. 2010. "Estimation of Origin-Destination Matrices for a Multimodal Public Transit Network." *Journal of Advanced Transportation* 39 (2): 139–68. doi:10.1002/atr.5670390203.

ZHONG, Ming, John Douglas HUNT, and John Edward ABRAHAM. 2007. "Design and Development of a Statewide Land Use Transport Model for Alberta." *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology* 7 (1): 79–89.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570667207600105>.

Zondag, Barry, Pietro Bucci, Padideh Gützkow, and Gerard de Jong. 2010. "Port Competition Modeling Including Maritime, Port, and Hinterland Characteristics." *Maritime Policy & Management* 37 (3). Routledge: 179–94. <http://dx.doi.org/10.1080/03088831003700579>.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas y desventajas de modelos de producción y atracción.....	28
Tabla 2: Modelos gravitacionales de distribución.....	29
Tabla 3: Modelos de distribución que no emplean el método gravitacional..	29
Tabla 4: Modelos de reparto modal.	32
Tabla 5: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de modelos.....	33
Tabla 6: Tipos de modelos de asignación, ventajas y desventajas.....	33
Tabla 7: Modelos desarrollados en Europa hasta 2004.....	34
Tabla 8: Modelos de transporte desarrollados en Europa hasta 2002.	35
Tabla 9: Modelos de transporte desarrollados en Europa entre 2004 y 2012.	36
Tabla 10 : Proyectos en los que se ha empleado el modelo Logis.....	46
Tabla 11: Elementos de la cadena logística tenidos en cuenta en cada uno de los modelos (1).....	50
Tabla 12: Elementos de la cadena logística tenidos en cuenta en cada uno de los modelos (2).....	51
Tabla 13: Elementos decisores de los modelos logísticos.....	53
Tabla 14: Resultado de las diferencias entre distancias.....	70
Tabla 15: Alternativas disponibles en el modelo.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Corredor Atlántico y sus nodos. Fuente: Atlantic Corridor Work Plan. (http://ec.europa.eu/transport/themes/infrastructure/news/doc/2015-05-28-coordinator-work-plans/wp_atl_final.pdf).....	4
Figura 2 : Ejemplo de relación entorno y sistema de transporte.....	18
Figura 3: Modelo clásico de las cuatro etapas (Ortúzar and Willumsen 2011).	27
Figura 4: Esquema de TRANSTOOLS.....	44
Figura 5: Modelo de Fan, Wilson, y Dahl (2012).	55
Figura 6: Ciclo de funcionamiento del modelado (Sokolowski and Banks 2010).	63
Figura 7: Elementos principales de la modelización.	66
Figura 8: Matriz de distancias a nivel departamental.	69
Figura 9: Matriz de distancias nivel provincial.	69
Figura 10: Matriz de distancias desagregada basada en valores agregados. .	69
Figura 11: Porcentaje de la diferencia entre distancias respecto a la calculada con TAZs desagregadas.....	70
Figura 12: Modelo de distribución.	80
Figura 13: Modelo de minimización.	82
Figura 14: Alternativa solo carretera.....	84
Figura 15: Alternativa no_carretera.	85
Figura 16: Alternativa multimodal completa.	85
Figura 17: Asignación a la red.	94
Figura 18: Modelo conceptual completo.....	100
Figura 19: Implementación del modelo para el caso de Bolivia.....	103
Figura 20: Implementación del modelo para el caso de Brasil.....	104
Figura 21: Propuesta de CFBC.....	106
Figura 22: Modelo de transporte de CFBC.....	107
Figura 23: Red completa del modelo, detalle de Bolivia.....	109

Figura 24: Red fundamental de carreteras de Bolivia (Fuente: Administradora Boliviana de carreteras).....	110
Figura 25: Red de ferrocarriles boliviana y sus conexiones con los países limítrofes. De Allen Morrison en Ferropedia publicado bajo los términos de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 3.0 Unported.	111
Figura 26: Trazado de la hidrovía Paraguay-Paraná (Fuente: http://www.alainet.org/es/active/81181).....	111
Figura 27: Modelo completo de transporte para la evaluación de corredor ferroviario.....	115
Figura 28: Generación de los modelos econométricos.	118
Figura 29: Representación de producciones de diferentes mercancías.....	118
Figura 30: Departamentos de Bolivia.	120
Figura 31: Flujos de mercancía entre pares origen destino para la alternativa carretera.....	128
Figura 32: Flujos de mercancía entre pares origen destino para la alternativa multimodal carretera-ferrocarril.	129
Figura 33: Ejemplo de asignación a la red de mercancía contenedorizada... 131	
Figura 34: Ejemplo de asignación a red, modelo completo.....	131
Figura 35: Detalle de asignación a la red, producto agrícola.	132
Figura 36: Detalle de asignación, mercancía manufacturada.....	132
Figura 37: Regiones de Brasil (Fuente: www.embajadadebrasil.org).	134
Figura 38: Pasos del modelo de Brasil.....	136
Figura 39: Red del modelo de la región NE de Brasil, sin carreteras.	138
Figura 40: Red de carreteras de la región NE de Brasil.....	139
Figura 41: Generación de las matrices origen-destino del modelo de PRODEPRO.....	141
Figura 42: Mapa de proyectos considerados, amarillo.....	145
Figura 43: Asignación de mercancía ganadera a la red de la zona NE de Brasil.	147
Figura 44: Asignación mercancía agrícola en la región NE de Brasil.....	147
Figura 45: Detalle asignación mercancía manufacturada en Maranhão.....	148
Figura 46: Detalle asignación estado de Ceará.....	148