



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**Trabajo Fin de Máster
CURSO 2016/17**

*MODELO DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS
PARA PRIORIZACIÓN DE INVERSIONES EN
INFRAESTRUCTURAS*

Máster en Ingeniería Industrial

ALUMNO

Roi Sánchez Tutor

TUTORAS/ES

Diego Crespo Pereira

Rosa Ríos Prado

FECHA

FEBRERO 2017



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster

CURSO 2016/17

*MODELO DE TRANSPORTE DE MERCANCÍAS
PARA PRIORIZACIÓN DE INVERSIONES EN
INFRAESTRUCTURAS*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

MEMORIA

Resumen

En este trabajo se ha realizado un extenso estudio relacionado con la planificación de transporte para servir de herramienta para la priorización de inversiones en infraestructuras. En particular, este trabajo está centrado en los sistemas de transporte multimodales para el movimiento de mercancías.

Mediante la aplicación de una metodología específica para el caso de estudio propuesto, el cual está enmarcado dentro de un proyecto internacional, se ha logrado el desarrollo de un modelo de transporte de mercancías sumamente completo, que permite la evaluación de distintos sistemas de transporte desde múltiples puntos de vista.

Dicho trabajo es realmente complejo, sobre todo debido a la dificultad de obtener los datos necesarios para lograr los objetivos propuestos y también a causa de la existencia de diferentes alternativas de modos de transporte, así como de distintos criterios de asignación que han de ser tenidos en cuenta para obtener resultados útiles.

Asimismo, este modelo de transporte tiene como objetivo principal el uso del mismo como herramienta de simulación; para así obtener distintos resultados al plantear diferentes escenarios e hipótesis.

Índice:

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 4 |
| 1. Introducción..... | 6 |
| 1.1 El transporte: una necesidad esencial..... | 6 |
| 1.2 El transporte hoy en día..... | 6 |
| 1.3 El transporte en el futuro..... | 10 |
| 2. Objetivos..... | 13 |
| 3. Antecedentes..... | 15 |
| 3.1 Introducción..... | 15 |
| 3.2 Modelos de transporte..... | 16 |
| 3.2.1 Planificación de transporte multimodal de mercancías..... | 18 |
| 3.2.2 Modelización agregada de la demanda de mercancías..... | 21 |
| 3.2.3 Modelización desagregada de la demanda de mercancías..... | 22 |
| 3.2.4 Aspectos prácticos..... | 23 |
| 3.3 Modelos desarrollados en Europa..... | 23 |
| 4. Metodología..... | 26 |
| 4.1 Introducción: descripción general del modelo..... | 26 |
| 4.2 Modelo de las cuatro etapas..... | 30 |
| 4.2.1 Primera etapa: Modelos econométricos de producción y atracción..... | 30 |
| 4.2.2 Segunda etapa: Modelos econométricos para distribución de carga..... | 38 |
| 4.2.3 Tercera etapa: Modelo de reparto modal..... | 39 |
| 4.2.4 Cuarta etapa: Asignación a la red..... | 46 |
| 4.3 Características del modelo..... | 48 |
| 4.3.1 Elementos del modelo..... | 48 |
| 4.3.2 Necesidades del modelo..... | 50 |
| 4.3.3 Estructura del modelo..... | 52 |
| 4.4 Modelo conceptual..... | 54 |
| 4.4.1 Zonas de análisis de tráfico..... | 57 |
| 4.4.2 Categorías de mercancías..... | 59 |
| 4.5 Implementación del modelo..... | 60 |
| 4.6 Experimentación y resultados buscados..... | 72 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.6.1 | Validación del modelo | 72 |
| 4.6.2 | Resultados esperados..... | 73 |
| 5. | Experimentación y resultados..... | 75 |
| 5.1 | Etapa de producción y atracción | 75 |
| 5.2 | Etapa de distribución | 78 |
| 5.3 | Etapa de reparto modal | 79 |
| 5.4 | Etapa de asignación | 79 |
| 5.5 | Resultados obtenidos | 82 |
| 6. | Conclusiones y futuras líneas de investigación | 89 |
| 6.1 | Conclusiones | 89 |
| 6.2 | Futuras líneas de investigación..... | 90 |
| | Bibliografía | 92 |
| | Índice de tablas | 95 |
| | Índice de figuras | 96 |

1. Introducción

1.1 El transporte: una necesidad esencial

A lo largo de los años, la movilidad humana se ha convertido en una necesidad vital. Desde siempre, la supervivencia humana y la interacción social dependió de la habilidad de las personas para desplazarse ellas mismas y las mercancías necesarias.

El conjunto de infraestructuras y servicios cuyo funcionamiento coordinado define el sistema de transporte en cualquier sociedad representa una pieza esencial para la economía moderna. De hecho, gran parte del incremento del bienestar personal y material que hemos alcanzado en los últimos cincuenta años puede explicarse por el continuo avance y mejora de los sistemas de transporte, tanto en su dotación física y distribución territorial como en sus procedimientos de gestión e implementación práctica.

Como señala Campos Méndez & Socorro Quevedo (2010), aunque es muy probable que a lo largo del siglo XXI este papel de motor del desarrollo sea asumido progresivamente por las tecnologías de la información y la comunicación, el transporte seguirá manteniendo, sin duda alguna, una posición dominante en nuestra sociedad.

1.2 El transporte hoy en día

En términos generales, la industria del transporte representa alrededor del 7% del PIB comunitario y proporciona cerca del 5% del empleo en la Unión Europea, cifras que se estiman estables durante los próximos años. Se trata no sólo de una importante industria en sí misma, sino también de un elemento de cohesión social que contribuye sobremanera al correcto funcionamiento de la economía europea en su conjunto. La movilidad de personas y mercancías es un componente esencial de la naturaleza de la Unión Europea, y como tal tiene reconocido el carácter de derecho esencial de los ciudadanos. Por otra parte, es conveniente destacar la influencia que tiene la economía de un país en las redes de transporte, la cual provoca una serie de consecuencias que afectan directamente a la congestión del tráfico señaladas en la siguiente figura:

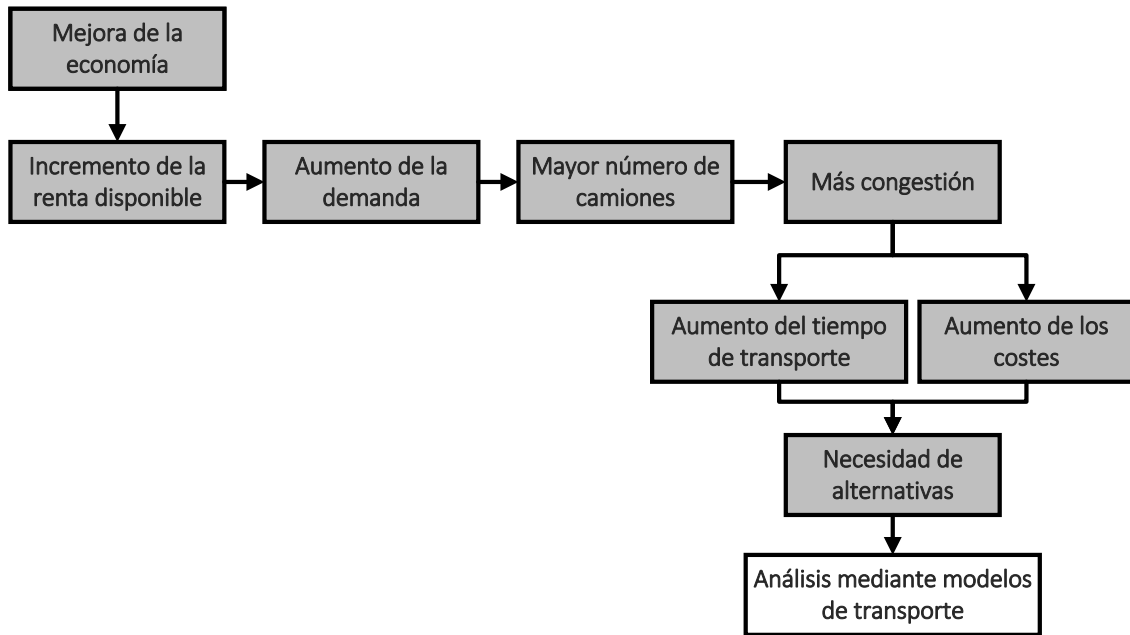


Figura 1: Consecuencias de los cambios en la economía en las redes de transporte

Asimismo, el sector del transporte juega un rol crucial en cuanto al consumo mundial de energía, siendo este del 26% del total mundial de acuerdo con la International Energy Agency (2011). Por otra parte, prácticamente la totalidad de esta energía demandada por la industria del transporte proviene de fuentes de petróleo (diésel y gasolina). Una consecuencia de esta dependencia según Ribeiro, Kobayashi, & Beuthe (2007) es que las emisiones de CO₂ son directamente proporcionales al consumo de energía por lo que el efecto invernadero y por tanto, el calentamiento global sea un importante perjuicio para el planeta. Otro factor que ha impulsado enormemente las emisiones de carbono a la atmósfera es el aumento de tamaño, peso y potencia de los vehículos motorizados. Aunque la eficiencia de los motores de dichos medios ha mejorado debido a los continuos avances tecnológicos en el sector, muchos de los beneficios que suponen estas mejoras han sido destinados al aumento del tamaño y potencia de los motores en detrimento de mejorar la eficiencia del combustible. Por ejemplo, tal y como apunta Heavenrich (2005), la Agencia Americana de Protección del Medio Ambiente ha declarado que la mejora en la eficiencia de los combustibles de la flota de los vehículos ligeros estadounidenses podría ser un 24% mayor si la potencia de los motores se mantuviese como la existente en el año 1987. En vez de esto, durante este periodo, la motorización de estos vehículos se ha vuelto un 27% más pesada y un 30% más rápida. En otras palabras, si tanto potencia como tamaño se mantuviesen constantes, el ahorro en consumo de combustibles derivados del petróleo habría aumentado más de un 1% por año.

En consecuencia, la tendencia actual debe estar centrada en buscar 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. Dicho fenómeno consiste en la transferencia de personas y de mercancías utilizando diferentes modos de transporte. El actual sistema resulta poco funcional dada la enorme dependencia del transporte por carretera que existe.

Llegados a este punto cabe destacar la diferencia entre intermodalidad y multimodalidad, términos habitualmente usados indistintamente:

- La multimodalidad hace referencia al transporte de mercancías basado en el uso de dos o más modos de transporte, cubierto por un contrato de transporte multimodal. Excepto el transporte por carretera, el resto de modos suele formar parte de cadenas multimodales de transporte.
- Dentro del transporte multimodal, la intermodalidad se basa en el transporte de mercancías en una misma unidad de transporte o vehículo que va cambiando de modo, lo que evita la manipulación de la mercancía durante el transbordo. La unidad de transporte intermodal (UTI) es el contenedor, caja móvil o semirremolque adecuado técnicamente para su manipulación.

En la siguiente figura se muestra gráficamente la diferencia entre ambos términos:

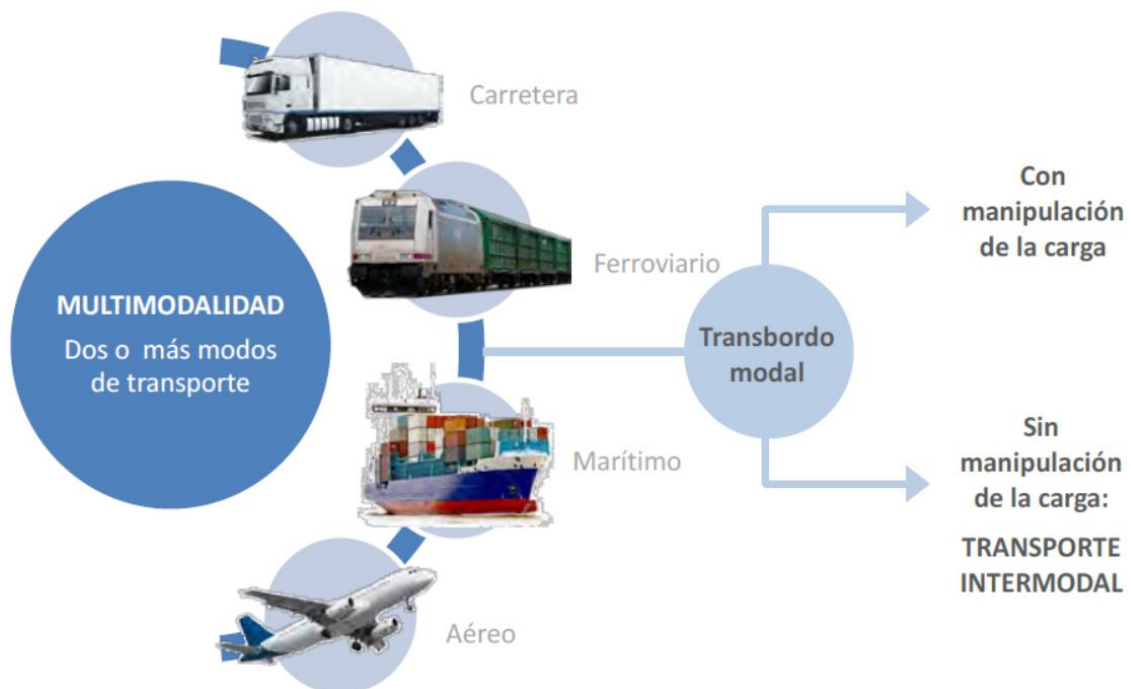


Figura 2: Multimodalidad e intermodalidad. (Ministerio de Fomento (2016))

En el traslado de mercancías es habitual el uso del transporte terrestre en algunas de las etapas del viaje de los productos desde su origen hasta su lugar de destino. Y en el transporte de pasajeros, ya sea dentro de la ciudad como en áreas urbanas y en largas

o cortas distancias, la dependencia del automóvil es muy grande. Una red de transportes intermodal, con una rápida combinación entre los diferentes medios, en la que el desplazamiento de un lugar a otro se pueda realizar de una manera cómoda y eficaz supondría unas mejoras en lo social y en la calidad de vida de los ciudadanos, pero, además, una reducción de costes y una rentabilización económica de los recursos dedicados al transporte.

Teniendo en cuenta el último Libro Blanco del Transporte (2011) de la Comisión Europea, 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 destacan las siguientes: 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, modernizar las reglas del transporte intermodal de mercancías peligrosas para que aseguren la interoperabilidad entre modos y 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 la relevancia de la intermodalidad, ya que los proyectos prioritarios tienen en cuenta todos los medios de transporte alternativos a la carretera.

Tal y como publicó el Ministerio de Fomento en 2016, en el transporte interurbano de viajeros, los vehículos ligeros constituyen los medios de transporte más empleados en el desplazamiento de personas, acaparando en 2014 el 78,2% de toda la movilidad en España. A los desplazamientos en vehículos ligeros hay que sumarles los del autobús (9,6%), lo que totaliza un 88% de cuota modal total de la carretera en la movilidad de personas (medida en viajeros-km). Los otros dos modos significativos son el ferrocarril (6,2%) y el modo aéreo (5,8%). En 2014 los desplazamientos en ferrocarril superan a los de los viajeros aéreos domésticos en un 6,2%, consolidando un cambio que ya se había producido en 2013 pero con menor intensidad.

En la siguiente figura se muestran gráficamente los resultados comentados anteriormente:

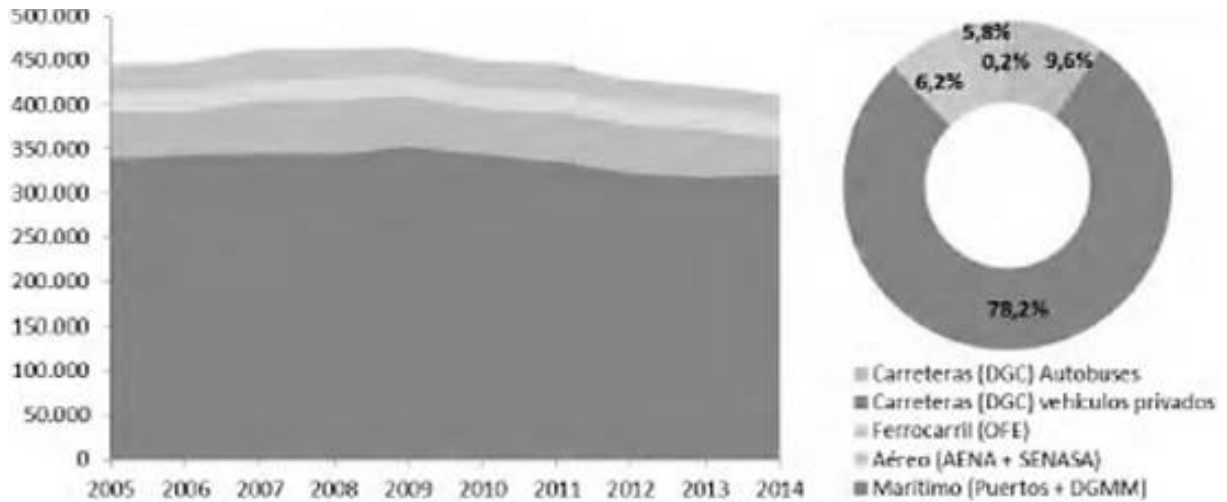


Figura 3: Evolución del reparto modal en España. (Ministerio de Fomento (2016))

1.3 El transporte en el futuro

Atendiendo a la importante tendencia en el crecimiento de la industria del transporte de los últimos años, parece seguro que esta se seguirá desarrollando y aumentando en los próximos tiempos.

Sin embargo, la demanda del tipo de transporte y la forma mediante la cual esta es satisfecha dependerá de varios factores:

En primer lugar, no está claro que la industria de los combustibles derivados del petróleo sea siendo dominante en este sector. Existe una importante controversia sobre cuando el combustible de diésel y gasolina decaiga y su consumo deje de ser el prioritario en la industria del transporte. Por otra parte, debido a la aparición de otros combustibles como el gas natural, hidrógeno o electricidad hacen que este debate tome especial relevancia en los próximos años.

En segundo lugar, la tasa de crecimiento depende en gran medida de lo que suceda en países como China o India. Si la industrialización de estas naciones se desarrolla tal y como promete, no cabe duda de que la demanda del transporte en estas regiones aumentará desmesuradamente. También es muy influyente la futura situación de los países latinoamericanos y africanos. Incluso en el escenario más conservador de desarrollo industrial y, por tanto, económico, se espera un considerable aumento en la demanda de transporte.

También será tremendamente influyente la evolución de la tecnología en el sector del transporte: la eficiencia energética de los diferentes modos de transporte, la tecnología del automóvil y sus combustibles, así como los costes asociados a estos avances conformarán la situación futura del transporte a nivel mundial. Por ejemplo, aunque la implantación de los trenes híbridos está totalmente asentada en mercados como el japonés y estadounidense, su potencial reducción en costes marcará su desarrollo en otros mercados.

Por otra parte, a medida que crezcan los ingresos en los países desarrollados, las infraestructuras destinadas principalmente al transporte privado aumentarán rápidamente, aunque existen sendas excepciones como los sistemas desarrollados en Curitiba y Bogotá consistentes en la construcción de una rápida y eficiente red para el transporte público mediante autobús.

Por último es conveniente señalar los hitos que ha marcado la Comisión Europea (2011) con motivo de llevar a cabo “una política de transportes moderna e inteligente que contribuya también a la sostenibilidad ambiental y la creación de ciudades inteligentes” para los próximos décadas:

1. Reducir a la mitad los coches convencionales (dependientes del petróleo) en los entornos urbanos para 2030 y eliminarlos en las ciudades para 2050.
2. Utilizar un 40% de combustibles sostenibles en aviación y reducir en un 40% las emisiones de CO₂ en el sector marítimo.
3. Traspaso modal del 30% de las mercancías transportadas por carretera (de distancias superiores a 300 km) a los modos ferroviario y marítimo para 2030, y del 50% para 2050.
4. Triplicar la longitud de la red de alta velocidad ferroviaria para 2030 y completar la Red Básica de la Red Transeuropea de Transporte.
5. Establecer para 2050 conexiones multimodales entre todos los aeropuertos de la Red Básica y la red ferroviaria, entre los puertos de la Red Básica y la red ferroviaria de mercancías y donde sea posible los de navegación interior.
6. Desarrollar la infraestructura y sistemas de gestión de tráfico para los diversos modos (SESAR (Single European Sky ATM Research) para 2020), así como desarrollar los programas Galileo, ERTMS (European Rail Traffic Management System), ITS (Intelligent Transportation Systems), VTIMS (Vessel Traffic Information Management System) y RIS (River Information System).
7. Establecer un sistema europeo de pago, gestión e información de transporte multimodal para 2020.
8. Disminuir a la mitad las muertes por accidentes de tráfico para el 2020 y dejarlas a cero en 2050.

9. La completa aplicación de los principios “quien contamina paga” y “quien usa paga” para generar ingresos.
10. Asegurar la financiación para futuras inversiones y el mantenimiento de las infraestructuras de transporte.

2. Objetivos

El presente trabajo está enmarcado dentro del área de los modelos de planificación de transporte y su aplicación, de tal manera que el principal objetivo de dicho estudio consiste en la obtención de un modelo de transporte de mercancías con una arquitectura flexible y reconfigurable, que permita su adaptación a diferentes objetivos de análisis con el fin de evaluar inversiones en infraestructuras.

Como indican Ortuzar & Willumsen (2011), el alcance de un modelo depende del contexto de la toma de decisiones. De esta manera, se indica que las necesidades y alcance de un modelo cuyo objetivo es una planificación estratégica, táctica u operacional presentan gran diferencia. En este estudio se persigue formular 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.

Para acometer esto, tal y como señalan Ortuzar & Willumsen (2011), la mejor opción es recurrir al modelo clásico de las 4 etapas (generación, distribución, reparto modal y asignación). Sin embargo, en muchos de los estudios realizados hoy en día no es necesario el empleo de dichas etapas y el problema se aborda desde diferentes puntos de vista en función de las peculiaridades de cada proyecto.

El modelo desarrollado en este trabajo deberá, por tanto, cubrir los siguientes objetivos:

- Evaluaciones de planes de infraestructuras: Planificación estratégica para la gestión y priorización de inversiones en un plan de transporte.
- 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.

Para realizar este trabajo y comprobar la utilidad del modelo de transporte de mercancías, así como de la consecución de los objetivos que se han fijado, se ha realizado una experimentación a partir de un caso práctico consistente en el análisis de una red de transporte enmarcado en un proyecto internacional con el gobierno de Bolivia. Debido a la confidencialidad del proyecto, no se publicarán determinados datos y resultados.

Se puede apreciar de forma gráfica lo comentado anteriormente en la siguiente figura:

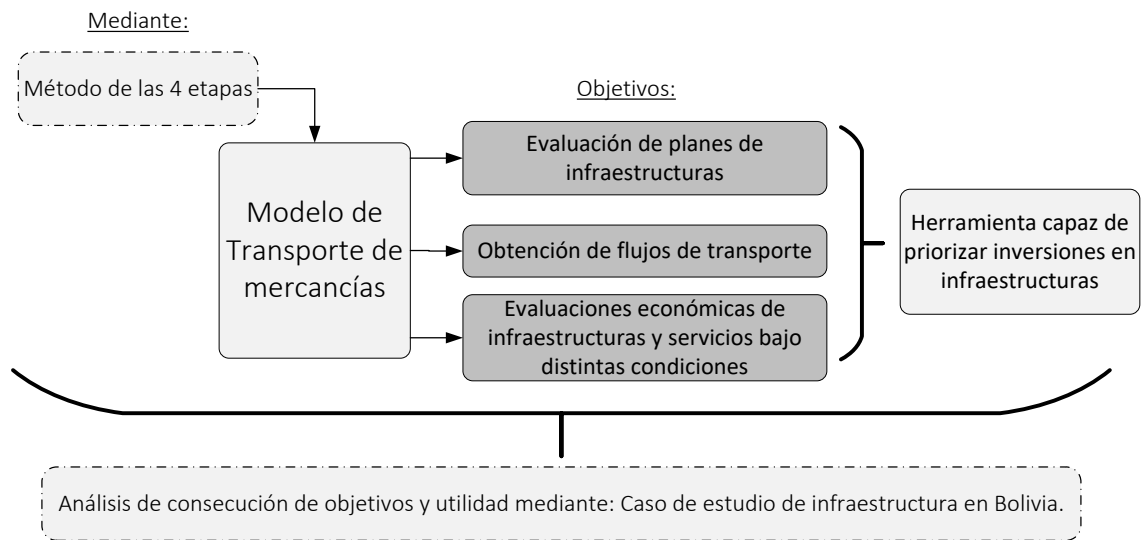


Figura 4: Objetivos del estudio

3. Antecedentes

3.1 Introducción

Dentro de la importancia que tiene el transporte dentro de la economía de un país, el movimiento de mercancías destaca especialmente ya que representa los movimientos de importación y exportación, así como los movimientos interregionales, los cuales son un motor básico para el desarrollo económico para un país.

Según Ortuzar & Willumsen (2011), el movimiento de mercancías no es algo sencillo. Su complejidad radica en la cantidad de agentes y factores que lo conforman. Por lo tanto, para su representación se hace necesario un modelo que tenga en cuenta todos estos elementos, así como las relaciones que se establecen entre ellos. Por otra parte, autores como Holguín-Veras et al. (2011), coinciden en que en el sector del transporte de mercancías, en el cual los comportamientos subyacentes de los distintos factores influyentes no son usualmente conocidos y los datos son difíciles de obtener, el desarrollo de modelos suele ser un objetivo ciertamente elusivo. Así, señalan que la falta de modelos de transporte de mercancías apropiados suele ser debido a la falta de equilibrio entre conocimiento y datos.

Además, hay que tener en cuenta que el movimiento de mercancías implica más actores que el movimiento de viajeros. De esta manera, existen empresas industriales que envían y reciben mercancías, agentes que organizan las entregas y los modos de transporte, transportistas que mueven las mercancías, y muchos otros operadores que organizan el transbordo, almacenamiento y servicios de aduana. En algunos casos coinciden dos o más de ellos, por ejemplo, los operadores por cuenta propia, aunque siempre existen objetivos contrapuestos que son realmente difíciles de modelizar en detalle en la práctica. 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.

En cuanto a los factores que intervienen en el movimiento de mercancías y que, por tanto, serán de severa importancia para el desarrollo del modelo, destacan los reflejados en la tabla siguiente:

Tabla 1: Factores que intervienen en el movimiento de mercancías

| Factor | Descripción |
|---------------------|--|
| Localización | Distinta procedencia de materias primas y productos intermedios |
| Cadenas productivas | Existe una gran variedad de productos requeridos y producidos, incluso esta es mayor que la segmentación de la de la demanda por tipo de persona y propósito de viaje |
| Físicos | Las características y la naturaleza de las materias primas y de los productos finales influyen en la forma en que pueden transportarse. Por lo tanto, existe una mayor variedad de tipos de vehículos para transportar diferentes clases de mercancías que en el caso del transporte de viajeros |
| Operativos | El tamaño de la empresa, su política de distribución, su dispersión geográfica, etc. tienen fuerte influencia en el posible uso de diferentes modos y estrategias de transporte |
| Geográficos | La localización y la densidad de la población pueden influir en la distribución de los productos finales |
| Dinámicos | Las variaciones estacionales en la demanda y en los gustos de los consumidores juegan un papel importante en el cambio de los patrones de movimiento de mercancías |
| Tarifarios | Al contrario que en el caso de la demanda de viajeros, las tarifas normalmente no se publican porque son mucho más flexibles y sujetas a negociaciones |

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 Ortuzar & 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.

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, así como 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 por lo tanto sientan las bases para la obtención de soluciones de los datos de futuro.
5. Predecir valores de futuro de las 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 nacional 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 con 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 varias de estas etapas.

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 a un destino es muy habitual que la carga pase por diferentes medios de transporte.

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 u operacional.

3.2.1.1 Problemas de planificación estratégica

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

SteadieSeifi, Dellaert, Nuijten, Van Woensel, & Raoufi (2014) detectaron una serie de limitaciones a las que es necesario hacer frente. Dichas limitaciones están relacionadas, principalmente, con las características de los nodos de consolidación de carga.

La primera de ellas tiene que ver con las congestiones que se pueden producir en los nodos de consolidación o de intercambio modal, debido a las capacidades de los mismos. Es importante tener esto en cuenta ya que así se podrá limitar el uso de los nodos más congestionados y permitir una distribución más equilibrada de flujos sobre la red.

Asimismo, en los nodos de transbordo se producen importantes retrasos que se traducen en costes, además de los propios costes asociados a dichas operaciones o incluso tasas del nodo (como por ejemplo tasas portuarias).

Nuzzolo, Crisalli, & Comi (2013) desarrollaron un modelo de planificación estratégica mediante la estimación de flujos internacionales de importación y exportación. Se busca el objetivo de caracterizar los flujos de mercancías mediante su origen y destino, periodo temporal, tipo de mercancía y modo de transporte. Para ello emplearon modelos de generación, distribución y reparto modal de la carga. De esta manera, caracterizaron la red en tiempo y coste, lo que permitió el ajuste del modelo de reparto modal. Para los tiempos tuvieron en cuenta el tiempo en movimiento y en caso de la carretera, el tiempo

de paradas o descansos. Para el transporte combinado emplearon, tanto para coste como para tiempo, una distribución estadística que es 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. De igual forma, una cadena de costes y tiempo completa darían mayor precisión al sistema.

Muchos otros estudios se centran en movilidad urbana, como el realizado por Fierek, Szarata, & Zak (2012), en el cual se tienen en cuenta diferentes medios de transporte y, mediante el desarrollo de un modelo de las 4 etapas y modelos de elección multicriterio se evalúa la mejor opción.

En el caso de mercancías, la unidad de transporte se complica, tanto por la naturaleza de la mercancía en sí (la cual, por ejemplo, no admite cualquier tipo de empaquetado y almacenaje) como de las cantidades movidas y el tamaño de los envíos. En esta línea está enfocado el trabajo realizado por Holguín-Veras (2002), en el cual se señala que la selección modal se ve afectada por la cantidad de envío y viceversa, siendo necesaria la consideración conjunta de ambos aspectos. Además, existirá una cantidad óptima de pedido, relacionada con el coste de transporte total y que, por tanto, dependerá del modo de transporte elegido.

3.2.1.2 Problemas de planificación táctica

Los problemas de planificación táctica consisten en buscar el punto óptimo de utilización de una infraestructura. Para ello se eligen los servicios y medios de transporte planificando tanto itinerarios como frecuencias.

SteadieSeifi et al. (2014) caracterizaron un servicio mediante un origen, un destino, terminales intermedias, modo de transporte, ruta y capacidad. De la misma forma, el modo de transporte se caracteriza por su capacidad de carga, velocidad y 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:

- 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. En la mayoría de los trabajos, se ha detectado la falta de integración de la gestión de los recursos (contenedores, vehículos, tripulaciones, etc.), ya que muchas veces se realizan estudios de planificación de forma independiente de los servicios a los que están directamente ligados.

La metodología empleada para la resolución de estos problemas comprende desde algoritmos heurísticos o metaheurísticos a modelos de simulación. Aquellos estudios que emplean simulación pueden llegar a suponer altos requerimientos computacionales y de información, pues estos suelen contar con un alto nivel de agregación. Por otro lado, se encuentran los de optimización, con menor nivel de agregación, pero mayor rapidez en la generación, evaluación y selección de las estrategias propuestas.

El modelo que se desarrollará comparte objetivos con los modelos de simulación en cuanto al análisis de inversiones en infraestructuras, de manera que se ha puesto especial interés en la revisión de aquellos estudios en los que se hayan empleado modelos de transporte aplicando simulación.

En esta línea se encuadra el trabajo desarrollado por Caris, Macharis, & Janssens (2011), cuyo objetivo consiste en el diseño de una red intermodal de transporte. Este modelo estudia el transporte intermodal por barcaza como un todo para demostrar los beneficios de cooperación entre medios. La metodología llevada a cabo permite analizar el impacto de las medidas tomadas para estimular la cooperación entre terminales interiores.

Por otra parte, Chen & 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 este modelo se tuvieron en cuenta diferentes medios de transporte (camión, ferrocarril y transporte marítimo).

Burgholzer, Bauer, Posset, & Jammerneegg (2013) llevaron a cabo un modelo de transporte enfocado en la intermodalidad de las redes de transporte usando micro-simulación. Los resultados suponen una herramienta valiosa para la toma de decisiones de empresas de transporte para hacer uso de la infraestructura menos vulnerable y económicamente sostenible. Para demostrar la aplicabilidad del modelo, analizaron la red de transporte intermodal austríaca y mostraron las secciones críticas que se pueden detectar mediante dicho modelo.

3.2.1.3 Problemas de planificación operativa

Este tipo de problemas se centran en la elección del mejor servicio, teniendo en cuenta los distintos modos e itinerarios. Este tipo de problemas presentan un nivel de dificultad superior a los estratégicos y tácticos debido al dinamismo y aleatoriedad normalmente asociados a este tipo de planificación.

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. Por esta razón, este tipo de problemas no se centra tanto en una minimización de coste, si no en la continua maximización de la fiabilidad del sistema.

De manera general, este tipo de problemas se pueden agrupar en dos tipos (SteadieSeifi et al. 2014):

- Organización de recursos: centrados en las distribuciones de recursos sobre la red.
- Planteamiento de itinerarios: enfocados en la optimización en tiempo real de las planificaciones de rutas y horarios.

Kaspi & Raviv (2013) desarrollaron un modelo de planificación de línea y de horarios. Este fue formulado con el objetivo de minimizar el tiempo total que el pasajero pasa en el ferrocarril y los costes operacionales asociados. Hicieron uso de algoritmos metaheurísticos para la resolución del modelo. 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 de operación.

Di Francesco, Lai, & Zuddas (2013) plantearon el problema que representa la reubicación de los contenedores vacíos en las redes marítimas bajo las interrupciones que se pueden dar en el puerto. Los autores emplean un enfoque de programación estocástica, con lo que se tiene en cuenta la naturaleza incierta del problema.

Algunas limitaciones que se han encontrado en estudios operacionales previos que tienen que ver con que el intercambio modal no suele tenerse en cuenta. Tampoco se han explorado en profundidad la asignación de recursos multi-activos. Asimismo, tampoco se suelen considerar tanto los tiempos de transbordo ni la capacidad de las terminales, las cuales han sido tenidas en cuenta en el presente estudio.

3.2.2 Modelización agregada de la demanda de mercancías

La gran mayoría de los modelos de demanda de mercancías que se han aplicado en la práctica son del tipo agregado (Van es, 1982; Friesz et al., 1983; Harker, 1985). Estos estudios siguen la metodología clásica de las 4 etapas con algunas adaptaciones específicas para cada uno.

Un ejemplo muy típico es el trabajo realizado por Kim y Hinkle (1982), los cuales emplearon el American Urban Transport Planning Suite (UTPS) con algunas modificaciones para modelizar el movimiento de mercancías estatales. De forma general, esta metodología comprende lo siguiente:

- La estimación de la generación y atracción de mercancías por zonas.

- La distribución de los volúmenes generados con el fin de satisfacer las restricciones de generación y atracción.
- El reparto de los distintos viajes calculados entre los distintos modos de transporte.
- La asignación de los movimientos origen-destino a la red viaria.

Esta será la base del método empleado para el desarrollo del modelo de transporte de mercancías llevado a cabo en este estudio. Se profundizará en las características de dicho procedimiento en el [capítulo 4](#).

3.2.3 Modelización desagregada de la demanda de mercancías

Desde que se desarrollaron los modelos de elección discreta y su aplicación para modelizar la demanda de viajeros, la idea de ampliarlos para incluir los movimientos de mercancías ha tomado gran relevancia.

En el caso de mercancías, la demanda de transporte se analiza bajo la óptica de realizar un número de envíos individuales, cada uno con sus propias características para los cuales el agente que organiza el transporte tiene que tomar un número determinado de decisiones. Cada decisión se contempla como una elección de un conjunto discreto de alternativas. En cada caso existen un número de elecciones relacionadas, como puede ser, por ejemplo: transportar x toneladas en el tiempo t del producto k mediante el modo de transporte m desde el origen i hasta el destino j . Posteriormente, el transportista tiene que elegir la ruta más apropiada para llevar a cabo esta tarea.

La flexibilidad general de los modelos de elección discreta permite la construcción de funciones de utilidad muy generales. Pueden incluir, entre otras, lo siguiente:

- Las características de los servicios de transporte: tarifas, tiempos, fiabilidad, daños y pérdidas, pedidos mínimos, etc.
- Los atributos de los bienes transportados: tipo de producto, relación volumen/peso, relación valor/peso, carácter perecedero del producto...
- Las características del mercado: precios relativos, tamaño de empresas, disponibilidad de instalaciones de carga y descarga, infraestructura general.
- Los atributos de la empresa agente de carga, es decir, su nivel de producción, precios de venta, localización, instalaciones de infraestructura disponibles, política de almacenamiento, etc.

Se ha encontrado que el enfoque desagregado tiene poca aplicación a escala nacional. Las principales razones son el conocimiento más limitado de todos los elementos implicados en el desarrollo de estas funciones de utilidades y grandes esfuerzos necesarios en la recogida de datos para estimar esta clase de modelos.

Sin embargo, su aplicación a submercados o mercancías particulares puede proporcionar ideas muy valiosas para la formulación de políticas. Por ejemplo, Ortúzar (1989) utilizó datos de preferencias declaradas para examinar la cuestión de ofrecer un nuevo servicio para el transporte marítimo de carga.

3.2.4 Aspectos prácticos

A pesar de los esfuerzos realizados en los últimos años, la modelización del transporte de mercancías se ha desarrollado menos de lo que lo ha hecho la de demanda de pasajeros. La vanguardia en investigación y desarrollo parece estar en la prognosis de la demanda de viajeros; mientras que, en el transporte de carga, se está tratando de adaptar los modelos a sus necesidades particulares.

Los problemas de recopilación de datos pueden agravarse en el caso del transporte de mercancías. Por ejemplo, para el enfoque desagregado la recogida de datos está sujeta a la confidencialidad y fiabilidad. Incluso para la modelización agregada, la recolección de datos representa un esfuerzo mucho mayor que en el caso de pasajeros debido a la gran dispersión de empresas y a las variaciones diarias y estacionales.

Asimismo, son limitadas las oportunidades de realizar entrevistas a la orilla de la carretera. En algunos casos, como en los viajes internacionales, puede ser ventajoso recoger datos en aduanas o utilizar la información de las hojas de ruta de los conductores.

3.3 Modelos desarrollados en Europa

A continuación, se describen los principales modelos que se han desarrollado en Europa.

La revisión realizada ha sido extraída de dos trabajos de referencia: por un lado el realizado por de Jong et al. (2013), en el cual se presentan los principales modelos de transporte de mercancías a nivel nacional e internacional llevados a cabo desde el 2004. Por otra parte, SteadieSeifi et al. (2014) realizaron una revisión de la literatura existente referente al transporte multimodal desde el año 2005. Estos se centraron en los distintos tipos de planificación (estratégica, táctica y operativa).

La mayoría de los modelos emplean el modelo clásico de las 4 etapas. Estos se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tabla 2: Modelos desarrollados en Europa. (de Jong et al. (2013))

| 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. Modelo Input-Output y modelos de elección desagregados | |
| Alemania | TEM (Transport Economics Models) SMILE (Strategic Models for Integrated Logistic Evaluation) | |
| Reino Unido | STEMM (Strategic European Multi-modal Modelling) | |
| Europa | SCENES (Scenarios for European Transport) NEAC | |

A continuación, se desarrolla cada uno de ellos con mayor profundidad:

Tabla 3: Modelos desarrollados en Europa. (de Jong et al. (2013))

| 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 Escenario red transeuropea Escenario solo tren en el TEN-T |
| Forecast 2020 | NEAC | 1995 2000 2010 2020 | Escenario de referencia Escenario de integración rápida Escenario de política sostenible |
| ASTRA | ASTRA system dynamic model | 2000-2026 | Mejora de seguridad en 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 model | 1995 2020 | Escenario externo junto a custo escenarios de costes (constante, básico, tendencia observada y radical) |
| EXPEDITE | EXPEDITE meta model | 1995 2005 2010 2015 2020 | Escenario de referencia y variaciones de 15 políticas de transporte de mercancías |

4. Metodología

4.1 Introducción: descripción general del modelo

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 el diseño de políticas de transporte.

Debido a la complejidad de los sistemas de transporte, habitualmente se adopta un proceso jerárquico para llevar a cabo su planificación (Bussieck, Winter, and Zimmermann (1997)). Este proceso comienza con la definición de la red de transporte finalizando con la definición de todas las características del medio de transporte.

En primer lugar, es necesario localizar los puntos de origen y destino de todos los posibles fletes. Además, han de ser identificados todos los posibles medios de transporte que estos fletes pueden emplear, y, además, por cada uno de ellos, sus costes y tiempos ya que son las razones principales en las que se basa el fletador para elegir el medio más atractivo. Cuando se trata además de transporte multimodal, como es el caso que nos ocupa, es necesario localizar e identificar también las terminales de intercambio modal, como pueden ser los puertos o las terminales ferroviarias.

La siguiente figura muestra la interrelación existente entre los elementos principales del modelo de transporte:

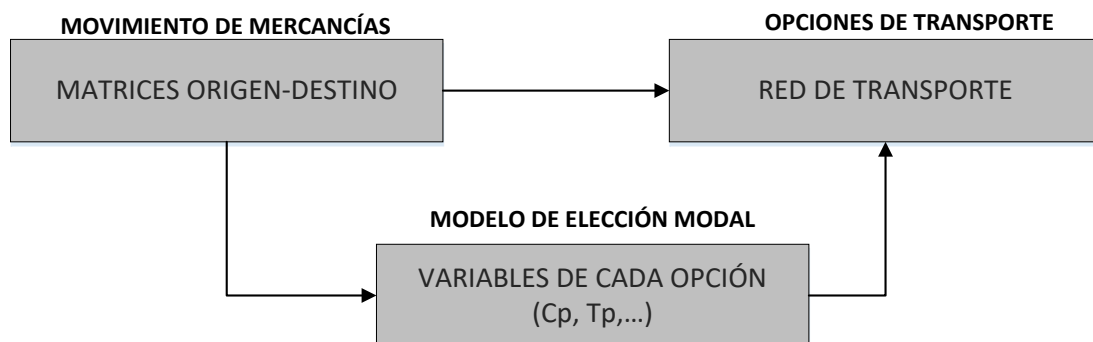


Figura 5: Relación entre los principales elementos del modelo de transporte

Dichos elementos se clasifican, principalmente, en los siguientes tipos:

- Datos de entrada: Los datos son introducidos al modelo en forma de matrices Origen-Destino, que representan los movimientos de bienes y/o personas entre las zonas de influencia (TAZ (Transport Analysis Zone)). Estos datos de entrada son el resultado de la fase de recopilación de la información previa.
- Variables del modelo de carga y modelos de pasajeros: Las variables fundamentales de todo modelo de transporte son: costes, tiempos y frecuencias de transporte de cada una de las alternativas de transporte incluidas en la red.

Otras variables, como la fiabilidad del modo de transporte también pueden ser incorporadas en caso de disponer de datos.

Hay un amplio conjunto de metodologías que permiten dar respuesta a los problemas de transporte, y por lo tanto a su evaluación económica, aunque muchas de estas aproximaciones siguen pasos análogos en su desarrollo (Horn, 2003).

Las metodologías de modelado de este tipo de sistemas parten del modelo clásico de las cuatro etapas de amplio uso en la planificación de transporte (Ortúzar y Willumsen 2011). Aunque dicho método de las cuatro etapas ha sido ampliamente empleado en el transporte de pasajeros, muchos autores plantean que puede ser empleado de forma satisfactoria para el transporte de mercancías. Pero a pesar de ello, cada uno de los pasos del modelo puede adoptar una forma muy alejada de las empleadas para pasajeros. Por ejemplo, una de las más importantes diferencias que existen entre ambos medios de transporte es la cantidad de decisores implicados en el transporte (de Jong, G.; Gunn, H.F.; Walker 2004). Para el transporte de pasajeros la elección 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 consta de los siguientes pasos (con sus modelos particulares):

- **Producción y atracción (etapa de generación):** 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 a la red:** 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 (por ejemplo, TEU, contenedor estándar de 20 pies).

Además de la transformación en vehículos que se ha indicado, existen otra serie de transformaciones que tendrán que ser tenidas en cuenta y evaluadas con cuidado, como puede ser la transformación de unidades físicas en unidades monetarias.

En la siguiente figura se aprecia la estructura del modelo de las 4 etapas de forma gráfica:

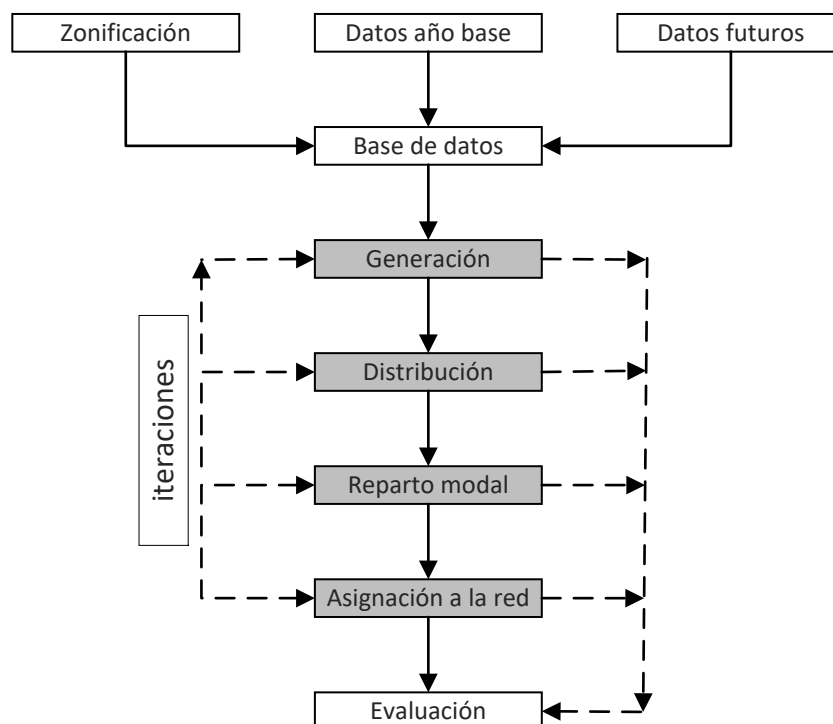


Figura 6: Modelo clásico de las 4 etapas. (Ortúzar and Willumsen 2011)

Se ha hecho uso del software de planificación de transporte TransCAD para llevar a cabo el estudio. TransCAD es un sistema de información geográfica (SIG) diseñado para profesionales de transporte con el objetivo de almacenar, mostrar y analizar datos de transporte.



Figura 7: Software empleado para desarrollar el modelo. (www.caliper.com)

A diferencia de los demás paquetes informáticos de transporte, combina en una sola plataforma integrada las propiedades de un SIG y las capacidades de modelación del transporte. Este software permite modelar todos los modos de transporte y a cualquier escala geográfica o nivel de detalle. TransCAD proporciona:

- Una poderosa plataforma SIG con extensiones específicas para modelos de transporte.
- Herramientas de análisis diseñadas para el transporte, mapeo y visualización.
- Aplicaciones para módulos de creación de rutas, previsión de la demanda de viajes, transporte público, logística y gestión del territorio.

TransCAD extiende los tradicionales modelos de datos SIG para incluir los datos objeto de los estudios de transporte tales como:

- Redes de transporte
- Matrices
- Rutas y sistemas de ruta
- Datos con referencias lineales

Estas extensiones convierten a TransCAD en una de las mejores herramientas de análisis para trabajar con datos de transporte.

Se han comprobado las metodologías existentes a nivel mundial para la construcción de este tipo de modelos y se ha definido la metodología más apropiada para los objetivos finales del estudio, y para los condicionantes de información existentes.

En concreto, el modelo se ha planteado como una extensión de los clásicos modelos de transporte en cuatro etapas adaptándolo a la complejidad del caso considerado. En este caso se requiere la modelización de flujos de transporte de diferentes características (productos mineros, productos agrícolas, etc.), con distancias de viaje muy diversas (desde el transporte regional de corta distancia hasta el transporte internacional de larga distancia a regiones como Asia o Europa) y con un horizonte de planificación muy largo (de hasta 50 años). Por todo ello, la integración de todos los elementos del modelo con una estructura lógica adecuada que garantice la validez de los resultados obtenidos constituye un gran reto desde el punto de vista de las metodologías de planificación de transporte.

A continuación, se entrará en detalle y se explicará cada etapa del modelo clásico por separado, junto con los modelos específicos de cada etapa.

4.2 Modelo de las cuatro etapas

4.2.1 Primera etapa: Modelos econométricos de producción y atracción

Tienen por objeto la estimación de las cantidades producidas y consumidas de producto en cada una de las zonas de análisis del modelo. Normalmente interesa trabajar en unidades físicas de producto (bien en toneladas o en unidades de volumen según el tipo de mercancía transportada), aunque en algunos modelos se trabaja con unidades monetarias (debido a limitaciones en la disponibilidad de datos o circunstancias particulares) y posteriormente se realiza la transformación a unidades físicas.

La siguiente tabla muestra los principales tipos de modelos usados en la práctica (Jong *et. al.* (2012)):

Tabla 4: Ventajas y desventajas de modelos de producción y atracción (Jong et. al. (2012))

| TIPO DE MODELO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--------------------------------------|---|---|
| REGRESIÓN Y SERIES TEMPORALES | Requerimientos limitados de datos Permiten modelar tráfico internacional y regional | Poco conocimiento de la causalidad y, el alcance limitado de los efectos de políticas Variabilidad de los coeficientes a largo plazo |
| DINÁMICA DE SISTEMAS | Requerimientos limitados de datos Se pueden incluir efectos externos y de políticas | No hay test estadísticos de los valores de los parámetros No permiten modelar tráfico regional |
| TASAS DE VIAJES ZONALES | Requerimientos limitados de datos | 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 | Asunciones restrictivas si hay coeficientes fijos Necesita conversión de valores a toneladas Se necesitan identificar los flujos de importación y exportación No es adecuado para modelar tráfico regional |

Los modelos más 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 et al. 2008).

El mayor inconveniente asociado al empleo de estos modelos es que, a largo plazo, sus coeficientes tienden a variar y no se pueden asumir estables (Holguín-Veras, Sánchez, 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 explicadas 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 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 (Jong et al., 2012).

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 es limitada.

Por último, los modelos de insumo producto (Input-Output) han sido adoptados en algunos modelos como el belga o el 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 Marto Sargento (2009). Por otro lado, requieren grandes cantidades de datos de entrada que suele ser difícil de 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.

En consecuencia, tras la revisión bibliográfica referente a los modelos concernientes a la primera etapa, se ha decidido usar como metodología de ajuste la regresión por mínimos cuadrados generalizados teniendo en cuenta los posibles efectos de autocorrelación temporal y espacial en las muestras de datos. La forma funcional será determinada como parte del análisis.

En cualquier caso, la regresión se realizará mediante modelos lineales en los que se consideran tres posibles transformaciones:

Tabla 5: Tipos de transformación de datos para análisis por regresión

| Tipo de transformación de los datos | Descripción |
|-------------------------------------|--|
| Modelo lineal | Predictores introducidos de forma directa sin transformación |
| Modelo potencial | Linealización tomando logaritmos. Es el modelo más adecuado atendiendo a la relación de indicadores económicos con producción/consumo. |
| Series diferenciadas de datos | Para variables que presentan comportamiento no estacionario. |

De forma general, en la mayoría de los trabajos se considera el PIB de la zona considerada como un indicador de la producción y para el consumo, la población del área. Pero como se ha indicado con anterioridad, es necesario establecer un conjunto mayor de variables con el fin de obtener unos modelos de proyección mejor ajustados y más realistas.

Se diferenciará la estimación de los grupos de mercancía específicos de las categorías de productos generales ya que los primeros dependerán de factores particulares de cada sector mientras que los segundos (por su naturaleza diversa) serán relacionados fundamentalmente con la evolución general de la economía.

Este análisis se basará en los estudios sectoriales disponibles, las entrevistas con los productores y las variables socioeconómicas recopiladas. Además, los datos recopilados en las entrevistas con transportistas por carretera o ferrocarril serán empleados para validación de los resultados o estimación en función de la disponibilidad real de datos.

A continuación, se especifican las variables propuestas para ser empleadas en cada modelo de regresión. En la notación se emplean los subíndices siguientes:

- t : Índice de año.
- m : Índice de tipo de mercancía.

- i : Índice de TAZ.
- k : Índice de departamento.

Para cada grupo de productos es necesario modelar seis variables:

- La producción local en toneladas $P_{t,m,i}$.
- La producción exportada al resto de Bolivia $ERB_{t,m,i}$.
- El consumo local en toneladas $C_{t,m,i}$.
- El consumo local de producción importado del resto de Bolivia $IRB_{t,m,i}$.
- La importación del exterior de Bolivia en toneladas $IE_{t,m,i}$.
- La exportación al exterior de Bolivia en toneladas $EE_{t,m,i}$.

Desde el punto de vista global de Bolivia, debe verificarse el balance entre las variables anteriores:

$$P_{t,m} + I_{t,m} = C_{t,m} + E_{t,m}$$

En cada TAZ debe verificarse la ecuación de balance:

$$P_{t,m,i} + IRB_{t,m,i} + IE_{t,m,i} = C_{t,m,i} + ERB_{t,m,i} + EE_{t,m,i}$$

Por tanto, los modelos de producción y generación de carga no necesitan estimar todas las variables de la ecuación anterior, sino un conjunto de variables suficiente para completar el conjunto de las 6 variables estimadas respetando las ecuaciones de balance.

La metodología que se propone sigue los siguientes pasos: por un lado, se analizarán los productos primarios (mineros, agrícolas y extracción vegetal) y por otro los productos manufacturados ya que en ambos hay diferencias en el comportamiento del mercado.

Productos minerales

1. Estimar mediante regresión las **exportaciones totales $E_{t,m}$ del país** para los principales productos minerales. La fuente de datos para exportaciones será la **base de datos de comercio exterior** del INE. Como regresores se emplearán:
 - a. **PIB de los países de destino**
 - b. **Precios en mercado internacional**
2. Estimar el **consumo** total de minerales en Bolivia a partir de los modelos de regresión del consumo $C_{t,m}$. En los datos históricos se analizará la diferencia entre producción total y exportaciones para determinar $C_{t,m} = P_{t,m} - E_{t,m}$, ya que para estos productos $I_{t,m} = 0$. Se usarán como regresores:
 - a. **PIB de Industria Manufacturera**
3. Proyectar las producciones futuras a partir de la suma de las exportaciones y los consumos proyectados $P_{t,m} = C_{t,m} + E_{t,m}$.
4. Desagregar la producción total de cada producto entre TAZs en base al **% de producción de cada mina**.
5. El consumo total será desagregado entre TAZs a partir de los resultados de las **entrevistas con cargadores** y otros estudios sectoriales que se localicen. El

objetivo es determinar dónde se ubican las plantas de transformación mineral en las que se procesan estos productos mineros.

Productos agrícolas

El principio que se sigue para modelar la evolución de la producción agrícola del país parte de estimar la demanda dada por las exportaciones y el consumo interno. Paralelamente se estima la capacidad de producción boliviana a partir del crecimiento de la superficie agrícola y el rendimiento agrícola. De esta manera, si se observa que el crecimiento de la demanda supera la capacidad de crecimiento de la producción propia se detecta la necesidad de importar el producto en cuestión. En el caso de las producciones agrícolas, es importante tener en cuenta esta restricción física a la producción.

1. Estimar mediante regresión los consumos totales del país $C_{t,m}$. Para ello se emplearán como regresores:
 - a. Población
 - b. Renta per cápita
2. Estimar mediante regresión las **exportaciones totales $E_{t,m}$ del país** para los principales grupos de productos agrícolas exportados (ej: Soja). Como regresores se emplearán:
 - a. PIB de los países de destino
 - b. Precios en mercado internacional
3. Estimar mediante regresión la capacidad de producción de Bolivia a partir de la superficie agrícola y el rendimiento agrícola $Pmax_{t,m}$. Regresores del modelo:
 - a. Superficie agrícola
 - b. Rendimiento agrícola
4. Obtener las **producciones e importaciones** de cada producto agrícola a partir de las ecuaciones de balance.
 - a. Si la capacidad de producción $Pmax_{t,m}$ es mayor a la demanda, entonces $P_{t,m} = C_{t,m} + E_{t,m}$.
 - b. Si no, $P_{t,m} = Pmax_{t,m}$ y $I_{t,m} = C_{t,m} + E_{t,m} - P_{t,m}$.
5. Desagregar la producción total de cada producto entre TAZs en base a:
 - a. El **% de superficie cultivada de cada municipio**.
6. Desagregar el consumo de productos agrícolas entre TAZs en base a:
 - a. El **% de población** de cada municipio.

Productos de extracción vegetal (madera)

1. Estimar mediante regresión las **exportaciones totales $E_{t,m}$ del país**. Como n en los modelos de regresión se emplearán:
 - a. PIB de los países de destino
 - b. Precios en mercado internacional
2. Estimar mediante regresión los **consumos totales del país $C_{t,m}$** . Para ello se emplearán como regresores:
 - a. PIB del sector de la construcción (principal fuente de demanda de la madera).

3. Estimar las **importaciones totales** del país. En este caso se proyectan las importaciones de madera de forma independiente ya que puede darse el caso de que haya una demanda nacional de variedades de madera que no es producida localmente. Se emplearán como regresores:
 - a. PIB del sector de la construcción (principal fuente de demanda de la madera).
4. Estimar la **producción total** a partir de la ecuación del balance: $P_{t,m} = C_{t,m} + E_{t,m} - I_{t,m}$.
5. Desagregar las producciones por municipio a partir del % de extracción vegetal de cada municipio.
6. Desagregar los consumos por municipio a partir del % de contribución al PIB del sector construcción por cada municipio. Alternativamente, a falta de este dato, se empleará el % de contribución de cada municipio al PIB o a la renta nacional.

Combustibles

1. Estimar mediante regresión los **consumos totales del país** $C_{t,m}$. Para ello se emplearán como regresores:
 - a. PIB del sector de transporte.
 - b. Renta per cápita.
 - c. Parque motor total de Bolivia.
2. Estimar las **exportaciones totales** $E_{t,m}$ **del país**. Como regresores en los modelos de regresión se emplearán:
 - a. PIB de los países de destino
 - b. Precios en mercado internacional
3. Estimar la **producción total** del país a partir de las estadísticas oficiales de producción o, a falta de datos, de las entrevistas a productores o estudios sectoriales específicos que proporcionen este dato.
4. Estimar las importaciones a partir de la ecuación de balance: $P_{t,m} = C_{t,m} + E_{t,m} - I_{t,m}$.
5. Desagregar las producciones a nivel de TAZ en base a las **ubicaciones de refinерías**.
6. Desagregar los consumos en base a la **población municipal**.

Productos manufacturados

Dada la escasa disponibilidad de datos con la que se cuenta debido a que el INE no dispone de datos detallados sobre producción de productos manufacturados, se seguirá la metodología aquí propuesta:

1. Estimar mediante regresión las **exportaciones totales de productos manufacturados** $E_{t,m}$ **del país**. Como regresores en los modelos de regresión se emplearán:
 - a. PIB de los países de destino
2. Estimar mediante regresión las **importaciones de productos manufacturados totales** $I_{t,m}$ **del país**. Como regresores en los modelos de regresión se emplearán:
 - a. PIB de Bolivia

- b. Población de Bolivia
3. Desagregar las importaciones y exportaciones a nivel departamental a partir de los históricos de la base de datos de comercio exterior. Con ello se obtienen $E_{t,m,k}$ e $I_{t,m,k}$.
4. Desagregar las importaciones de nivel departamental a municipal a partir del % **de renta de cada municipio**.
5. Desagregar las exportaciones de nivel departamental a municipal a partir del % **de contribución al PIB de cada municipio**.

Resto de producciones y consumos de carga

Las estadísticas oficiales de producción y consumo del INE no son completas en el sentido de que no permiten conocer el total de toneladas producidas y consumidas en Bolivia. Los registros oficiales permiten estimar la producción en valor por sectores, pero no se dispone de un cómputo global de las toneladas de carga generadas y consumidas. Desde el punto de vista del modelo de transporte, la variable de mayor interés no es el valor de la mercancía generada sino las toneladas de mercancía transportada.

Por ello, para completar el modelo de generación y atracción de carga, se plantea este último paso cuyo objetivo es completar los totales de carga de los pasos anteriores estimando el resto de mercancías no incluidas anteriormente.

Los pasos seguidos son:

1. Determinar el total de mercancía producida y consumida en Bolivia sumando las siguientes contribuciones:
 - a. Total de toneladas transportadas recogidas en las estadísticas sobre **transporte aéreo**.
 - b. Total de toneladas transportadas recogidas en las estadísticas de los **operadores ferroviarios**.
 - c. Total de toneladas transportadas recogidas en las estadísticas sobre **transporte fluvial**.
 - d. Inferencia de las toneladas transportadas totales a partir de los conteos realizados en este estudio y recopilados de otras fuentes. Se estimará el **total de toneladas movidas por carretera** a partir de los **flujos de vehículos de carga** tomando como ratio de conversión **toneladas/vehículo** la media que resulte de las entrevistas a los cargadores.
2. Estimar la *producción restante* PR_t como la diferencia entre el total de mercancía P_t estimada con este método y la suma de los totales de producción estimados en los apartados anteriores $P_{t,m}$. Repetir lo mismo con los consumos.
3. Desagregar la *producción restante* PR_t entre TAZs de acuerdo a los siguientes pasos:
 - a. A partir de las **matrices OD levantadas de carga** (ver la sección siguiente sobre [distribución](#)), estimar un modelo de regresión para la producción total estimada $P_{t,i}^*$ de una TAZ en función de los siguientes regresores:

- i. PIB del municipio.
 - ii. Empleo del municipio.
 - iii. Nº de industrias del municipio.
 - iv. Superficie agrícola del municipio.
- b. Estimar la *producción restante* de la TAZ $PR_{t,i}$ como el total de *producción restante* desagregado entre municipios proporcionalmente a la diferencia entre la producción total estimada del municipio y la producción estimada en los apartados previos:

$$PR_{t,i} = PR_t \cdot \frac{\max(P_{t,i}^* - \sum_m P_{t,m,i}, 0)}{\sum_i (\max(P_{t,i}^* - \sum_m P_{t,m,i}, 0))}$$

4. Desagregar el *consumo restante* CR_t entre TAZs de acuerdo a los siguientes pasos:
- a. A partir de las **matrices OD levantadas de carga** (ver la sección siguiente sobre [distribución](#)), estimar un modelo de regresión para el consumo total estimada $C_{t,i}^*$ de una TAZ en función de los siguientes regresores:
 - i. Población del municipio.
 - ii. Renta del municipio.
 - b. Estimar el *consumo restante* de la TAZ $CR_{t,i}$ como el total de *consumo restante* desagregado entre municipios proporcionalmente a la diferencia entre el consumo total estimada del municipio y el consumo estimado en los apartados previos:

$$CR_{t,i} = CR_t \cdot \frac{\max(C_{t,i}^* - \sum_m C_{t,m,i}, 0)}{\sum_i (\max(C_{t,i}^* - \sum_m C_{t,m,i}, 0))}$$

Totales de carga por grupo de mercancías

Una vez obtenidos los totales de producción, atracción, exportación e importación de cada TAZ, se han de dar dos pasos finales para obtener las variables que alimentan a la siguiente etapa:

1. Sumar las producciones, consumos, exportaciones e importaciones por cada tipo de producto considerado para obtener los totales de los siguientes grupos de mercancías que son los que se usarán en el resto de etapas del modelo:
 - a. Graneles sólidos limpios.
 - b. Graneles líquidos limpios.
 - c. Graneles sólidos sucios.
 - d. Graneles líquidos sucios.
 - e. Mercancía general / contenedorizada.
2. En los municipios en que hay tanto producción como consumo de un tipo de mercancía, aplicar un % de consumo local para obtener el % de producción y consumo que corresponde al resto del país. El % de producción local será estimado a partir de las encuestas a cargadores, donde se realizan preguntas específicas sobre esta cuestión.
 Es decir, dado el %Producción Local, se obtendrá:

$$ERB_{t,m,i} = (P_{t,m,i} - EE_{t,m,i}) \cdot (1 - \%Producción Local)$$

$$IRB_{t,m,i} = C_{t,m,i} + ERB_{t,m,i} + EE_{t,m,i} - P_{t,m,i} - IE_{t,m,i}$$

4.2.2 Segunda etapa: Modelos econométricos para distribución de carga

El propósito del modelo de distribución será transformar los consumos y producciones entre cada par origen destino de la zona de influencia considerada en matrices de flujo de producto en unidades físicas. Los métodos empleados en la literatura se basan fundamentalmente en el enfoque de maximización de entropía (Ortuzar and Willumsen 2011). Este enfoque permite relacionar los macroestados de un sistema de transporte con sus microestados a partir de un conjunto de asunciones sobre las restricciones relativas a los estados posibles del sistema. Partiendo de diferentes hipótesis se obtienen diferentes modelos de distribución entre los que destaca:

1. El modelo gravitacional, que es uno de los más flexibles y empleados en la práctica, como el caso de los modelos holandeses TEM-II y SMILE, o el modelo finlandés (Jong et al. 2012). Será necesario calibrar un modelo gravitacional para cada tipo de mercancía. Su formulación matemática es:

$$F_{t,m,i,j} = A_i \cdot B_j \cdot ERB_{t,m,i} \cdot IRB_{t,m,i} \cdot d_{i,j}^{-\beta}$$

Donde:

$F_{t,m,i,j}$: flujo de la mercancía m en el periodo t entre i y j.

A_i, B_j : coeficientes de ponderación del método.

$d_{i,j}$: Mínima distancia de viaje entre el origen i y el destino j.

β : Parámetro de la función de impedancia de la distancia.

$ERB_{t,m,i}, IRB_{t,m,i}$: variables de entrada en el modelo

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. Por lo tanto, para el modelo de transporte que nos ocupa, se plantea un modelo de distribución mixto. Para ello es necesario establecer qué nodos origen y destino formarían parte del comercio o distribución interior sobre los que se aplicaría un modelo gravitacional y cuáles nodos exteriores sobre los que se aplicaría un modelo de reparto.

Dicho modelo de reparto se aplicará para los flujos de **exportación e importación**, en los cuales se emplearán los **coeficientes de reparto** por país que se estimen a partir de la **base de datos de comercio exterior**, ya que las relaciones de comercio internacional

dependen de factores más complejos que los dados exclusivamente por el transporte que es el objeto de este estudio.

En conclusión, **se ha confirmado la adopción de un modelo mixto entre uno gravitacional y otro de reparto basado en coeficientes** como lo más aconsejable para la segunda etapa del modelo de transportes de carga.

En la calibración es necesario ajustar el parámetro β para que refleje el efecto de la distancia en la reducción del número de viajes. El método de calibración del parámetro β implementado en TransCad, el software empleado para el desarrollo del modelo de transporte, requiere la especificación de un valor de la distancia media recorrida \bar{d} que se obtendrá a partir de las matrices OD formadas para carga.

4.2.3 Tercera etapa: Modelo de reparto modal

Esta etapa del modelo consiste en el reparto de los flujos totales de mercancías entre los diferentes medios de transporte que se consideran en el proyecto. Este proceso de elección es un problema multicriterio en el que es necesaria la ponderación de las distintas variables sobre la decisión y está influido por:

Tabla 6: Factores que influyen en la elección modal

| |
|--|
| Naturaleza de los bienes transportados |
| Tiempo y coste |
| Preferencias o estrategias del decisor |

En otras palabras, conociendo las condiciones bajo las cuales se van a producir los diferentes viajes entre un origen y un destino dado, se predice cual va a ser la elección del usuario. Lo que se hace es dividir la matriz OD inicial en varias matrices OD, una para cada medio de transporte que conforma el modelo.

Para la obtención de este tipo de modelos se han desarrollado varios métodos que pueden agruparse en los siguientes:

Tabla 7: Tipos de modelos de reparto modal

| |
|----------------------------------|
| Modelos agregados y desagregados |
| Deterministas o probabilísticos |
| Descriptivos o explicativos |
| Estáticos o dinámicos |
| Analíticos o de simulación |

La base necesaria para la aplicación de este tipo de métodos es un conjunto de información importante y exacta. Para ello, se desarrollan estudios de mercado para mercancías. Los trabajos en este sentido siguen dos tipologías fundamentales:

Tabla 8: Tipología de preferencias para el desarrollo de encuestas

| | |
|-------------------------|---|
| Preferencias reveladas | Información de las decisiones del usuario dadas las condiciones reales del transporte |
| Preferencias declaradas | Información de las decisiones del usuario frente a condiciones hipotéticas del transporte |

Ambos permiten obtener la valoración de los principales atributos de la elección intermodal mediante modelos de elección discreta, pero las preferencias declaradas permiten solventar limitaciones como son la falta de variabilidad de las observaciones o las correlaciones entre las variables e incluso permite evaluar la respuesta a situaciones nuevas de los servicios (Feo Valero, María; Espino Espino, Raquel; García Menéndez 2007).

La división fundamental de los modelos de elección es aquella que los divide en agregados y desagregados. Los primeros tratan de explicar los flujos modales con ayuda de las características de la zona y de la relación, mientras que los desagregados permiten un análisis detallado dentro de algunas categorías de viajeros y viajes, esto permite observar que elementos son más sensibles a ciertas variaciones, por ejemplo, qué tipo de mercancía es más susceptible de cambio de modo de transporte bajo una variación en sus condiciones.

Para ello uno de los métodos más empleados son los derivados de los **Modelos Logit**. Estos lo que hacen es dar la probabilidad de elección de cada uno de los medios de transporte. En función de los datos de los que se dispongan se selecciona el modelo Logit que más se ajusta.

La decisión de selección de modo a la que se enfrenta un individuo es de naturaleza discreta. Por lo tanto, modelos de elección discretos, los cuales predicen las elecciones hechas por una unidad de decisión dentro de un conjunto discreto de alternativas, son a menudo usados por análisis de modo de elección. Los modelos de elección discretos son en muchos aspectos un sustituto para los modelos de regresión cuando la variable dependiente es cualitativa o categórica y no continua. Los modelos de regresión no se ajustan para la modelización de variables dependientes discretas por violaciones de los supuestos de mínimos cuadrados ordinarios.

Sin embargo, los modelos de elección discretos están formulados como modelos estocásticos, en los que la probabilidad, con la que determinada respuesta es observada,

es una función de un conjunto de variables explicativas. Hay una variedad de formas funcionales que pueden ser propuestas para la descripción de elección discreta.

En cuanto al modelo de elección hay múltiples desarrollos matemáticos con los que se pueden aproximar las elecciones de los fletadores (Ortúzar y Willumsen, 2011). Los modelos Logit (en alguna de sus variadas formas) son los más empleados en los problemas aplicados en el ámbito de la logística. Los modelos Logit más extendidos son los Modelos Logit Multinomiales (Multinomial Logit Models, MNL) y los Modelos Logit Anidados (Nested Logit Models, NLM).

Todos ellos parten del mismo marco teórico (Ortúzar y Willumsen 2011):

- Los decisores poseen la información necesaria para tomar sus decisiones y lo hacen de una manera racional.
- Hay un conjunto de alternativas (modos de transporte para este caso) y hay un conjunto de atributos medibles que cuantifican la utilidad de cada alternativa para cada decisor.
- Cada alternativa tiene una utilidad neta para cada decisor, que representa cuan atractiva es esa alternativa para él.
- El decisor actúa en una manera racional buscando la maximización de la utilidad.

Existen iniciativas previas donde se han empleado modelos logit para la solución de la elección modal en redes multimodales. Así, en el trabajo de García-Menéndez and Feo-Valero (2009), se presenta el empleo de un modelo logit multinomial para la toma de decisión entre carretera y transporte marítimo de corta distancia.

El modelo propuesto por (Ortúzar and Willumsen 2011) se refiere a la probabilidad de que una unidad elija una alternativa dada de un conjunto de posibles alternativas. Dicha probabilidad viene dada por la siguiente fórmula:

$$P_n(i) = \text{prob}(Y_n) = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_{j \in C_n} e^{V_{nj}}}$$

Donde:

| | |
|----------|--|
| $P_n(i)$ | Probabilidad con la que el individuo n elige la alternativa i |
| Y_n | Valor de la variable respuesta del individuo n |
| C_n | Conjunto de alternativas de n |
| V_{ni} | Componente medible de utilidad de la alternativa i para el individuo n |

La unidad de decisión evalúa la función de utilidad de cada alternativa a la que se enfrenta y elige la alternativa con mayor valor de utilidad. Mientras la función de utilidad no se conozca con certeza, esta es especificada con un término de error aleatorio.

En particular, el MNL para las probabilidades de elección surge si se asume que la utilidad de una alternativa es una función de factores determinantes de la elección, de algunos parámetros desconocidos y de la suma de un término de error que sigue una distribución Gumbel. Es esta suposición (que los términos de error tengan todas distribuciones Gumbel y sean estadísticamente independientes) lo que hace a la formulación del modelo tratable, quedando expresada la utilidad como:

$$U_{nj} = \beta' X_{nj} + \varepsilon_{nj} \quad j \in C_n$$

Donde:

| | |
|--------------------------|--|
| U_{nj} | Utilidad de la alternativa j para el individuo n |
| X_{nj} | Vector de variables explicativas para la alternativa j para el individuo n |
| ε_{nj} | Término de error independiente y distribuido Gumbel |
| C_n | Conjunto de elecciones para el individuo n |
| β' | Parámetro del modelo |
| $V_{ni} = \beta' X_{nj}$ | Componente medible de utilidad de la alternativa j para el individuo n |

Como se refleja en esta ecuación, la función de utilidad es lineal con respecto al vector de parámetros β . En este tipo de métodos las probabilidades de elección de un método varían entre 0 y 1, y la suma de probabilidades de diferentes medios para una unidad de decisión debe ser igual a 1.

Los MNL se especifican definiendo la utilidad relativa de cada una de las posibles alternativas. Esto implica la definición de las variables explicativas que entran en cada función de utilidad y la relación de los parámetros dentro de la función.

Las alternativas consideradas para el transporte de mercancía son:

- **Carretera.** Dentro de carretera el tipo de vehículo:
 - Ligero furgoneta.
 - Ligero camioneta.
 - Pesado rígido.
 - Pesado articulado.
 - Tren de carretera.
 - Camión cisterna.

- **Ferrocarril.** Es una alternativa que se da en combinación con el transporte por carretera ya que normalmente es necesario realizar un acarreo hasta la terminal ferroviaria.
- **Aéreo.** Al igual que en el transporte ferroviario, requiere el acarreo, en este caso, hasta el aeropuerto.
- **Hidrografía.** Sólo está disponible para algunos viajes, pero se incluye igualmente en el modelo.

El modo marítimo no se considera como una alternativa modal en este modelo ya que es un modo exclusivo para el transporte de mercancías a larga distancia. La única alternativa al transporte marítimo es el aéreo, pero no se calibrará un modelo de elección discreta para realizar el reparto entre aéreo y marítimo de larga distancia ya que los segmentos de carga en que son competitivos son muy diferentes. Para este tipo de alternativas modales se emplearán simplemente los % de reparto actuales.

Las funciones de utilidad del modelo **Logit** dependen fundamentalmente de las variables **tiempo (T)** y **coste (C)** del viaje entre el nodo origen y el destino. Dichos valores se calcularán de la siguiente forma, ajustando los distintos valores a partir de las encuestas realizadas:

- **Modo carretera:**
 - Tiempo: $T_{carr} = \frac{distancia}{v} + T_{descanso} + T_{aduana} + T_{peaje}$
 - Coste: $C_{carr} = P_{fijo/ton} + P_{variable/ton} \cdot distancia + C_{aduana} + C_{peaje}$
- **Modo ferroviario:**
 - Tiempo: $T_{ferr} = T_{acarreo_origen} + \frac{1}{2 \cdot Frecuencia\ servicio} + T_{terminal_origen} + \frac{distancia}{v} + T_{terminal_destino} + T_{acarreo_destino}$
 - Coste: $C_{ferr} = C_{acarreo_origen} + P_{fijo/ton} + P_{variable/ton} \cdot distancia + C_{acarreo_destino}$
- **Modo aéreo:**
 - Tiempo: $T_{aéreo} = T_{acarreo_origen} + \frac{1}{2 \cdot Frecuencia\ servicio} + T_{terminal_origen} + \frac{distancia}{v} + T_{terminal_destino} + T_{acarreo_destino}$
 - Coste: $C_{aéreo} = C_{acarreo_origen} + P_{fijo/ton} + P_{variable/ton} \cdot distancia + C_{acarreo_destino}$
- **Modo fluvial:**
 - Tiempo: $T_{fluv} = T_{acarreo_origen} + \frac{1}{2 \cdot Frecuencia\ servicio} + T_{terminal_origen} + \frac{distancia}{v} + T_{terminal_destino} + T_{acarreo_destino}$
 - Coste: $C_{fluv} = C_{acarreo_origen} + P_{fijo/ton} + P_{variable/ton} \cdot distancia + C_{acarreo_destino}$

Donde $P_{fijo/ton}$ hace referencia a la parte fija del precio que cobran los operadores de transporte (independientemente de la distancia) y $P_{variable/ton}$ hace referencia al precio variable con la distancia que cobran los operadores de transporte.

La formulación del logit será, por lo tanto:

$$U_{carr} = \beta_{coste} \cdot C_{carr} + \beta_{tiempo} \cdot T_{carr}$$

$$U_{ferr} = \beta_{ferr} + \beta_{coste} \cdot C_{ferr} + \beta_{tiempo} \cdot T_{ferr}$$

$$U_{aéreo} = \beta_{aéreo} + \beta_{coste} \cdot C_{aéreo} + \beta_{tiempo} \cdot T_{aéreo}$$

$$U_{fluv} = \beta_{fluv} + \beta_{coste} \cdot C_{fluv} + \beta_{tiempo} \cdot T_{fluv}$$

Los parámetros β_{coste} y β_{tiempo} han de ser negativos y cuantifican la disminución en la utilidad de una alternativa al incrementarse tiempos y costes. La relación entre estos dos parámetros determina el peso relativo de los factores tiempo y coste, y por tanto la ratio $\frac{\beta_{tiempo}}{\beta_{coste}}$ se puede emplear para estimar el **Valor del Tiempo (VOT)** para un decisor.

Es decir, se puede estimar:

$$VOT = \frac{\beta_{tiempo}}{\beta_{coste}}$$

Los parámetros β_{ferr} , $\beta_{aéreo}$ y β_{fluv} proporcionan la utilidad de estas alternativas modales a igualdad de tiempo y coste frente a la alternativa de referencia. Se toma la carretera como alternativa de referencia ya que está disponible para todas las combinaciones origen-destino.

El cálculo de los parámetros de la función de utilidad se llevará a cabo por el método de Máxima Verosimilitud, el cual intenta encontrar el conjunto de parámetros que es más probable obtener en las elecciones observadas en los datos. Más específicamente, se emplea una versión mejorada del Método DFP, para obtener la mejor estimación de los

La muestra de datos para el ajuste del modelo logit será la dada por las preferencias declaradas y reveladas de las entrevistas a cargadores

- Preferentemente se emplearán los datos de las preferencias declaradas, ya que son más adecuadas para estimar los cambios en la elección modal ante cambios futuros en la red de transporte.
- Paralelamente, dado que en la práctica muchos cargadores no suelen informar adecuadamente sobre sus preferencias declaradas, se realizará otro ajuste con un 80% de la muestra de preferencias reveladas. El restante 20% será empleado como muestra para **validación cruzada**.
- Los resultados de ambos ajustes serán comparados y se tomará la decisión sobre el modelo más adecuado en función de los porcentajes de respuesta observados y la coherencia de los resultados de asignación que se obtengan con ambos modelos.

Para validar la bondad de ajuste de los modelos calibrados a la muestra se emplearán las siguientes pruebas estadísticas:

- Test T de significación de los parámetros β del modelo.
- Test de la razón de verosimilitud para evaluar la bondad de ajuste general de los modelos logit.
- El índice ρ^2 .

Los porcentajes de reparto entre las alternativas se estiman a partir de las probabilidades de elección modal dadas por el modelo logit:

$$P_{carr} = \frac{e^{U_{carr}}}{e^{U_{carr}} + e^{U_{ferr}} + e^{U_{aéreo}} + e^{U_{fluv}}}$$

$$P_{ferr} = \frac{e^{U_{ferr}}}{e^{U_{carr}} + e^{U_{ferr}} + e^{U_{aéreo}} + e^{U_{fluv}}}$$

$$P_{aéreo} = \frac{e^{U_{aéreo}}}{e^{U_{carr}} + e^{U_{ferr}} + e^{U_{aéreo}} + e^{U_{fluv}}}$$

$$P_{fluv} = \frac{e^{U_{fluv}}}{e^{U_{carr}} + e^{U_{ferr}} + e^{U_{aéreo}} + e^{U_{fluv}}}$$

Como primer resultado del reparto modal, se obtienen las matrices Origen-Destino OD por alternativas. Sea $F_{t,a,m,i,j}$ la matriz OD para el periodo t, alternativa a, mercancía m y par origen-destino i, j:

$$F_{t,carr,m,i,j} = F_{t,m,i,j} \cdot P_{carr}$$

$$F_{t,ferr,m,i,j} = F_{t,m,i,j} \cdot P_{ferr}$$

$$F_{t,aéreo,m,i,j} = F_{t,m,i,j} \cdot P_{aéreo}$$

$$F_{t,fluv,m,i,j} = F_{t,m,i,j} \cdot P_{fluv}$$

Dentro del tráfico de mercancías por carretera, se empleará otro modelo logit para realizar el reparto entre los tipos de vehículos. Para ello, la variable que se empleará en la función de utilidad será el coste exclusivamente. Las alternativas de elección que se emplearán serán:

- Para los graneles sólidos y mercancía general:
 - Ligero furgoneta.
 - Ligero camioneta.
 - Pesado rígido.
 - Pesado articulado.
 - Tren de carretera.
- Para los graneles líquidos se considerará automáticamente el empleo de camiones cisterna.

Finalmente, se aplican las conversiones de flujos en toneladas a vehículos. Para ello, en este punto se emplearán las siguientes ratios que se calibrarán de los resultados de las encuestas a operadores:

- Carga media transportada / vehículo de carretera. Un valor para cada tipo de vehículo:
 - Ligero furgoneta.
 - Ligero camioneta.
 - Pesado rígido.
 - Pesado articulado.
 - Tren de carretera.
- Carga media transportada / vagón.
- Carga media transportada / avión.
- Carga media transportada / barcaza.

4.2.4 Cuarta etapa: Asignación a la red

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.

Estos modelos generalmente suelen buscar las condiciones de equilibrio enunciadas por Wardrop (1952): *Bajo condiciones de equilibrio, el tráfico se distribuye en las redes congestionadas de modo tal que ningún viajero puede reducir su propio coste de viaje cambiando el recorrido.*

Si todos los usuarios perciben el coste de la misma forma, el equilibrio de Wardrop se puede enunciar así: *Bajo condiciones de equilibrio, el tráfico se distribuye en las redes congestionadas de modo tal que todos los recorridos utilizados entre un par O-D tienen el mismo y mínimo coste mientras todos los recorridos no utilizados tienen costes más altos o iguales.*

Es evidente que si estas condiciones no se cumplen, al menos uno de los conductores debería ser capaz de reducir sus costes cambiando el recorrido. Asimismo, Wardrop (1952) propuso una forma alternativa de asignación del tráfico a la red, la cual será tomada como referencia para acometer el presente estudio: *Bajo condiciones de equilibrio social en redes congestionadas, el tráfico debería distribuirse de tal modo que los costes medios (o totales) de viaje sean mínimos.*

Dicho principio va enfocado al ingeniero de transporte, el cual intenta modelizar el tráfico de modo que se minimicen los costes totales del viaje y así conseguir un **equilibrio social entre usuarios** óptimo.

El segundo principio de Wardrop puede escribirse matemáticamente de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar: } S\{T_{ijr}\} = \sum_a V_a c_a(v)$$

La función objetivo también puede expresarse de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar: } S\{T_{ijr}\} = \sum_a \int_0^{V_a} C m_a(v) dv$$

Donde:

T_{ijr} = matriz de flujos de ruta

V_a = flujo del arco a

c_a = coste del arco a

$C m_a$ = coste marginal de viajes en el arco a

Las soluciones a los problemas de equilibrio de un usuario individual y equilibrio social (todos los usuarios) no son las mismas; en otras palabras, el equilibrio (egoísta) del usuario genera soluciones con costes totales más altos que en el caso del equilibrio social. La diferencia está en los efectos externos debidos a la congestión. El usuario percibe sólo su coste individual y no distingue las demoras adicionales generadas a otros usuarios como consecuencia de la incorporación de su vehículo al arco. La tarificación vial urbana por congestión (peaje urbano), en particular en su versión electrónica, representa una forma de lograr que dicho usuario perciba este coste marginal en lugar de su coste medio individual.

En nuestro caso, para satisfacer el equilibrio de Wardrop, se ha optado por una **asignación Multi-Modal Multi-Clase (MMA)**, es decir, considerando los distintos modos de transporte para las múltiples clases de mercancías que se han tomado para realizar este estudio. Dicho modelo de asignación consiste en una rutina implementada en el software de planificación TransCAD que destaca por su flexibilidad de aplicación y diseñada para su aplicación en grandes áreas metropolitanas, aunque también es aplicable en modelos regionales e interregionales.

Por otra parte, se pueden definir distintas características para cada uno de los distintos modos de transporte o tipos de mercancía:

Tabla 9: Particularidades que se pueden añadir en un modelo MMA

| | |
|--|--|
| • Equivalencia con vehículos individuales | Reflejan el retraso que producen vehículos de distintos tipos |
| • Selecciones de exclusión | Representan la imposibilidad de algunos vehículos a circular por determinados tramos |
| • Aduanas | Basadas en el tramo recorrido y añadidas al coste total del viaje |
| • Aduanas de entrada-salida | Aplicadas al tipo de vehículo |
| • Valores únicos de tiempo para cada tipo de vehículo o clase de mercancía | |
| • Matrices de viaje O-D para cada tipo de vehículo o clase de mercancía | |

El modelo MMA permite la asignación en base a una función de coste generalizado diferenciando distintas *clases* de viajes que se corresponderán a los distintos tipos de mercancías. Como función de coste generalizado en este estudio se plantea usar una función lineal del tiempo y coste ponderamos mediante un parámetro de **valor del tiempo VOT** (*value of time*):

$$CG = C + VOT \cdot T$$

Donde CG es el coste generalizado, C el coste y T el tiempo.

El algoritmo de asignación que empleará el MMA es el Todo o Nada. Este algoritmo busca el mínimo coste generalizado para la selección de la ruta entre cada par origen destino.

4.3 Características del modelo

4.3.1 Elementos del modelo

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 fijo, toma 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. Por ejemplo, para pasajeros puede ser el tiempo de comprar el billete o de 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 antemano.
- **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 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 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 por ejemplo ayudar a la entrada y salidas de mercancías del país, aumentando el comercio exterior y por lo tanto mejorando la economía del país.

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. 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.

4.3.2 Necesidades del 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.

En primer lugar, es necesario identificar todos los elementos que debe recoger el modelo:

- **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 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.

- **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.
- **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. Por lo tanto, permitirán evaluar el impacto que el transporte genera sobre el entorno, así como los beneficios que pueda tener la empresa explotadora del servicio.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** figura representa un resumen de estos elementos y las relaciones que existen entre ellos.

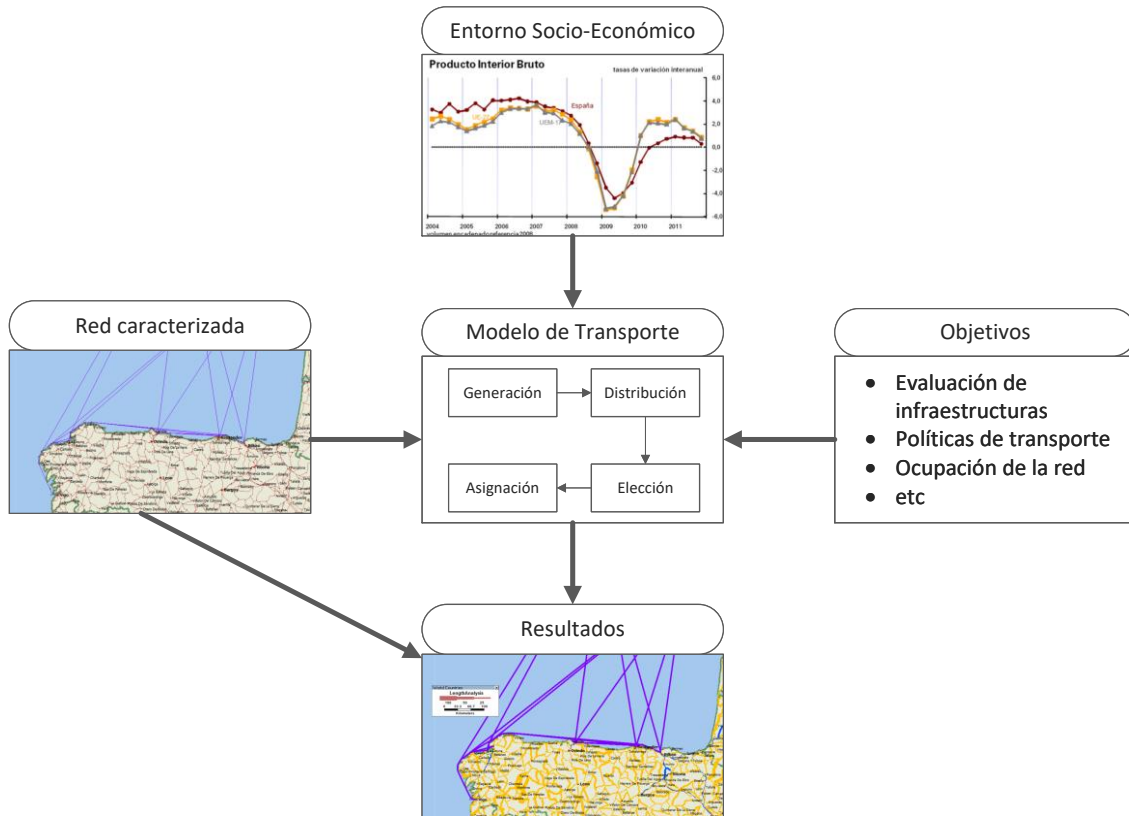


Figura 8: Elementos principales de la modelización

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.

4.3.3 Estructura del modelo

El modelo desarrollado adopta una estructura jerárquica en la que se parte de un primer nivel de definición dado por las variables macroeconómicas que determinarán la generación y atracción de carga dentro de la zona considerada y con el resto de países. En la siguiente figura, se puede ver gráficamente cómo se ha estructurado el modelo de transporte en los diferentes sub-modelos que conforman el estudio llevado a cabo:

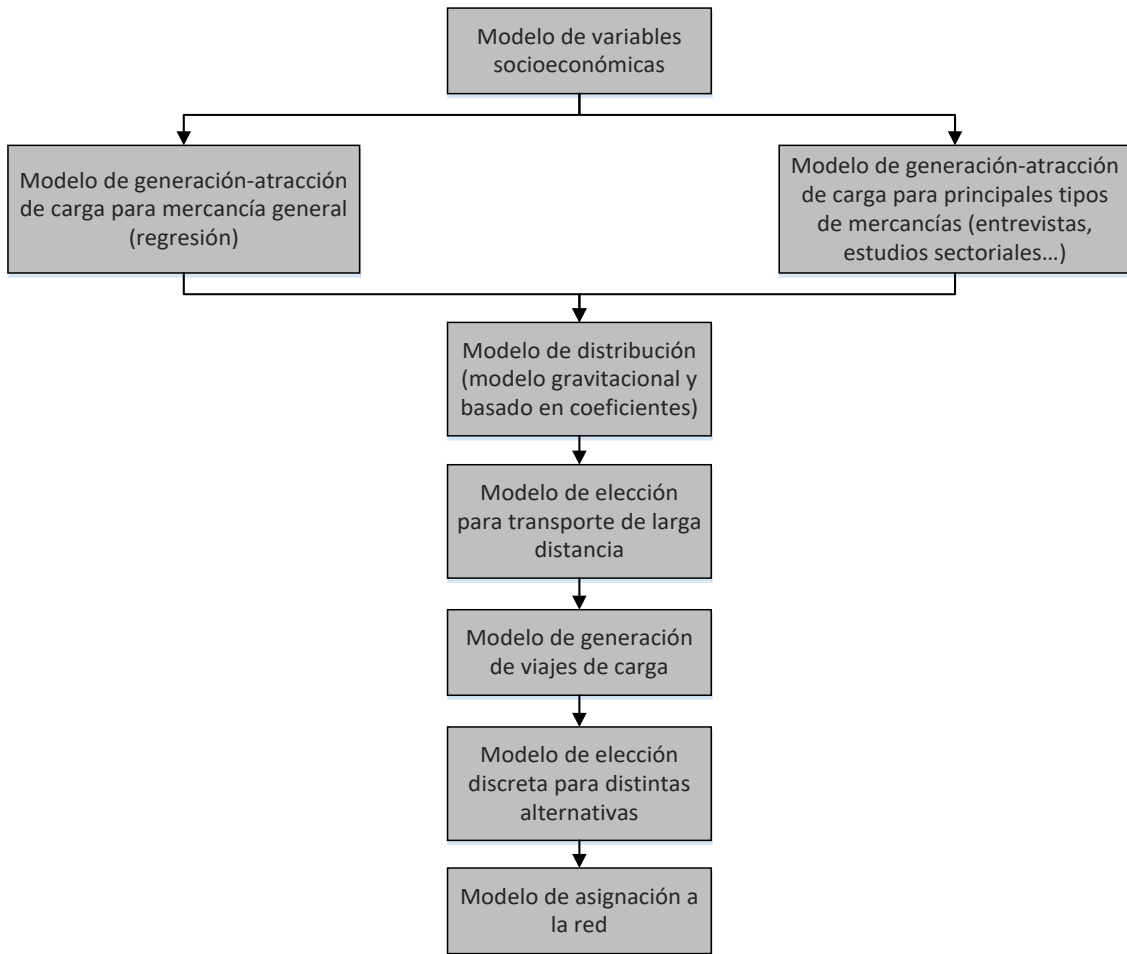


Figura 9: Estructura general del modelo

Todos estos modelos empleados, los cuales fueron explicados anteriormente en el [apartado de las cuatro etapas](#), pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Tabla 10: Clasificación a gran escala de los modelos empleados en el estudio

| | |
|-------------------------------------|---|
| <p>Modelos econométricos</p> | <p>Comprende las etapas que parten de los escenarios de evolución socioeconómica y configuración de la red para proporcionar como resultado las matrices OD de carga</p> |
| <p>Modelos de elección</p> | <p>Comprende las etapas que permiten desagregar las matrices de tráfico entre regiones en unidades físicas en viajes por cada alternativa de transporte. Se diferencia entre el modelo de elección para transporte internacional y para transporte nacional. El nivel de detalle del modelo requerido en el movimiento internacional de larga distancia es relativamente menor al nivel de detalle requerido en el movimiento regional ya que las distancias son mucho mayores y el efecto sobre el coste y tiempo total de viaje de un nodo particular de la red es mucho más bajo</p> |

| | |
|------------------------------|--|
| Modelos de evaluación | Esta denominación se refiere al conjunto de etapas finales del modelo que parten de las matrices OD por cada alternativa de transporte y tipo de mercancía, y proporcionan los diversos resultados deseados del modelo |
|------------------------------|--|

La **zona de influencia** será entendida como el conjunto de regiones geográficas de Bolivia las cuales son susceptibles de ser analizadas en cuanto a sus infraestructuras de transporte con el fin de determinar la viabilidad y rendimiento de las mismas desde distintos puntos de vista.

4.4 Modelo conceptual

Para definir el modelo conceptual se han usado los siguientes subíndices:

Tabla 11: Subíndices empleados

| | |
|----------------------------|--|
| <i>i</i> | Origen de mercancía. Será identificado como O |
| <i>j</i> | Destino de mercancía. Será identificado como D |
| <i>l</i> | Conjunto de links de transporte. Agrupación de tramos con iguales precios unitarios o velocidades de tránsito. |
| <i>k</i> | Nodos intermodales. Cada nodo intermodal está asociado a un modo de transporte. El conjunto de posibles valores de nodos intermodales para cada modo será identificado como N_{mm} . |
| <i>m</i> | Tipo de mercancía y pasajeros. El conjunto de posibles tipos de mercancías y pasajeros será identificado como M . |
| α | Alternativa de transporte. |

Se asume que $\alpha=0$ corresponde a la alternativa de sólo carretera y el resto de alternativas a combinaciones de modos que puede incluir:

Tabla 12: Alternativas de transporte a carretera

| |
|-------------|
| Ferroviaria |
| Aéreo |
| Hidrografía |

El conjunto de estructuras de datos que serán empleadas en el modelo son:

Tabla 13: Estructuras de datos empleadas en el modelo

| | |
|--|---|
| $P_{t,m,i}$ | Producción en unidades físicas de cada TAZ del modelo por tipo de carga |
| $C_{t,m,i}$ | Consumo en unidades físicas de cada TAZ del modelo por tipo de carga |
| $d_{i,j,k}$ | Matriz de distancias entre cada par OD por alternativa de transporte |
| $t_{i,j,k}$ | Matriz de tiempos entre cada par OD por alternativa de transporte |
| $FI_{t,m,i,j}$ | Matriz OD de tráficos internaciones en unidades físicas (importación/exportación) |
| $FR_{t,m,i,j}$ | Matrices OD de carga en unidades físicas para la zona de influencia |
| $q_{t,m,i,j,k}^{Int}$ | Matrices con los tamaños de envío por par de Origen-Destino para cada alternativa de transporte para el tráfico internacional |
| $q_{t,m,i,j,k}^{Reg}$ | Matrices de cantidades de envío por par OD para el tráfico regional |
| $CTI_{t,m,i,j,k}$ | Matriz de costes totales de transporte entre cada par OD para tráfico internacional |
| $CTR_{t,m,i,j,k}$ | Matriz de costes totales de transporte entre cada par OD de la zona de influencia considerada |
| $FT_{t,m,i,j,k}$ | Matriz de viajes de carga entre cada par OD por alternativa de transporte |
| $FT_{t,m,i,j,k,v}$ | Matriz de viajes de carga entre cada par OD por alternativa de transporte y tipo de vehículo dentro de la alternativa |
| Red con los flujos totales de transporte en viajes y unidades físicas por tipo de vehículo | |

La siguiente figura muestra el diagrama del modelo conceptual del modelo desarrollado:

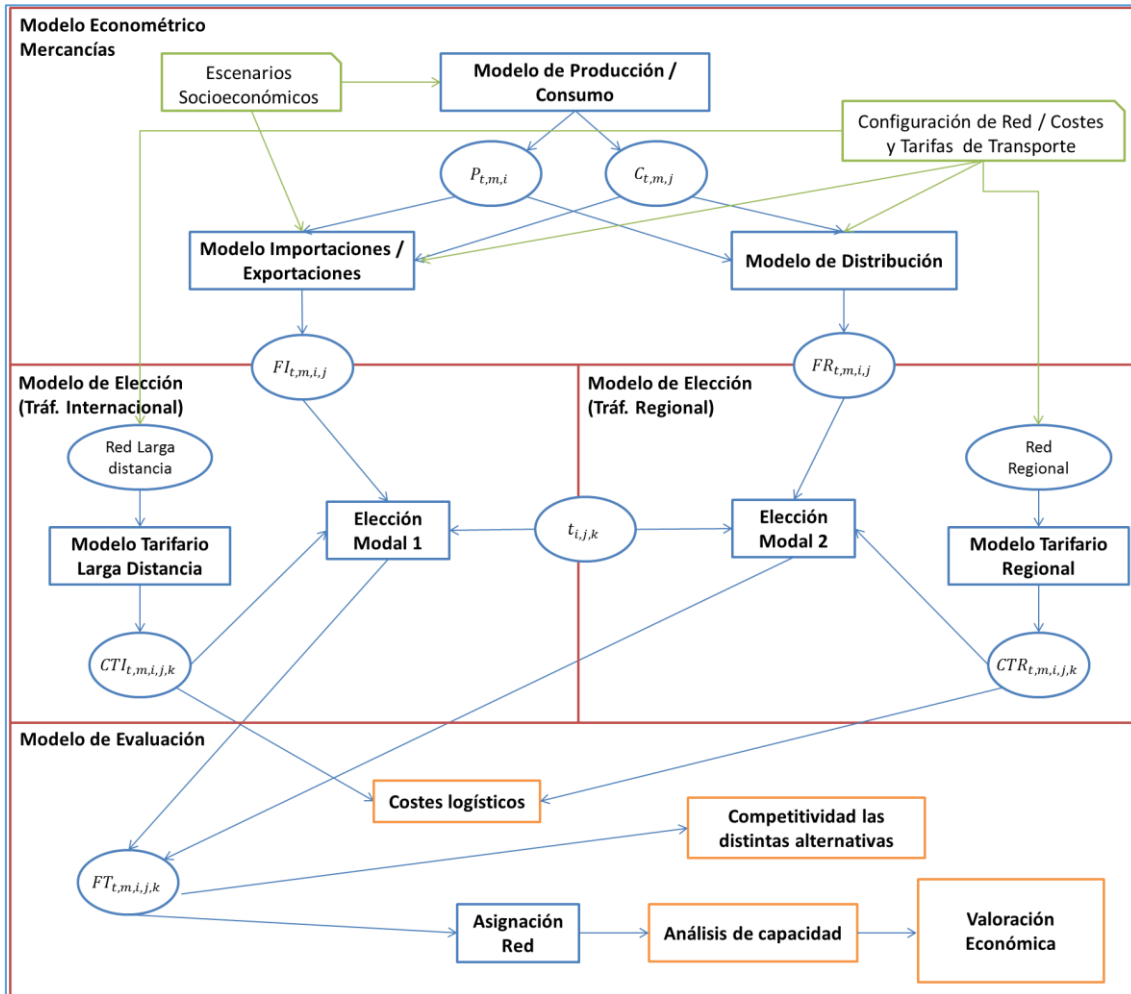


Figura 10: Diagrama del modelo conceptual

En primer lugar, se estudiará el entorno socioeconómico de manera que se puedan establecer los modelos econométricos que dan lugar a la generación y consumo. Se evaluarán modelos existentes y se desarrollarán aquellos que sean necesarios.

Dichos modelos permiten obtener las producciones y atracciones para todos los nodos origen destino establecidos en el modelo. Estos valores son para cada nodo origen o destino, por tipo de mercancías y por periodo temporal.

Además del establecimiento de nodos origen y destino es necesario caracterizar completamente la red. Para ello basándose en el GIS disponible se generarán las redes necesarias para cada escenario y periodo de análisis, de tal forma que no solo los tramos y nodos correspondientes al análisis estén disponibles, sino que también su caracterización en términos de velocidades, tiempos, costes, congestiones, etc. se encuentre disponible.

Una vez se tienen las producciones y consumos, y la red está caracterizada es necesario obtener las matrices origen-destino del sistema. Para ello se definirán los siguientes

modelos de distribución. En primer lugar, uno para las importaciones y exportaciones. Este modelo en basará en históricos de reparto de flujos entre pares origen destino, pudiéndose generar coeficientes de reparto para la construcción de las matrices. Por otro lado, para la distribución de carga dentro del país, se empleará un modelo gravitacional donde la impedancia del modelo será la distancia entre nodos. Las matrices así generadas serán de flujos totales de mercancía, sin distinguir el medio de transporte que empleará cada viaje entre origen y destino. Para ello será necesario el empleo de un modelo de elección. Los más empleados son los modelos Logit. Estos modelos son modelos probabilísticos que proporcionan la probabilidad con la que cada uno de los modelos de transporte será elegida. Multiplicando este valor por la matriz total habrá una matriz OD por cada una de las alternativas de transporte existentes.

Una vez obtenidas estas matrices será necesario conocer la ruta que cada par origen destino elige para conocer la ocupación de los arcos y nodos. En la parte internacional, la importancia de la congestión de la red se encuentra en los nodos, mientras que para la regional, el problema se encuentra en los arcos de la red.

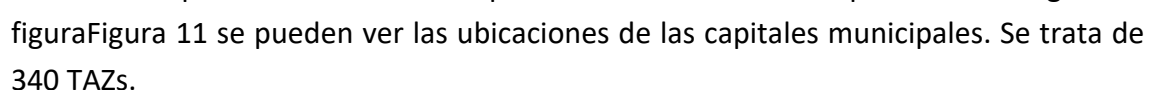
4.4.1 Zonas de análisis de tráfico

Las **Zonas de Análisis de Tráfico (TAZ)** definen el nivel de resolución geográfica de un modelo. Cada TAZ define un área geográfica que en el modelo de transporte será tratada como un nodo puntual de generación o atracción de viajes. Su elección se realiza teniendo en cuenta dos criterios:

1. Que tengan una extensión limitada para que el cálculo de distancias de viaje sea preciso.
2. Que haya datos suficientes para permitir desagregar los flujos de transporte de manera realista.

Para la selección de las **Zonas de Análisis de Tráfico (TAZ)** de este modelo se ha optado por adoptar un nivel de resolución municipal. Las razones para ello son:

1. El nivel de detalle municipal permite una alta resolución geográfica en la estimación de distancias de viaje. Para un estudio de naturaleza estratégica consideramos suficiente la precisión que aportan.
2. Consideramos deseable mantener una zonificación que, en la medida de lo posible, se ajuste a divisiones territoriales oficiales para facilitar la integración del modelo con las estadísticas oficiales.

Los **centroides** de cada TAZ, que son los puntos de origen y destino de los viajes, se consideran en la capital municipal ya que en la gran mayoría de los casos las densidades más altas de población en los municipios se encuentran en esos puntos. En la siguiente figura  se pueden ver las ubicaciones de las capitales municipales. Se trata de 340 TAZs.

Adicionalmente a los municipios se ha optado por añadir otras 7 TAZs que corresponden a las principales minas del país. Esto se debe a que son puntos singulares que generan un gran volumen de carga y que, por tanto, es preferible que se ubiquen en sus coordenadas precisas para realizar una asignación de carga correcta.

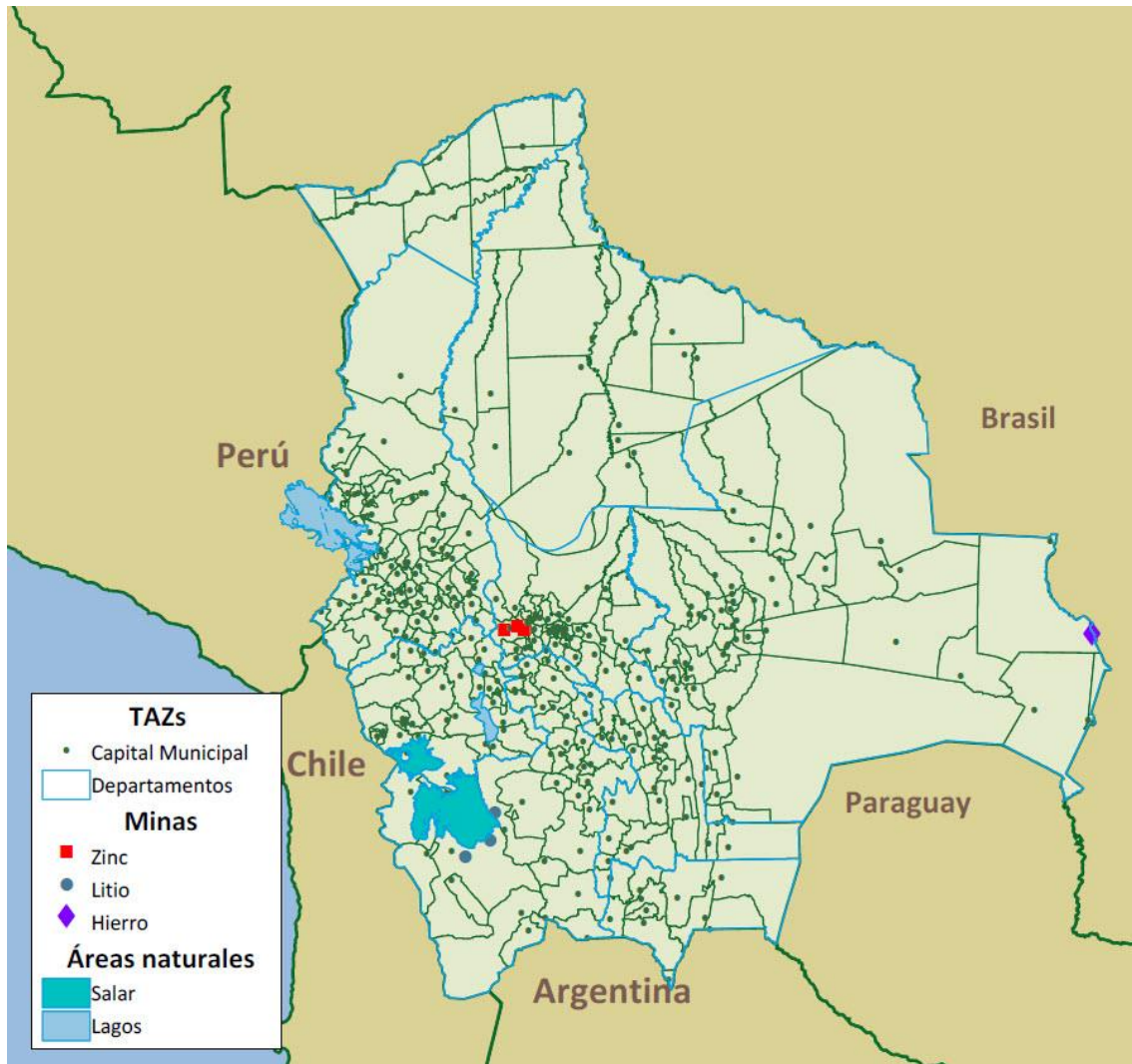


Figura 11: TAZs municipales

Los flujos de transporte, sobre todo de mercancías, que están dirigidos a los países adyacentes llevan a establecer zonas de análisis de tráfico (TAZ) en los países vecinos. Se considerará cada uno de los países que rodea a Bolivia: Perú, Brasil, Argentina, Chile y Paraguay. Los centroides considerados se localizan en dichos países en las vías de salida principales de Bolivia. Debido al tamaño de Brasil, y las dos vías de conexión principales, se identificarán dos TAZs para el país.



Figura 12. Mapa con los centroides de las TAZ exteriores

Por último, se establecen las TAZs en los países más lejanos, que generan flujos de importación o absorben exportaciones desde Bolivia. Los países principales con movimientos de mercancía en la actualidad son los recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 14: Países considerados para el movimiento de mercancías

| | | | |
|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------|
| Panamá | Italia | Canadá | Perú |
| Rusia | España | Estados Unidos | Chile |
| Austria | India | México | |
| Alemania | Corea del Sur | Guatemala | |
| Suecia | China | Venezuela | |
| Reino Unido | Japón | Colombia | |
| Países bajos | Taiwan | Ecuador | |
| Francia | Argentina | Brasil Norte | |
| Bélgica | Indonesia | Brasil Sur | |
| Turquía | Australia | Paraguay | |

4.4.2 Categorías de mercancías

Para la elección de las mercancías principales, se ha optado por dividir estas en los siguientes tipos:

Tabla 15: Categorías de mercancías

| CATEGORÍA |
|---------------------------|
| Graneles sólidos limpios |
| Graneles sólidos sucios |
| Graneles líquidos limpios |
| Graneles líquidos sucios |
| Mercancía contenerizada |

Los graneles sólidos limpios se corresponden con productos agrícolas fundamentalmente, tales como granos, frutas, legumbres, etc. En cuanto a los graneles sólidos sucios hay que decir que estos consisten en minerales y sus derivados básicamente.

Los graneles líquidos limpios son principalmente aceites derivados agrícolas como el aceite de soja; sin embargo, los líquidos sucios son aquellos derivados del petróleo usados como combustibles.

Por último, la categoría de mercancía contenerizada se corresponde con productos manufacturados, madera, piezas de motores, componentes electrónicos, etc.

Para realizar el estudio del flujo de mercancías a partir de los datos obtenidos, todos los flujos de mercancía se atribuirán a una de estas categorías, con el fin de concretar y acotar los distintos tipos de carga considerados.

4.5 Implementación del modelo

Como se ha comentado anteriormente, se ha hecho uso del software de planificación de transporte TransCAD para la implementación del modelo, debido a que este software constituye una de las principales herramientas de análisis diseñadas para el transporte, mapeo y visualización.

Por otra parte, TransCAD se ejecuta en ambiente Microsoft Windows bajo todos los estándares informáticos conocidos en la actualidad, por lo que esto nos evita construir aplicaciones personalizadas o complicados módulos de intercambio de datos para realizar el análisis de transporte.

A continuación, se muestra una captura de pantalla del modelo desarrollado:

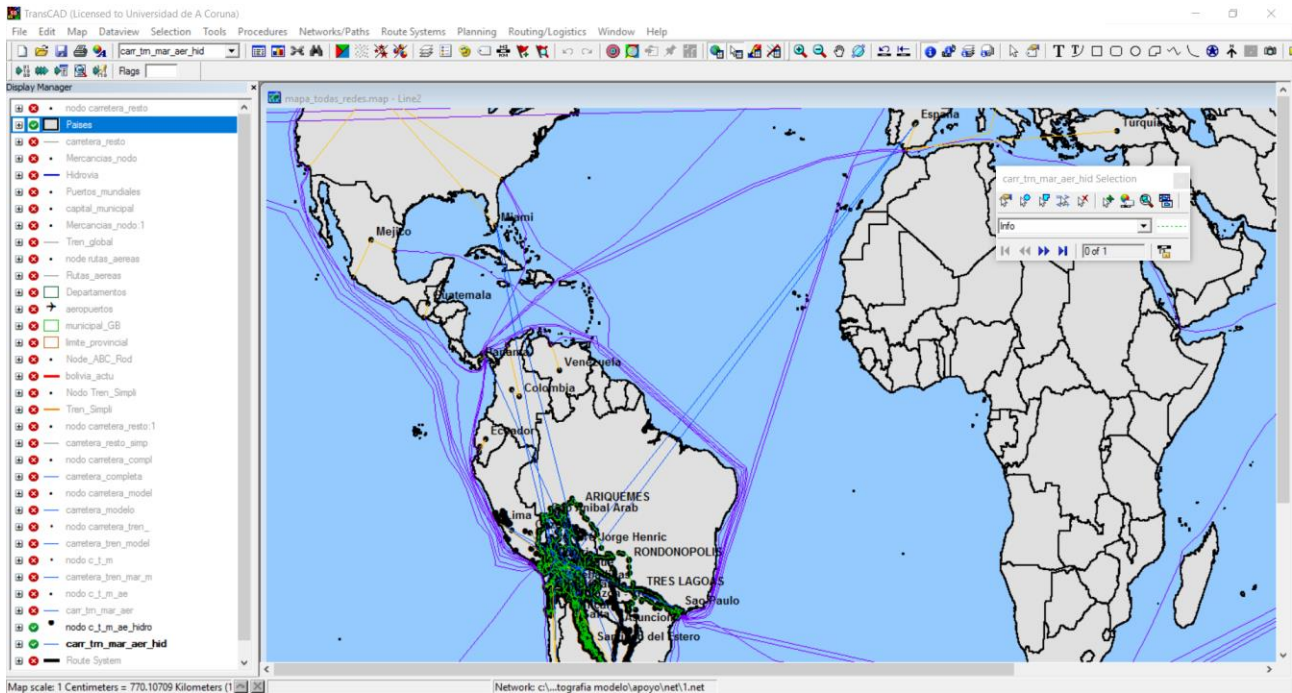


Figura 13: Captura de pantalla del modelo desarrollado

Un elemento fundamental del modelo de transporte es la red para análisis que ha de contener toda la información relativa al área geográfica considerada. La red estará constituida por los siguientes cuatro grupos de elementos:

- Los **tramos de la red** de cada medio considerado en el análisis.
- Los **nodos de conexión** entre tramos.
- Los **nodos de intercambio modal** (por ejemplo, las terminales ferroviarias para la interfaz ferroviario-carretera y puertos para las interfaces del medio marítimo).
- Las **conexiones** con los nodos de producción y consumo de carga y con las zonas de análisis geográfico (TAZ) donde se genera y atrae carga.

Dichos grupos de elementos están organizados en el modelo mediante capas superpuestas, las cuales se pueden ocultar y ordenar según convenga para facilitar su visualización y análisis.

En la tabla precedente, figuran las principales capas de las que consta el modelo que servirán para realizar el análisis posterior:

Tabla 16: Principales capas que forman la cartografía del modelo

| | | |
|--------------------------|--------------------|--------------------|
| Países | Red de carreteras | Nodos de carretera |
| Departamentos de Bolivia | Rutas ferroviarias | Nodos ferroviarios |
| Provincias de Bolivia | Hidrovías | Aeropuertos |
| Municipios de Bolivia | Rutas aéreas | Puertos |
| Capitales municipales | Rutas marítimas | |

A continuación, se muestran diversas capturas del modelo referentes a las principales capas que lo conforman.

En primer lugar, se mostrarán según países, Departamentos, Provincias y Municipios de Bolivia:



Figura 14: Capa de países



Figura 15: Capa de Departamentos de Bolivia

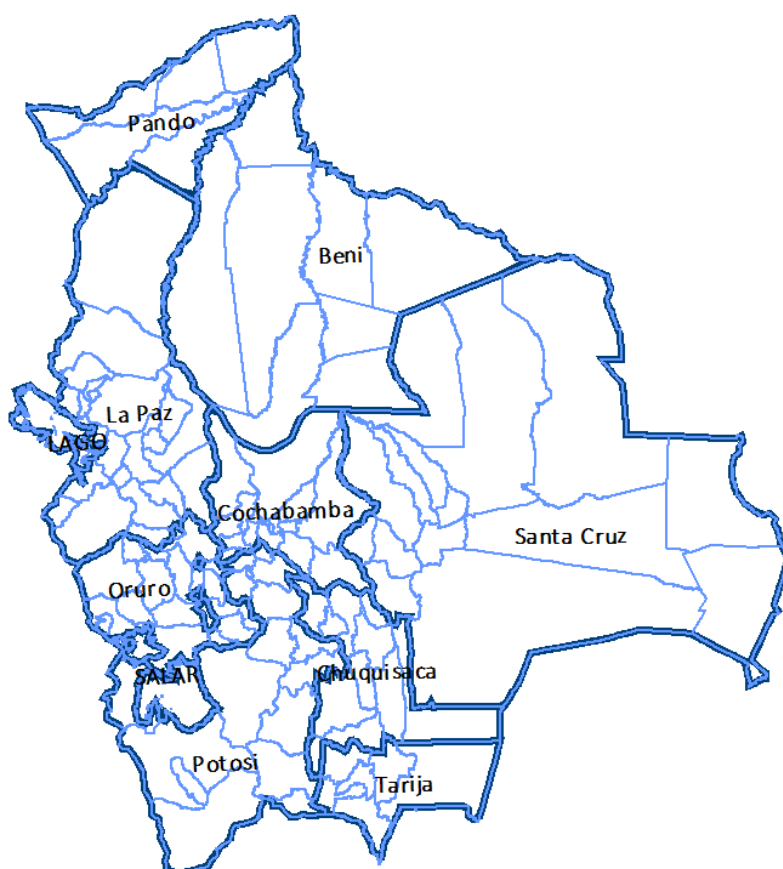


Figura 16: Capa de Departamentos y Provincias de Bolivia

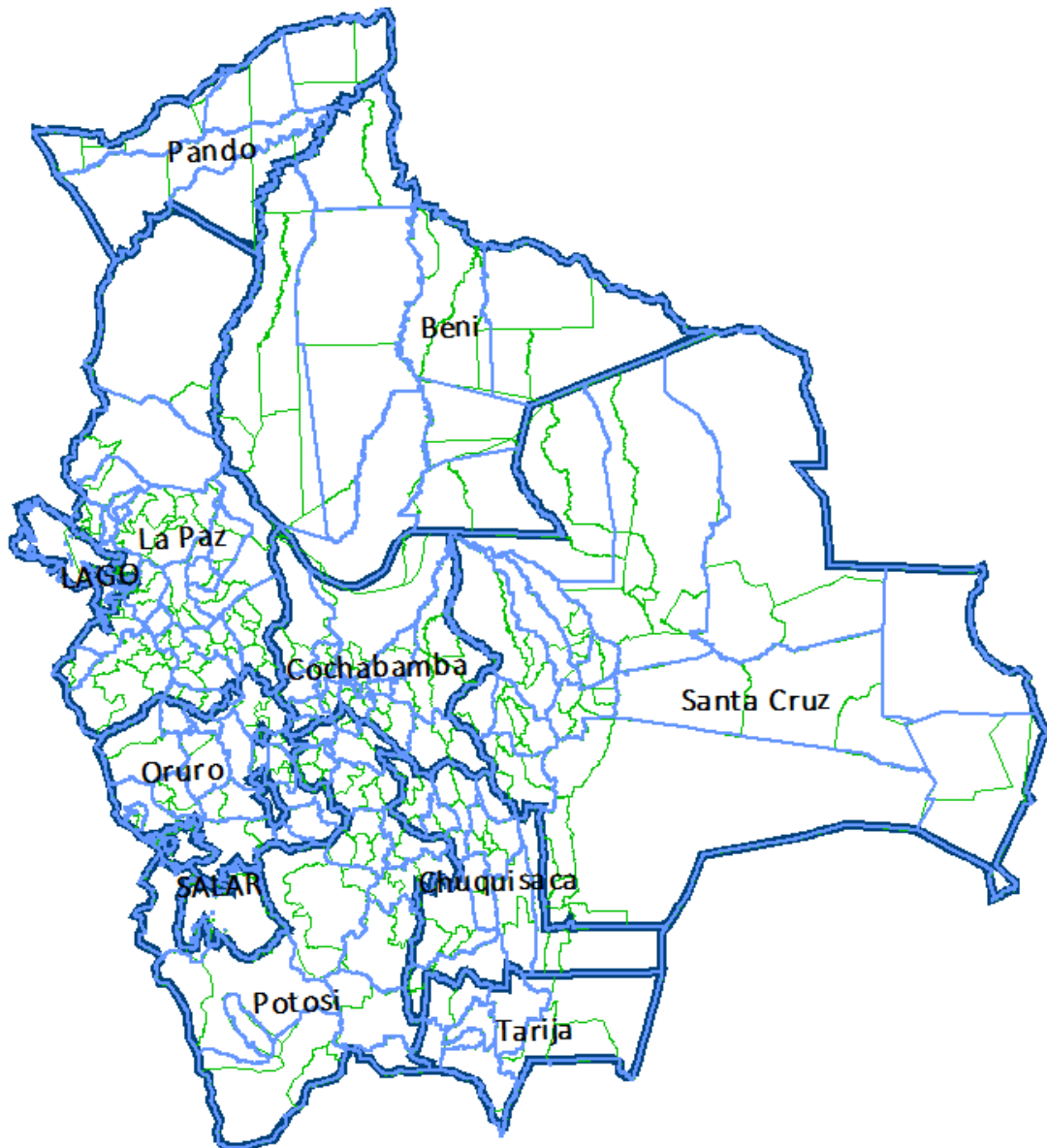


Figura 17: Capa de Departamentos, Provincias y Municipios de Bolivia

Los cuatro principales medios que han sido caracterizados para el estudio son los que figuran a continuación:

- La **red de carreteras** está formada por aproximadamente 70.000 km totales de vías, de los cuales aproximadamente 10.000 están pavimentadas. Las vías están agrupadas en tres categorías: fundamental, complementaria y vecinal. La red de carreteras fundamental abarca aproximadamente 16.000 km y es la empleada para el transporte internacional además de los principales tráficos interregionales dentro de Bolivia.

Actualmente hay un gran número de proyectos de pavimentación y mejora de las carreteras (además de la apertura de vías de doble carril) en distintas fases de ejecución pero se espera que estén concluidas en los próximos años.

A continuación, se muestra la capa correspondiente a la red de carreteras:

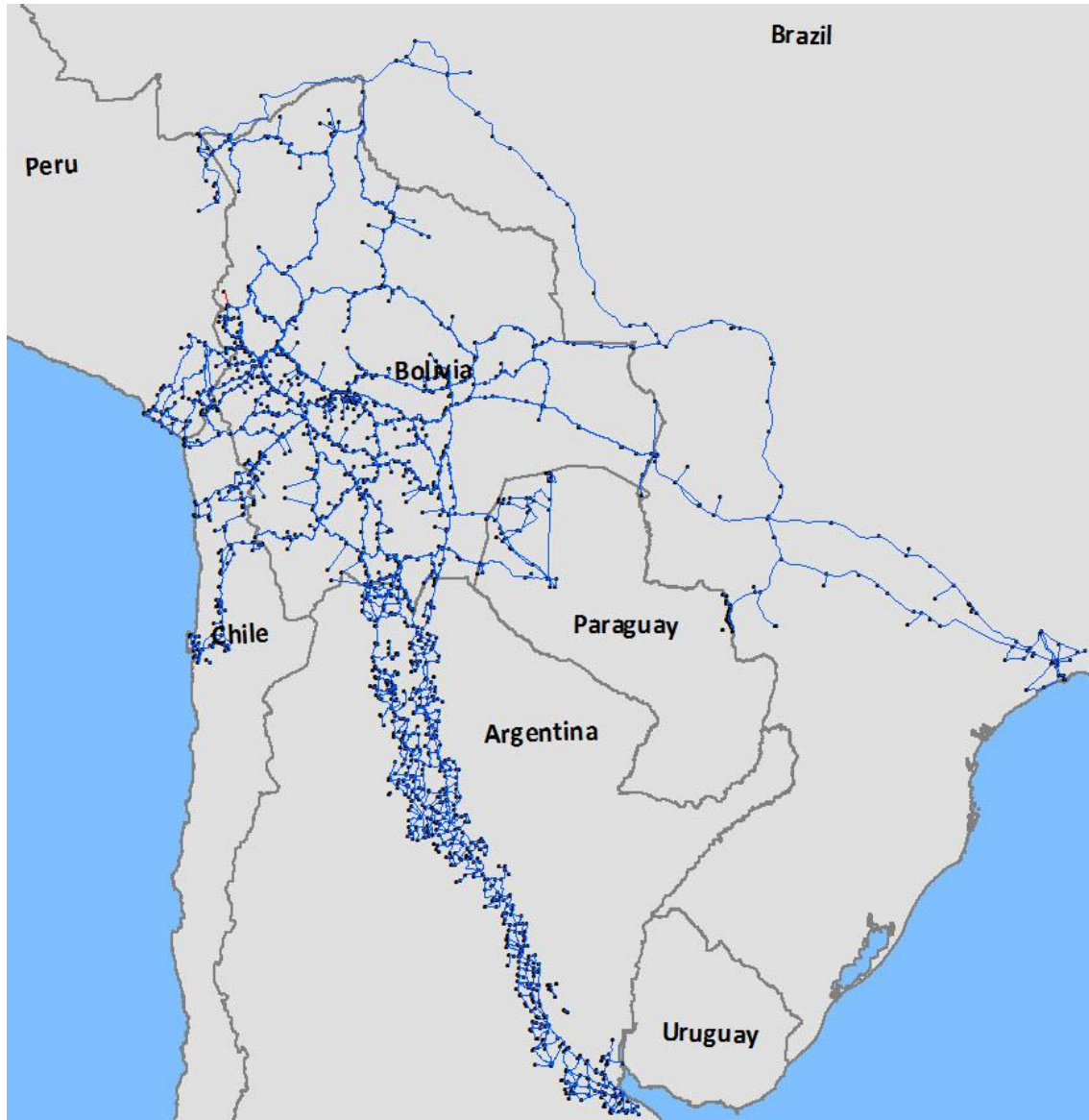


Figura 18: Red de carreteras principales

- La **red de ferrocarril** está dividida en dos redes diferenciadas: la red occidental ubicada en el Altiplano (2.276 km) y la red oriental ubicada en los Llanos (1.246 km). Ambas son propiedad del Estado aunque están operadas por dos empresas concesionadas, "FERROVIARIA ANDINA S.A." (FCA S.A.) en la red andina y "FERROVIARIA ORIENTAL S.A." (FOSA) en la red oriental. La escasa inversión durante las últimas décadas ha hecho que el modo ferroviario no represente un

porcentaje elevado del tráfico de mercancías interior. Para tráfico internacional sí representa un porcentaje más significativo, fundamentalmente por las exportaciones de minerales que obtienen ventajas de sus economías de escala. Sin embargo, se trata de uno de los modos con mayor potencial.

La capa en la que se reflejan las rutas ferroviarias más relevante se muestra en la figura precedente:

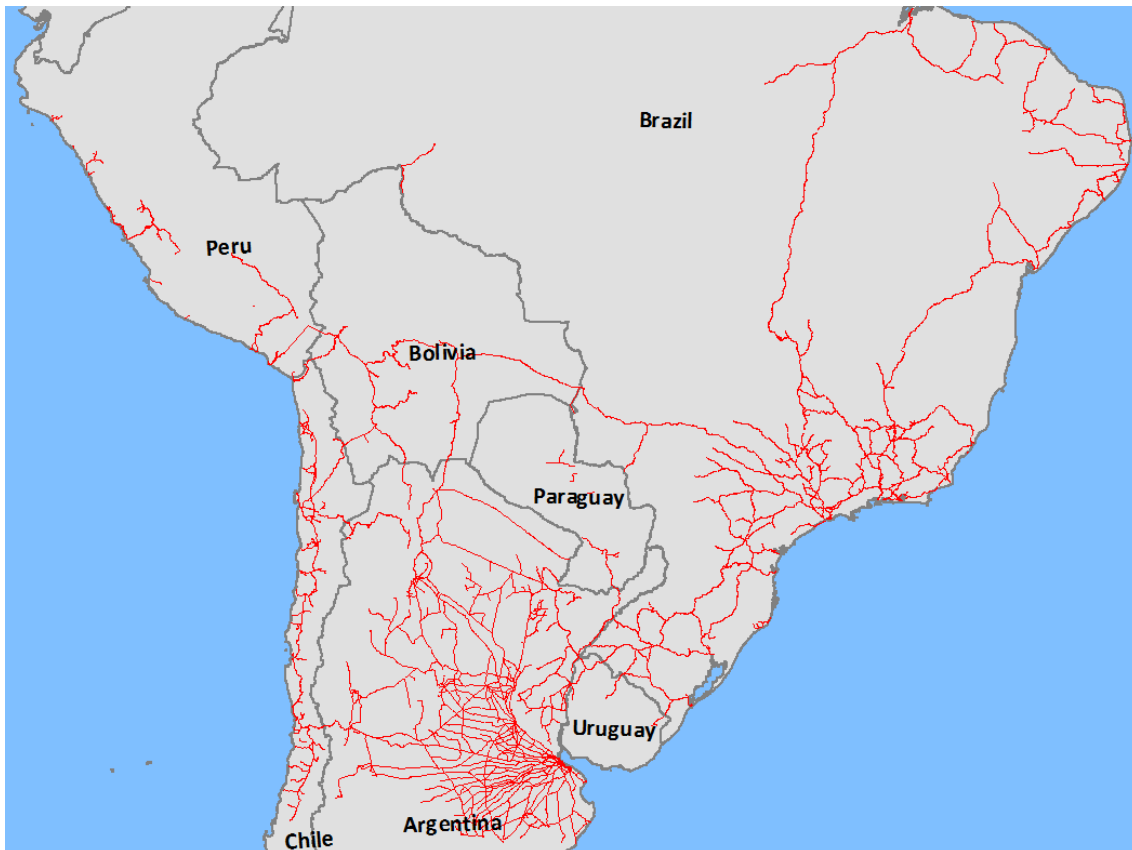


Figura 19: Redes ferroviarias principales

- La **red fluvial** hace uso de los numerosos ríos navegables y lagos de la cuenca del Amazonas, así como de la conexión con la hidrovía Paraguay-Paraná a través de Puerto Suárez. Dicho modo de transporte no ha sido tenido en cuenta a la hora de realizar la experimentación de este trabajo debido a que, para la consecución de los objetivos específicos del mismo, no es relevante. El transporte fluvial representa un medio de interés que está siendo potenciado en la actualidad mediante obras de incremento del calado, mantenimiento de vías, desarrollo de instalaciones portuarias y mejora de las barcazas empleadas. La cartografía referente a la red fluvial se muestra a continuación:



Figura 20: Hidrovías

- La **red de aeropuertos** cuenta con un total de 38 aeropuertos de los cuales 21 están pavimentados y 14 son internacionales. Representa un modo de gran importancia para el transporte de pasajeros y para mercancías de alto valor añadido.

En Bolivia operan un total de 14 aerolíneas que operan vuelos a nivel nacional e internacional. En la siguiente tabla aparecen dichas compañías aéreas:

Tabla 17: Aerolíneas que operan en Bolivia

| AEROLÍNEA | |
|-----------------------|---------------------------|
| Aerocon | Copa Airlines |
| Amazonas | VRG Linhas Aereas |
| Aerogal | Lan Airlines |
| Ecojet | Lan Peru |
| American Airlines | Peruvian Airlines |
| Aerolíneas Argentinas | Air Europa |
| Avianca | Boliviana de Aviación BOA |

En la siguiente figura, se muestran las rutas de operación desde Bolivia:



Figura 21: Principales rutas aéreas desde Bolivia

Los aeropuertos de Bolivia aparecen en la siguiente captura de pantalla:

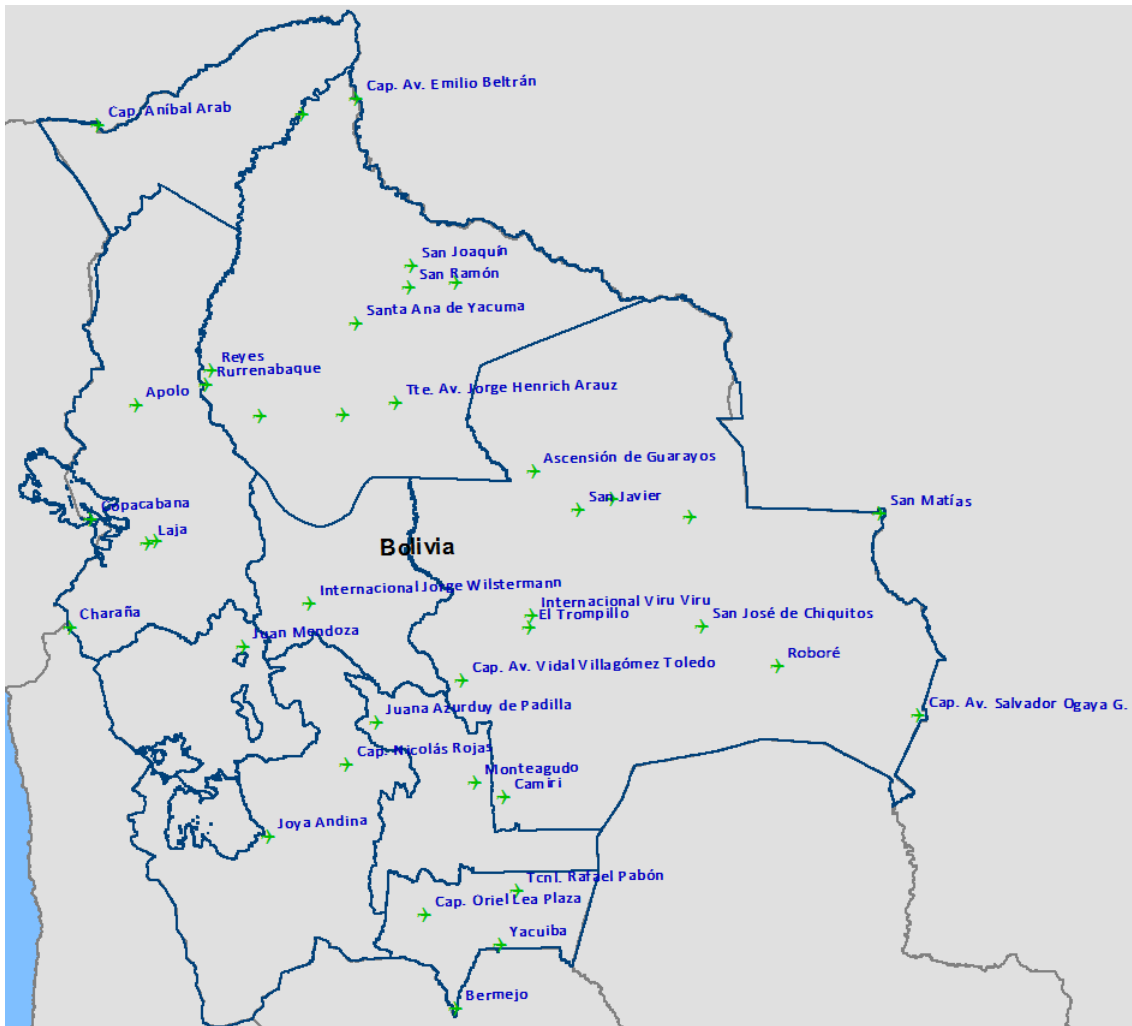


Figura 22: Principales aeropuertos de Bolivia

Por último, se han reflejado en otra capa las rutas marítimas más relevantes para el estudio a nivel mundial; así como los principales puertos de operación. Estos se muestran a continuación:

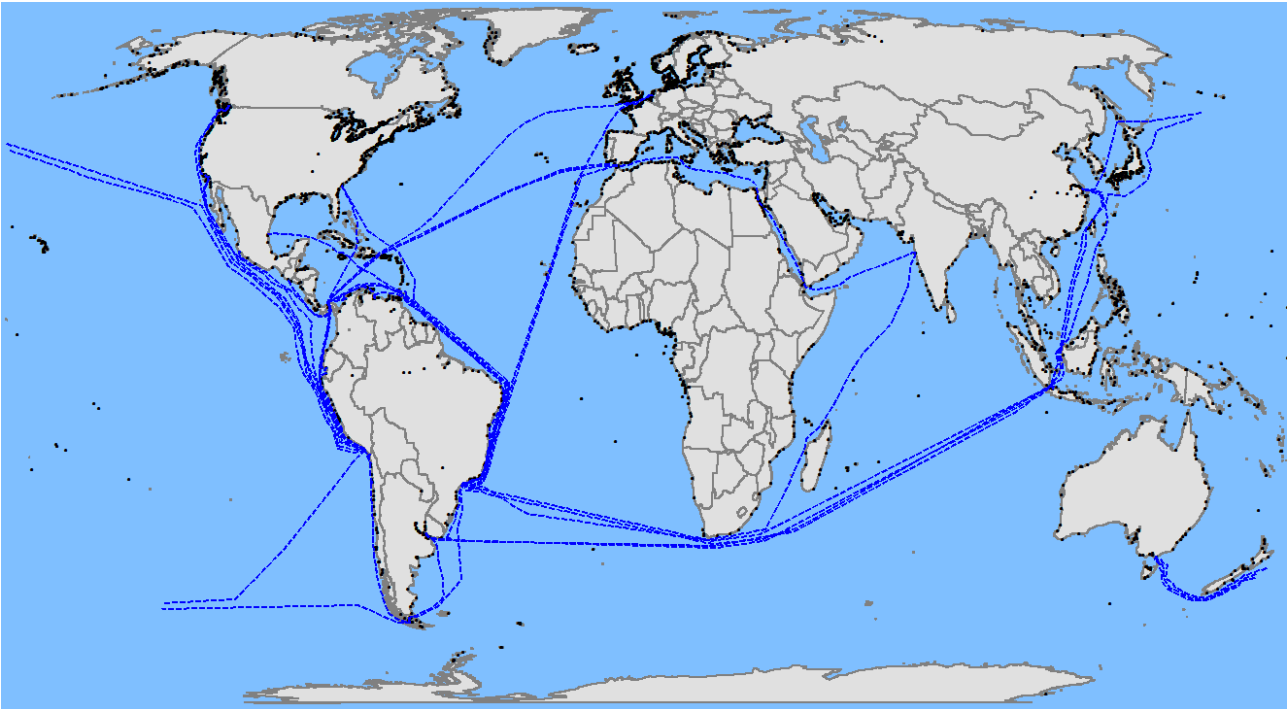


Figura 23: Rutas marítimas y principales puertos mundiales

En cuanto a la información que ha de proporcionar la red de transporte desarrollada, como mínimo, ha de ser la siguiente:

Tabla 18: Información que proporciona la red de transporte

Ubicación geográfica de cada nodo y cada tramo de la red.

Longitud de cada tramo de la red.

Tiempo de viaje por cada tramo de la red.

Costes asociados a cada tramo de red.

Otras características de los tramos de la red como pueden ser categorías, tipos de vehículos admitidos, capacidades, etc. Estas características adicionales dependen del medio considerado y serán detalladas a continuación.

Capacidad de los nodos de conexión e intercambio nodal.

Tiempos y costes asociados a los nodos de intercambio modal.

Otras características de los nodos de conexión.

La información relativa a las redes existentes para el modo carretero y ferroviario ha sido obtenida a partir de sistemas de información geográfica o SIG (GIS, en inglés). Los sistemas GIS contienen la información geográfica sobre las infraestructuras consideradas (permitiendo su representación gráfica) y poseen o se le puede dotar de datos que son necesarios para el análisis.

Dicha información viene dada mediante una tabla de base de datos para cada capa, en la cual, entre muchos otros campos específicos para cada capa, aparecen los siguientes:

Tabla 19: Atributos básicos de las principales capas

| Campo | Valores |
|------------|--|
| ID | Identificador |
| Length | Longitud |
| Dir | Dirección respecto a su trazado en plano |
| Tipo | Tipo de tramo |
| ISO | País |
| ISOCOUNTRY | Nombre ISO de país |
| Cost | Coste asociado al tramo |
| Time | Tiempo asociado al tramo |

Como se ha explicado, estos son los atributos más básicos con los que cuenta cada capa; pero realmente, cada una de ellas contiene muchos más, los cuales son específicos de la naturaleza de cada una.

Las capas de red deben de cumplir una propiedad fundamental, en particular las que corresponden a capas de líneas, que es la denominada **conectividad**. Esto quiere decir que todos aquellos tramos que se encuentren unidos en la realidad lo deben de estar también en la cartografía, lo que no siempre sucede en las cartografías empleadas para visualización ya que en éstas se buscan únicamente una representación aproximada de la red. Si una red no está conectada, al aplicar las herramientas de planificación se producirán errores que imposibilitarán su ejecución. La figura precedente muestra un ejemplo de un problema de conectividad.

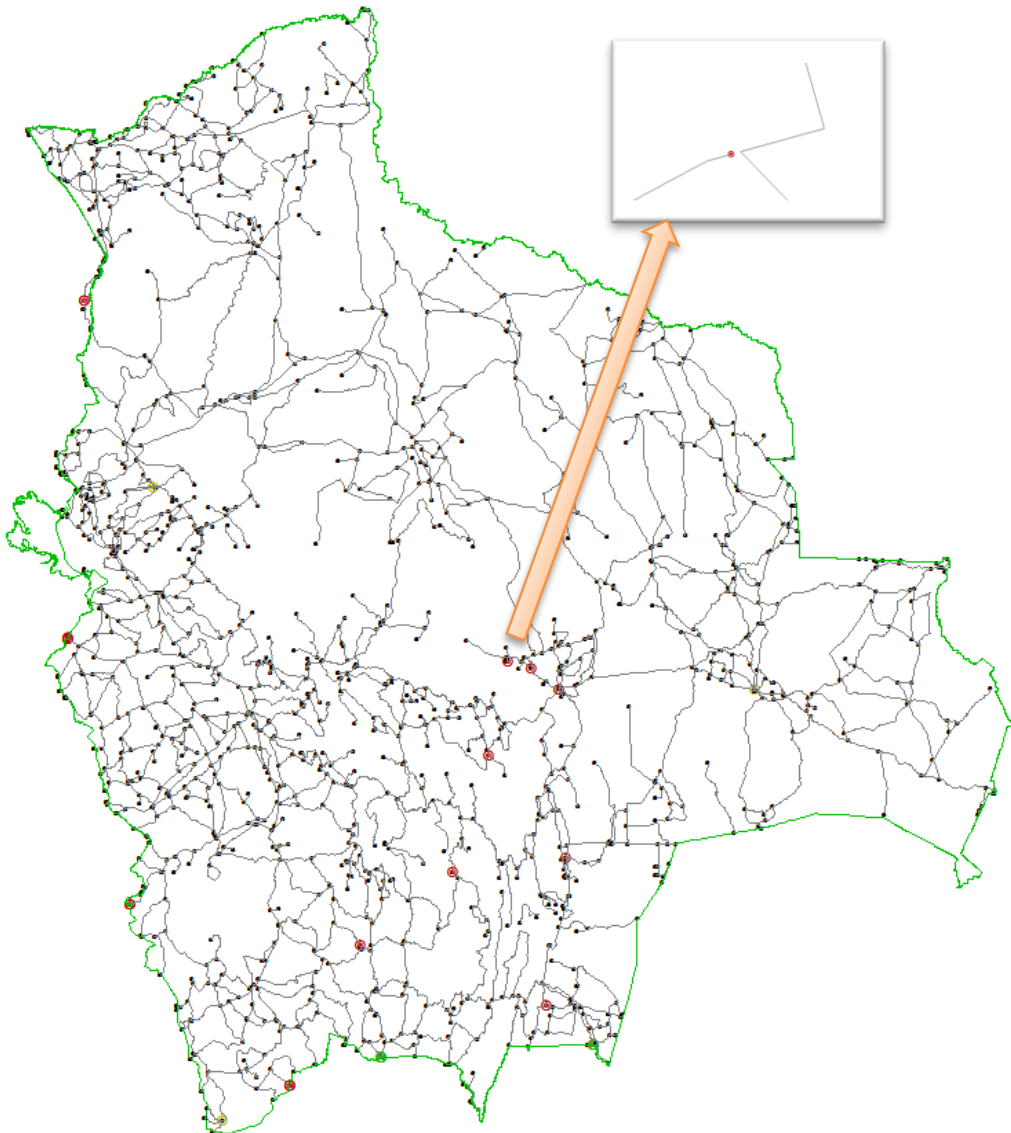


Figura 24: Ejemplo de problema de conectividad

Con todas ellas se ha empleado una herramienta que chequea la conectividad de las líneas en la cual se puede elegir el umbral de análisis, es decir, la separación entre puntos.

4.6 Experimentación y resultados buscados

4.6.1 Validación del modelo

Una vez que se ha completado el modelo se ha de realizar el proceso de validación del mismo. Este proceso se realizará en los siguientes niveles:

1. Verificación del modelo implementado.

Consiste en realizar un conjunto de pruebas de ejecución del modelo variando los parámetros de entrada para comprobar la correcta ejecución del modelo y la revisión de los resultados por el equipo de expertos en modelización.

2. Validación mediante datos históricos.

Se realiza de dos formas:

- a. En el ajuste de los modelos de regresión la primera etapa, en la calibración del modelo gravitacional en la segunda etapa y en el ajuste de los modelos logit en la tercera etapa, cada uno de los modelos estadísticos será validado conforme a los procedimientos habituales. En el caso de los modelos de regresión se realizará un análisis de los residuos estimando:
 - i. El coeficiente de determinación R^2 .
 - ii. La bondad de ajuste de los parámetros del modelo mediante test T.

En el caso de la calibración de los modelos logit y gravitacional el método de validación se describe en la sección correspondiente.

- b. Por otro lado, una vez se aplica el modelo completo en el tiempo actual se realizará una comparación entre los flujos asignados a cada tramo de red y los observados actualmente en los puntos en que se conozcan.

4.6.2 Resultados esperados

La siguiente tabla resume el conjunto de resultados que se generarán, indicando el formato y los objetivos del estudio que su estimación permitirá cumplir.

Tabla 20: Resultados esperados obtenidos del modelo

| Resultado | Formato | Resultados esperados obtenidos |
|--|----------------|--|
| Tráfico por tipo de mercancía, tramo de red, y período de tiempo | Tabla de datos | Flujos de transporte en cada tramo. |
| Mapas de asignación a red | Imagen | Flujos de transporte en cada tramo |
| Nivel de ocupación de capacidad máxima por tramo y período de tiempo | Tabla de datos | Determinar el nivel de saturación de cada tramo para identificar cuellos de botella. |
| Mapas de congestión | Imagen | Visualización del nivel de ocupación de transporte en cada tramo |
| % de reparto modal por tipo de mercancía y período de tiempo | Tabla de datos | Determinar el flujo y volumen de carga por modo. |
| Tiempo mínimo de transporte entre cada par origen – destino por tipo de mercancía y período temporal | Tabla de datos | Comparación entre los tiempos de viaje. |
| Coste mínimo de transporte entre cada par origen – destino por tipo de mercancía y período temporal | Tabla de datos | Comparación entre los tiempos de viaje. |

5. Experimentación y resultados

La experimentación realizada en este trabajo trata de cubrir los objetivos iniciales del proyecto mencionado anteriormente. Para ello, se ha realizado un estudio del flujo de mercancías de Bolivia atendiendo a los datos relativos a exportaciones e importaciones.

5.1 Etapa de producción y atracción

Como se ha comentado anteriormente, en esta etapa se obtienen las cantidades que han de ser transportadas desde un conjunto de orígenes hasta un conjunto de destinos.

Al tratarse de un modelo de transporte de mercancías, dichas cantidades se expresarán en toneladas transportadas por tipo de mercancía.

Para la obtención de los datos relativos a producción y atracción de los diferentes orígenes y destinos considerados, se ha hecho uso de la base de datos de Comercio Exterior del año 2015, la cual ha sido obtenida del INE de Bolivia. En ella, vienen reflejados todos los movimientos de mercancías relativos a exportación e importación desde Bolivia hasta los distintos [países](#) considerados anteriormente. Asimismo, esta base de datos proporciona una descripción detallada del tipo de mercancía, departamento de salida (exportación) o llegada (importación) a Bolivia, así como el país al que se dirige o del que viene dicha carga. Por otra parte, también se indican el modo de transporte y la cantidad transportada para cada viaje.

En cuanto a toneladas transportadas, las exportaciones de Bolivia se producen fundamentalmente a países latinoamericanos (fundamentalmente a Brasil y Argentina). Esto se puede apreciar en la siguiente figura, en la que aparecen las toneladas de mercancía exportadas desde Bolivia en ese año:

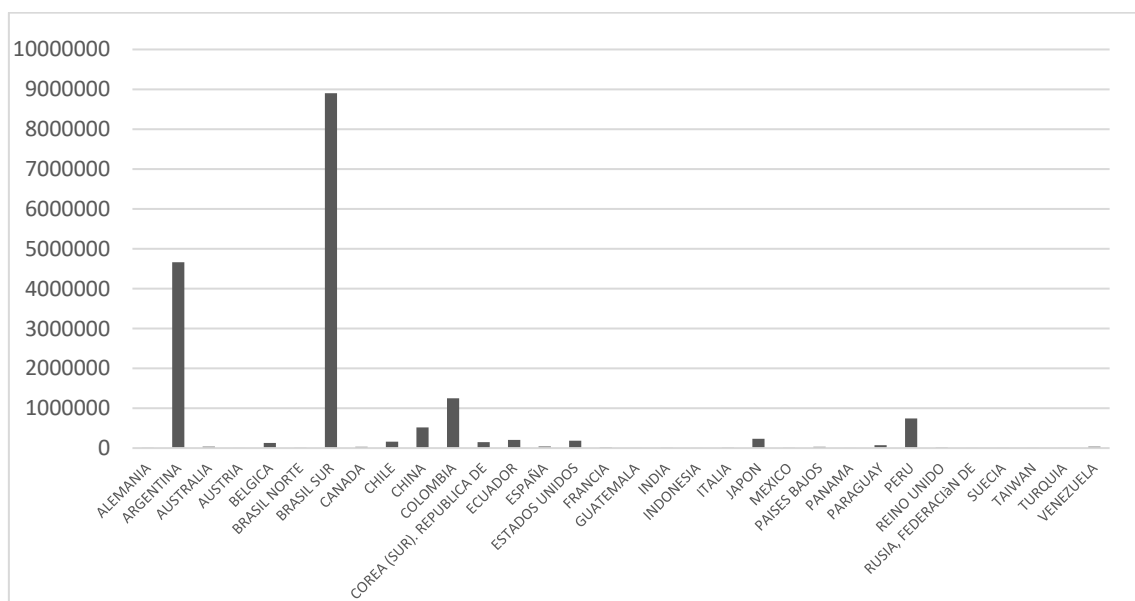


Figura 25: Toneladas exportadas desde Bolivia de mercancía general según el país de exportación

En cuanto al modo de transporte más ampliamente utilizado para realizar las exportaciones de dichas mercancías, tal y como se puede ver a continuación, destaca el transporte por carretera, junto con el transporte por vía ferroviaria y fluvial, siendo el transporte de mercancías por vía aérea prácticamente inexistente en comparación con el resto.

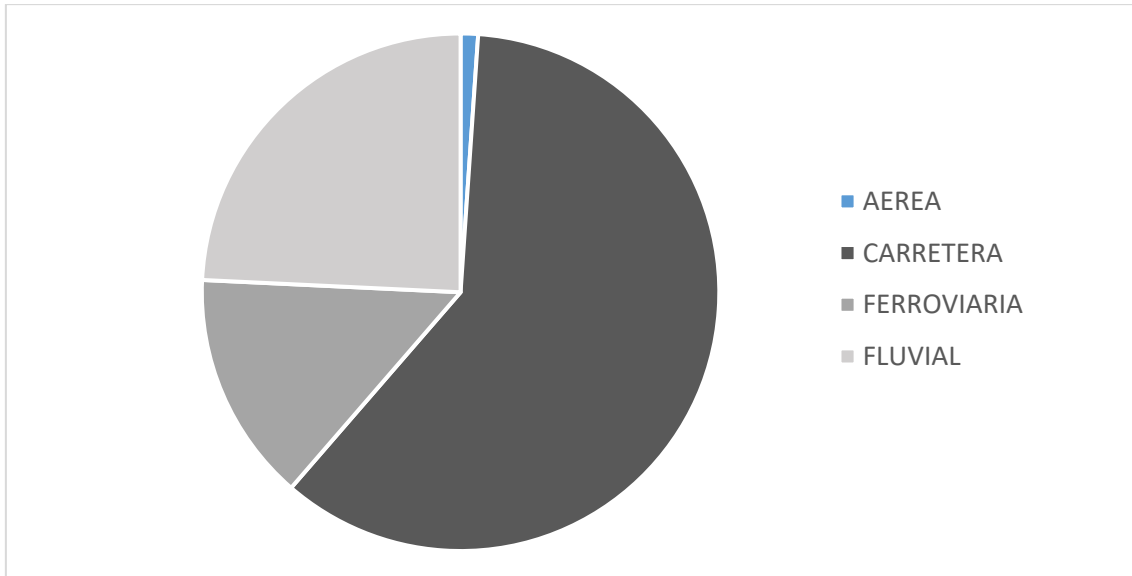


Figura 26: Exportación de mercancías según modo de transporte

Con referencia a los tipos de mercancías, la siguiente figura muestra la proporción sobre el total exportado de cada tipo, en la cual, destacan los graneles líquidos sucios:

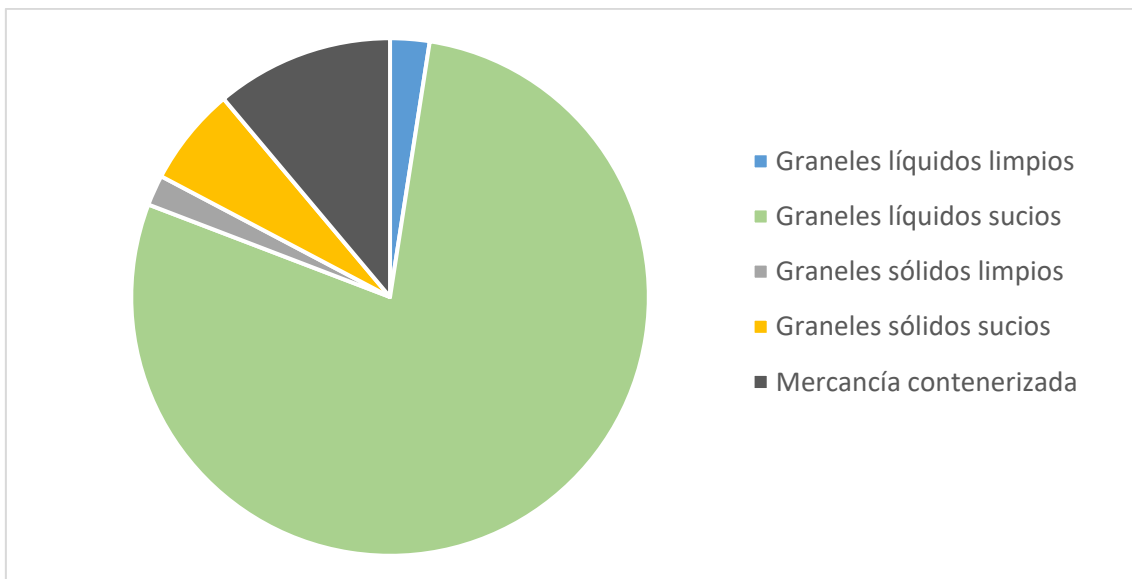


Figura 27: Exportación según tipo de mercancía

En cuanto a las importaciones, se muestra en la siguiente figura los principales países de los que Bolivia importa mercancía, destacando principalmente Argentina, China y Perú.

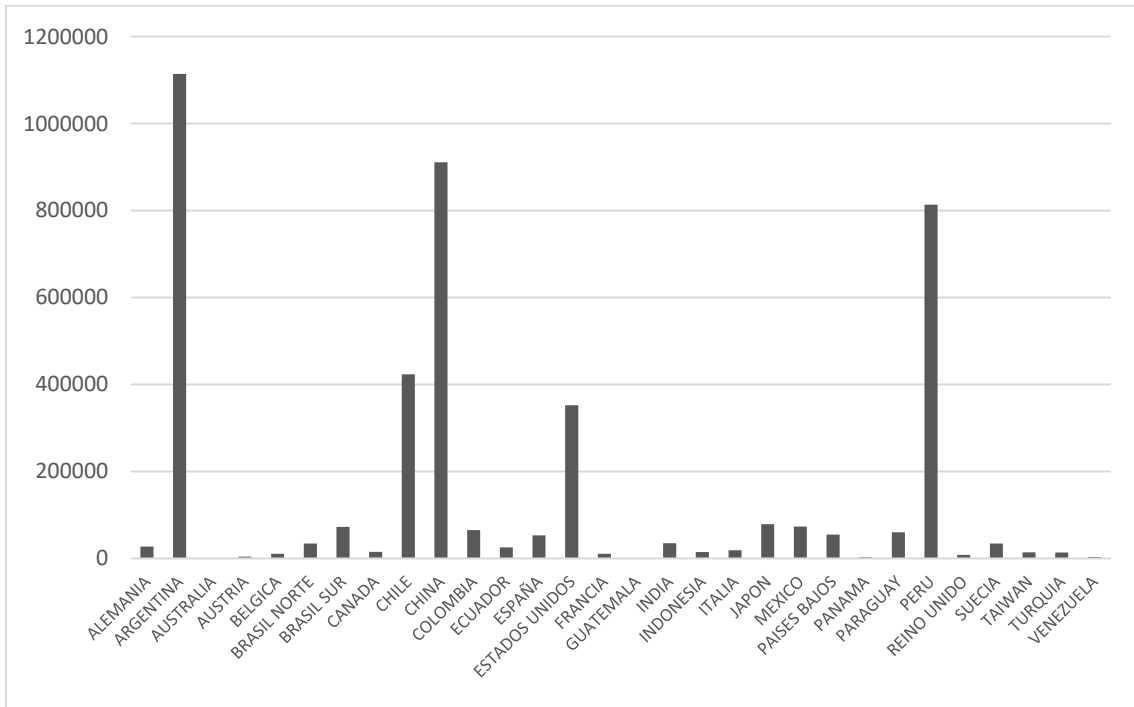


Figura 28: Toneladas importadas desde Bolivia de mercancía general según el país de importación

Con relación a los medios de transporte empleados para realizar dichas importaciones, la mayor influencia vuelve a recaer sobre el transporte por carretera:

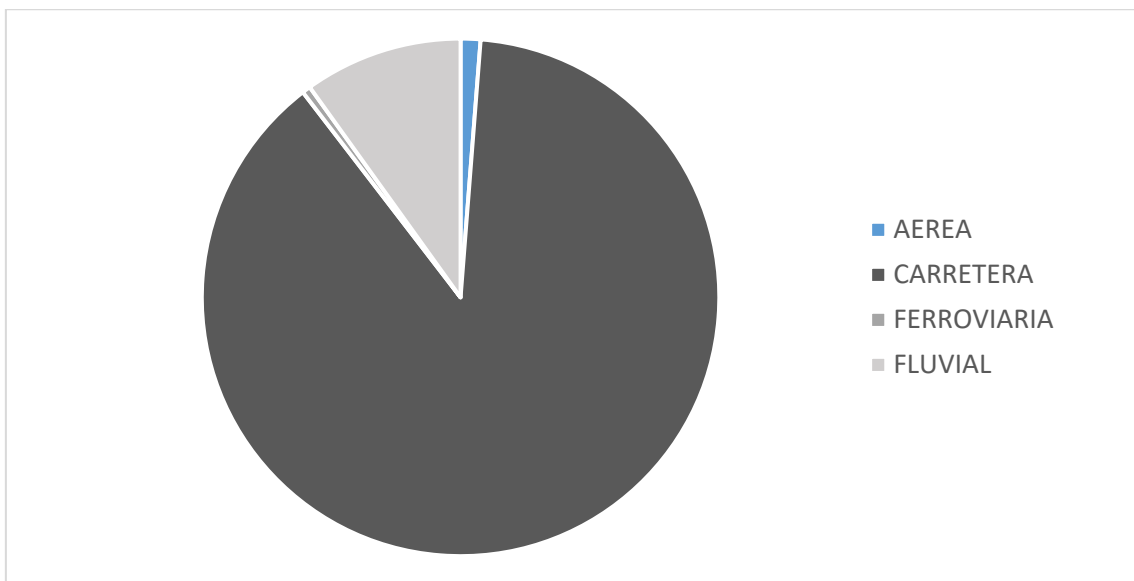


Figura 29: Importación de mercancías según modo de transporte

Por último, en cuanto a la categoría de mercancías importada, a diferencia de lo que ocurría con las exportaciones, la mercancía contenerizada se corresponde con aquella de la que se importa mayor tonelaje en comparación con las otras; siendo la proporción importada de esta más de la mitad de la total. Asimismo, cabe destacar las importaciones de graneles líquidos sucios tal y como se muestra a continuación:

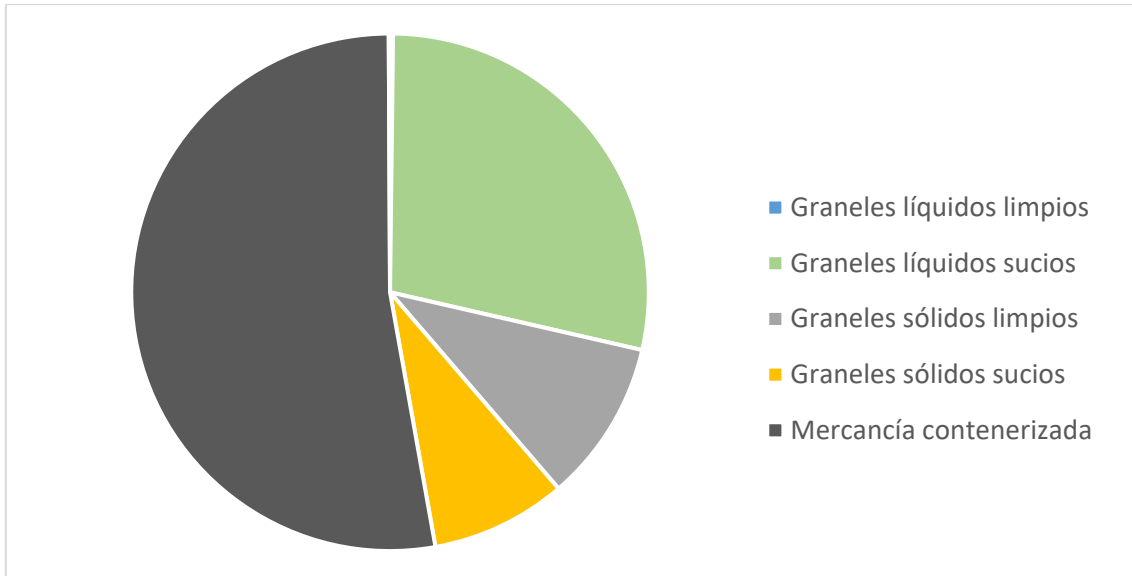


Figura 30: Importación según tipo de mercancía

5.2 Etapa de distribución

El objetivo de esta etapa consiste en generar las matrices origen-destino para los diferentes tipos de mercancía considerados.

En primer lugar, hay que decir que los flujos de mercancía obtenidos a partir de la base de datos de Comercio Exterior son a nivel departamental. Por otra parte, tal y como se explicó antes, nuestro objetivo es realizar un análisis a nivel municipal. En consecuencia, se tendrá que llevar a cabo la desagregación de dichos viajes entre los distintos municipios que conforman cada departamento.

La metodología llevada a cabo para conseguir esto consiste en utilizar la población de cada municipio sobre el total de la del departamento para repartir el total de la mercancía transportada en cada viaje entre todos los municipios del departamento. Además, con el objetivo de alargar el horizonte temporal objeto de estudio, se plantea el uso del crecimiento de población municipal para obtener el crecimiento en cuanto a producción y atracción de cada nodo. Para ello, mediante regresión se han obtenido las proyecciones de la población de los distintos municipios de Bolivia, pues el censo más actualizado es el del año 2012.

Asimismo, mediante el filtrado según el tipo de mercancía de acuerdo con las categorías consideradas, se obtienen las distintas matrices origen-destino (a nivel municipal) por tipo de carga.

5.3 Etapa de reparto modal

Para llevar a cabo el reparto por modo de transporte de las distintas matrices origen-destino generadas en la etapa de distribución, se ha hecho uso de la información relativa al modo de transporte empleado para cada viaje que contiene la base de datos de Comercio Exterior de la que se habló anteriormente.

Consecuentemente, mediante un adecuado filtrado por modo usado, se reparten las distintas matrices origen-destino según el medio de transporte empleado. En este caso, y dados los objetivos de este estudio, se han considerado únicamente los modos carretero y ferroviario, puesto que son los dos más relevantes. La razón de exclusión del análisis del transporte fluvial ha sido que, en el momento de la realización del estudio, no se contaba con la cartografía actualizada para dicha red.

Una vez obtenidas las matrices origen-destino por tipo de mercancía y modo de transporte, se procede con la exportación de las mismas a TransCAD para seguir con la etapa de asignación a la red y así obtener las primeras conclusiones.

5.4 Etapa de asignación

El objetivo de esta etapa consiste en la asignación de los flujos de mercancía a cada uno de los tramos de la red del modelo para los transportes por carretera y ferrocarril que salen o llegan a Bolivia.

Para ello, como se comentaba anteriormente, es necesario importar desde TransCAD las matrices origen-destino obtenidas en la etapa anterior. Por otra parte, se necesita tener la propia red física reflejada en la cartografía del modelo, de lo cual se habló en el apartado de [implementación del modelo](#).

Con el objetivo de realizar dichas asignaciones de acuerdo a distintos criterios (mínima distancia, mínimo tiempo, mínimo coste, coste generalizado...), la cartografía del modelo debe contar con información referente a distancia, velocidad, coste, etc. para cada uno de los tramos de red considerados.

La distancia y coste han sido obtenidos directamente de los datos que fueron proporcionados, mientras que para el cálculo de la velocidad se ha tenido en cuenta la curvatura, pendiente, superficie y tipo de pavimento. A partir de estas dos variables se ha calculado el tiempo por cada tramo.

Los criterios elegidos para llevar a cabo la asignación del flujo de mercancías considerado figuran en la siguiente tabla:

Tabla 21: Criterios de asignación a la red

| CRITERIOS DE ASIGNACIÓN A LA RED |
|----------------------------------|
| Mínima distancia |
| Mínimo coste generalizado (VOT) |

La asignación a la red usando el criterio de mínima distancia es aquella que se tomaría en el caso en el que todos los tramos de la red fuesen perfectos, es decir, aquellos en los cuales no existiesen restricciones importantes en cuanto a velocidad debido al estado del pavimento y, por tanto, el tiempo no fuese un factor determinante.

Sin embargo, en la asignación por coste generalizado, el tiempo sí se considera un factor importante, considerándolo como un coste más (aparte del asociado a la propia red). En consecuencia, este criterio es el más realista de los empleados, puesto que, para la elección de la mejor ruta, tanto tiempo como coste deberán ser tenidos en cuenta. En este estudio, se plantea usar una función lineal del tiempo y coste ponderándolo mediante un parámetro de **valor del tiempo VOT** (*value of time*):

$$CG = C + VOT \cdot T$$

Donde CG es el coste generalizado, C el coste y T el tiempo.

La razón que ha determinado la elección de dichos criterios tiene que ver con la obtención de conclusiones desde el punto de vista de la identificación de aquellos tramos de carretera en los cuales hay mayor prioridad de actuación. La forma de realizar esto consiste en la obtención de la diferencia entre el flujo de toneladas de mercancía multiplicado por los kilómetros de cada tramo cuando se usa el criterio de mínima distancia (caso ideal, carretera en perfecto estado y sin restricciones de tiempo ni coste) y cuando se usa el criterio de mínimo coste generalizado (caso real, siendo tiempo y coste factores restrictivos). De esta manera, diremos que aquellos tramos para los cuales se produzcan diferencias mayores que 0 serán susceptibles de ser sometidos a actuaciones de mejora.

Para el caso de identificar los tramos que son más urgentes de mejorar, se ha desarrollado un análisis multicriterio en el cual se han tenido en cuenta los siguientes factores:

Tabla 22: Factores tenidos en cuenta para la priorización en la actuación sobre los tramos de carretera

| Factor | Descripción |
|----------|---|
| Factor 1 | Cuantificación de la mejora que supone la actuación sobre tramos en términos de reducción de distancia en el movimiento de la mercancía (cuanto mayor sea el factor, mayor potencial de mejora existe en cuanto a la reducción de distancia en el movimiento de carga para ese tramo) |
| Factor 2 | Cuantificación en función de la cantidad de carga que se transporte por tramo (cuanto mayor carga transportada, mayor será el factor) |
| Factor 3 | Cuantificación en función del potencial de mejora teniendo en cuenta el ahorro producido en términos de tiempo por toneladas transportadas (cuanto mayor sea dicho ahorro, mayor será el factor) |

Como la inversión pública destinada a la mejora de infraestructuras es limitada, habrá un número limitado de kilómetros sobre los que actuar. De esta manera, se calculará un orden de prioridad de actuación realizando para cada tramo la media geométrica entre cada factor considerado. Así, se han establecido 3 órdenes de prioridad que determinarán la urgencia que existe en la actuación sobre los tramos de carretera:

Tabla 23: Órdenes de prioridad de actuación sobre los tramos de carretera

| | |
|-------------------|-------------------|
| Orden Prioridad 3 | Urgencia elevada |
| Orden Prioridad 2 | Urgencia moderada |
| Orden Prioridad 1 | Urgencia leve |

Por otra parte, se ha realizado también la asignación del flujo de mercancías teniendo en cuenta las actuaciones que están previstas para el año 2020, las cuales tienen que ver con la mejora de la red de ferrocarril que conecta el Este y el Oeste del país mediante la construcción del llamado Corredor Ferroviario Bioceánico Central, así como la mejora de la conexión del centro de Bolivia con el puerto de Ilo. Dichas actuaciones tienen como objetivo la captación del tráfico de mercancías mediante la red de ferrocarril, la cual, es mucho más beneficiosa desde el punto de vista ambiental (menos emisiones de CO₂) y económico en comparación con la carretera. Para ello, se ha realizado la asignación a la red minimizando el coste generalizado a partir de la red actual de carretera y ferrocarril y esta ha sido comparada con la obtenida mediante la red futura, la cual contiene las futuras mejoras en las infraestructuras ferroviarias descritas anteriormente.

En el apartado de resultados se cuantificará la captación estimada por el ferrocarril tras dichas actuaciones, así como la identificación de los tramos más urgentes de ser sometidos a actuaciones de mejora.

En todos los casos se ha realizado una asignación **Multi-Modal Multi-Clase**. Dicho modelo de asignación consiste en una rutina implementada en el software de planificación TransCAD que destaca por su flexibilidad de aplicación (adecuada para movimientos nacionales e internacionales).

El algoritmo de asignación empleado para todos los casos es **Todo o Nada**, el cual fue explicado anteriormente en el [capítulo de metodología](#), y dependiendo del criterio elegido, se buscará, para cada par origen-destino, aquella ruta que minimice la distancia o el coste generalizado.

5.5 Resultados obtenidos

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos tras la realización de la etapa de asignación.

Hay que decir que TransCAD devuelve dichos resultados en forma de tabla, estableciendo el valor de las principales variables consideradas (tiempo, velocidad, coste, flujo de mercancías...) para cada ID correspondiente al tramo de red considerado. Para que estos puedan ser visualizados de manera más cómoda, es necesario unir esta tabla con la correspondiente a la cartografía, de manera que se añadan todos los campos de las variables de respuesta a sus IDs correspondientes. Una vez hecho esto, ya se pueden proyectar de forma gráfica en el mapa.

En primer lugar, se presentarán en el mapa aquellos tramos de la red de carreteras según sus órdenes de prioridad de actuación que fueron definidos en el apartado anterior:

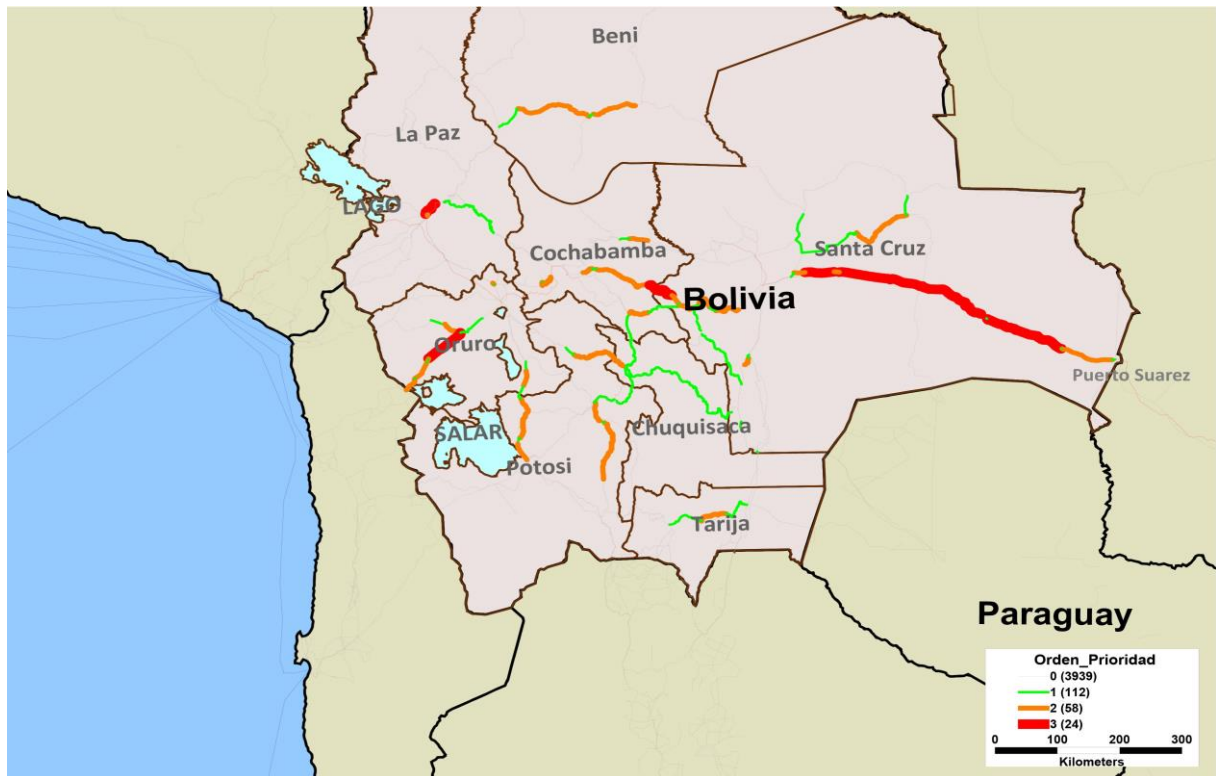


Figura 31: Tramos de carretera según su prioridad de actuación

Como se aprecia, el tramo que une Santa Cruz con Puerto Suárez es uno de los que ha resultado ser más urgente de ser sometido a actuaciones de mejora. Lo mismo ocurre con el tramo de carretera que cruza el centro del país junto con el que sale de Oruro y de La Paz.

En cuanto a la cuantificación y valoración de las actuaciones futuras debidas a la mejora de la red de ferrocarril derivadas de la construcción del Corredor Ferroviario Bioceánico Central, se ha comparado el reparto modal obtenido mediante la red actual con el de la red futura mediante el criterio de mínimo coste generalizado. Las siguientes figuras muestran ambos resultados:

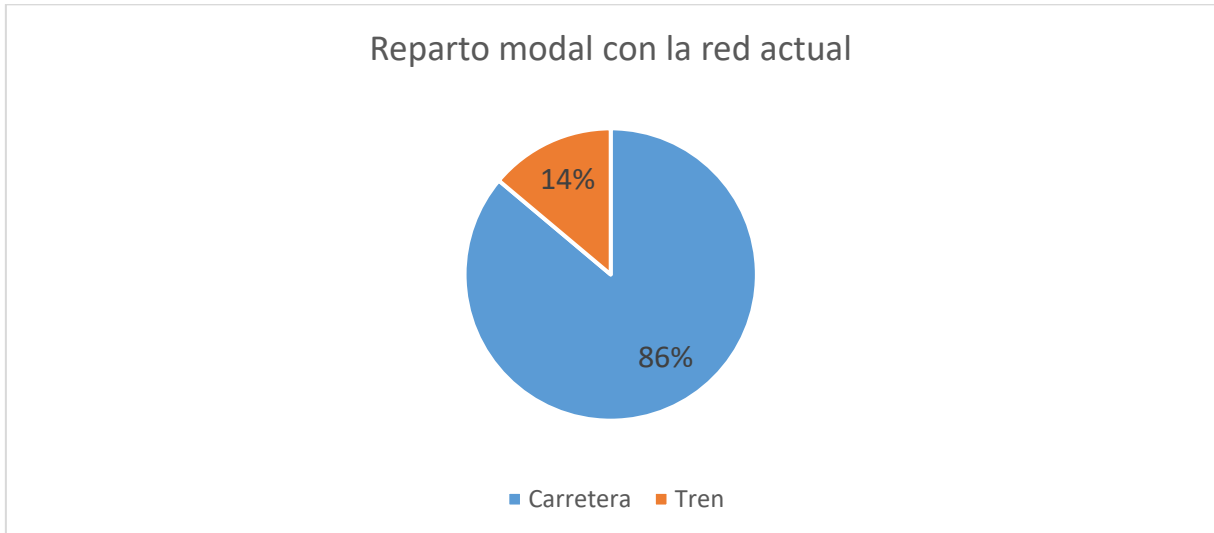


Figura 32: Reparto modal con la red actual

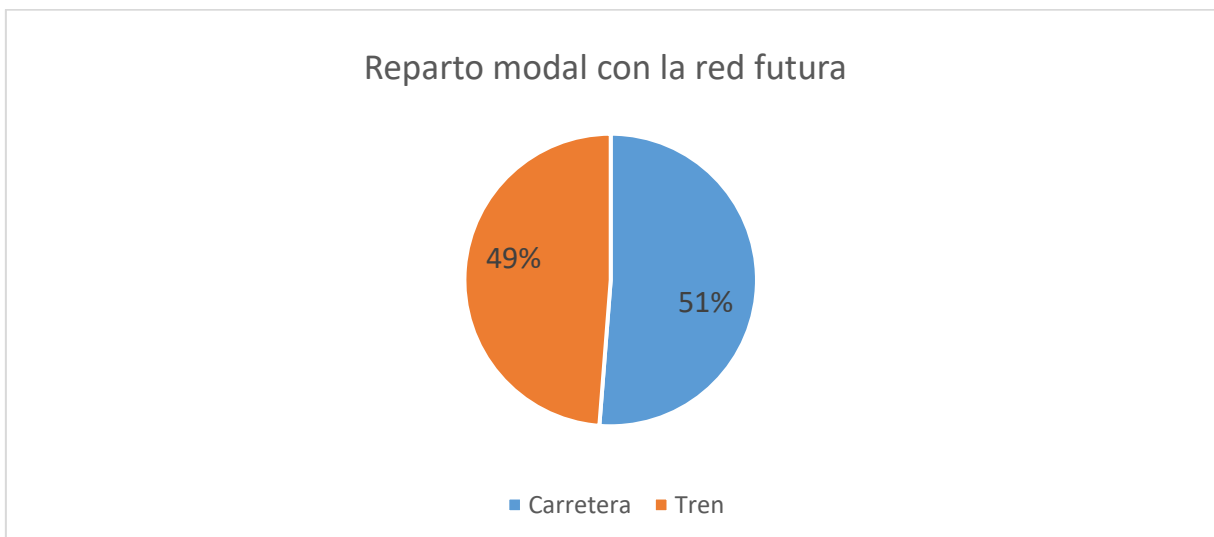


Figura 33: Reparto modal con la red futura

Como se puede ver, las diferencias son evidentes. Mediante la construcción del CFBC, la atracción de flujo llevada a cabo por el ferrocarril es considerablemente relevante. De hecho, casi la mitad de la mercancía se transportará mediante tren, haciendo que disminuyan los costes de transporte y se reduzcan las emisiones de CO₂ como se demostrará posteriormente.

En cuanto a la comparación teniendo en cuenta el reparto modal por tipo de mercancía, se muestran las siguientes figuras:

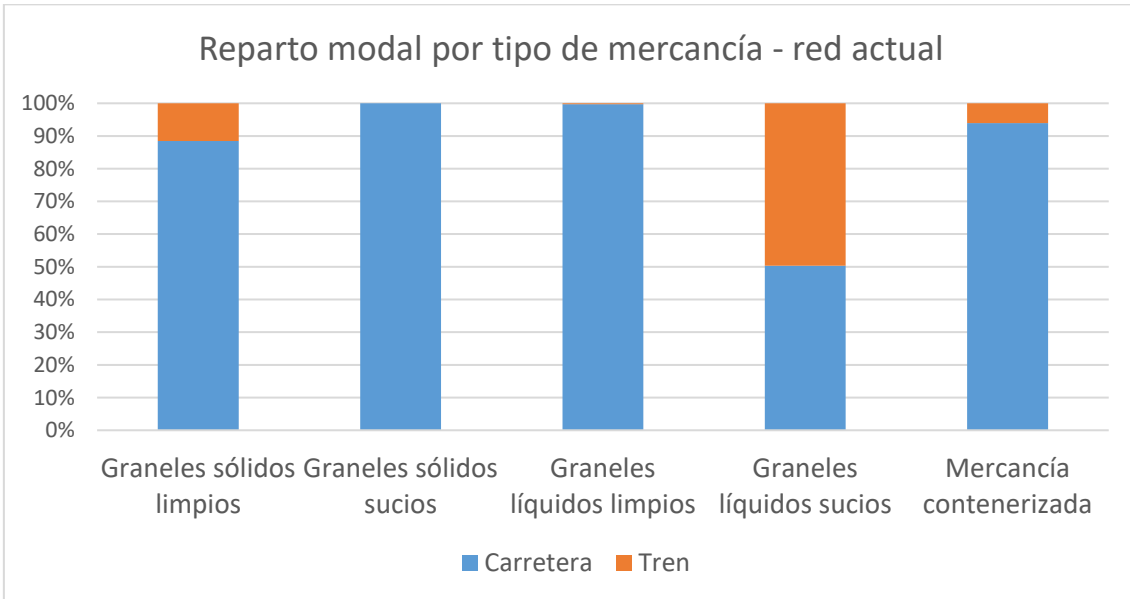


Figura 34: Reparto modal por tipo de mercancía con la red actual

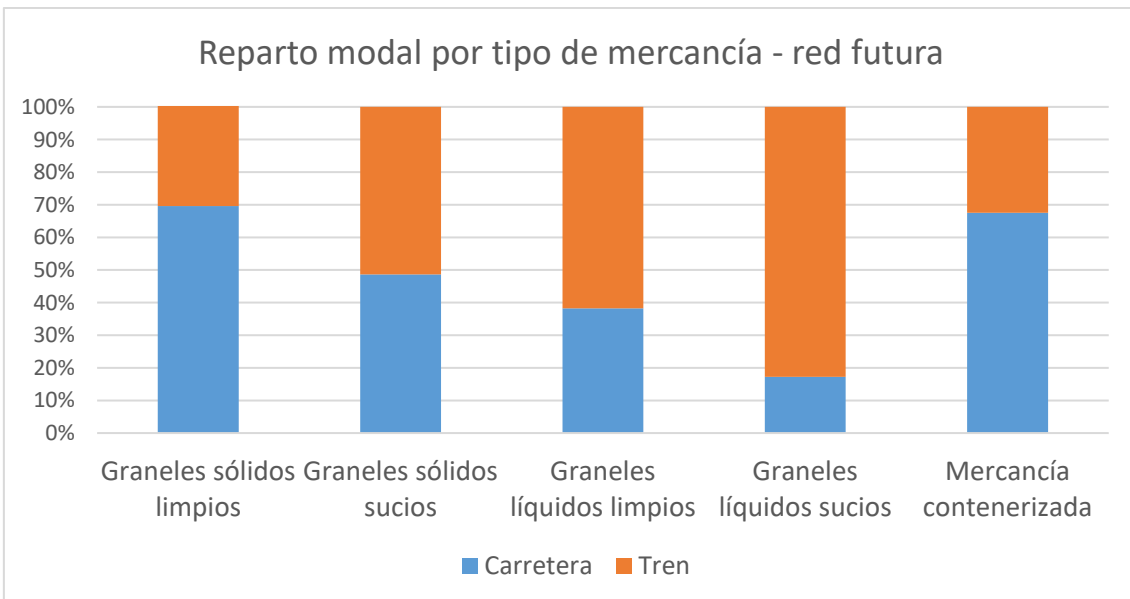


Figura 35: Reparto modal por tipo de mercancía con la red futura

Atendiendo a la categoría de mercancía transportada, las diferencias también son evidentes; sobre todo cuando se trata de graneles sólidos sucios y líquidos limpios, para los cuales, con la red actual, el porcentaje de captación de la carretera es prácticamente total; mientras que, con la red futura, este desciende a valores inferiores a la mitad.

Por otra parte, es conveniente destacar el coste de operación de transporte para flujos de exportación de Bolivia en comparación con otros países de su entorno:

Tabla 24: Coste de exportación por país. (Banco Mundial)

| País | Coste de exportación (\$/container) |
|---------|-------------------------------------|
| Bolivia | 1440 |
| Chile | 910 |
| Perú | 890 |
| España | 1310 |
| China | 823 |

Este valor representa un importante indicador acerca de la competitividad del país. A la vista de los resultados, el coste de exportación de Bolivia es considerablemente superior al de países situados en su entorno (Chile o Perú), y más aún cuando este es comparado con un país exportador por excelencia como es China. En consecuencia, estos valores justifican la realización del estudio acerca del potencial de mejora en cuanto a costes que supondrá la construcción del CFBC en el futuro.

En cuanto a la reducción que se produce en cuanto a costes de operación de transporte para flujos de exportación e importación, así como al ahorro en emisiones de CO₂ tras la construcción del CFBC debido a la captación de tráfico por parte del ferrocarril, la siguiente tabla contiene los resultados que justifican dicha actuación:

Tabla 25: Reducción en costes y emisiones tras construcción CFBC

| | Red actual | Red futura (con CFBC) | % Ahorro |
|--|------------|-----------------------|----------|
| Coste de op. de transporte para flujos de exportación e importación (M \$/año) | 561,2 | 486,2 | 13,37% |
| Emisiones de CO ₂ (ton) | 556.670,6 | 485.195,2 | 12,84% |

Por último, en las siguientes figuras, aparece reflejado el reparto del flujo total de mercancías en función del criterio de asignación elegido:

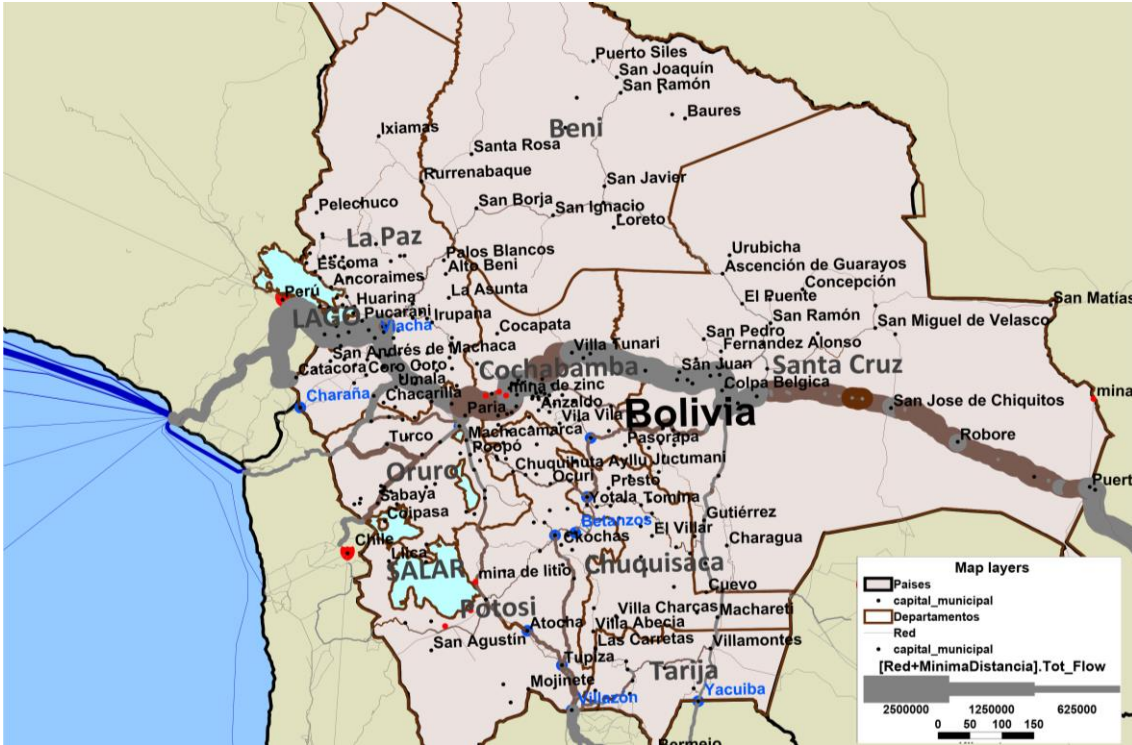


Figura 36: Flujo de mercancías mediante el criterio de mínima distancia



Figura 37: Flujo de mercancías mediante el criterio de mínima coste generalizado con la red actual

Como se aprecia, mediante el criterio de mínima distancia, se mueve mucha más mercancía (trazo más grueso) desde Santa Cruz a Puerto Suárez que con el de mínimo coste generalizado; sin embargo, hay menor flujo transportado por vía marítima desde el puerto de Arica y hasta el mismo, así como por el tramo que se dirige a Chile.

En estas figuras, aparecen los tramos de carretera en función del estado en el que están dependiendo de la velocidad máxima permitida según el siguiente código de colores:

Tabla 26: Código de colores para la caracterización de los tramos de carretera

| | |
|-----------------------|---------------------|
| Buen estado | Color gris |
| Estado regular | Color marrón claro |
| Mal estado | Color marrón oscuro |

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1 Conclusiones

En este trabajo se ha llevado a cabo la definición de un modelo de transporte de mercancías enmarcado dentro de un proyecto de consultoría internacional cuyo objetivo es el estudio de la evaluación de sistemas multimodales de transporte de mercancías desde múltiples puntos de vista.

Aparte de la definición del modelo de transporte, se ha realizado el desarrollo de distintos experimentos con vistas a la obtención de los resultados preliminares de dicho proyecto.

Asimismo, mediante un completo análisis de escenarios, el modelo permite establecer cuál de las opciones propuestas es la que permite obtener mejores resultados en función de distintos criterios. Se ha hecho uso de diferentes métodos y datos de entrada. Por otra parte, 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.
- Variables del sistema: Se podrán establecer escenarios basados en costes. 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 otra de las variables fundamentales del sistema, se podrán establecer escenarios de tiempos tanto en lo referente a tramos, sobre todo relacionados con la velocidad permitiendo apreciar las variaciones que suponen al cambiar de un valor a otro 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.

En consecuencia, un profundo análisis de los resultados del proyecto conducirá a un modelo que podrá ser usado como herramienta para la toma de decisiones.

Dicho modelo permite tener en cuenta diferentes niveles de resolución geográficos y económicos, lo que presenta una importante ventaja cuando se tiene 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. Este último caso ha sido el objeto de análisis del apartado de experimentación, ya que, hasta el momento, sólo se ha dispuesto de datos referentes a Comercio Exterior.

Los resultados del modelo se generan con un formato que facilita su importación desde sistemas de visualización SIG. Por ello, es fácil integrar la herramienta de modelización empleada para ofrecer un servicio de modelización completo que abarque todas las etapas de desarrollo del proyecto. En el caso de estudio que nos ocupa, se ha hecho uso del software comercial TransCAD, el cual ha servido de apoyo para la ejecución del modelo permitiendo el empleo de distintos métodos para el correcto desarrollo del trabajo.

Por último, atendiendo a los resultados obtenidos tras la experimentación, se han obtenido las conclusiones reflejadas en la siguiente figura:

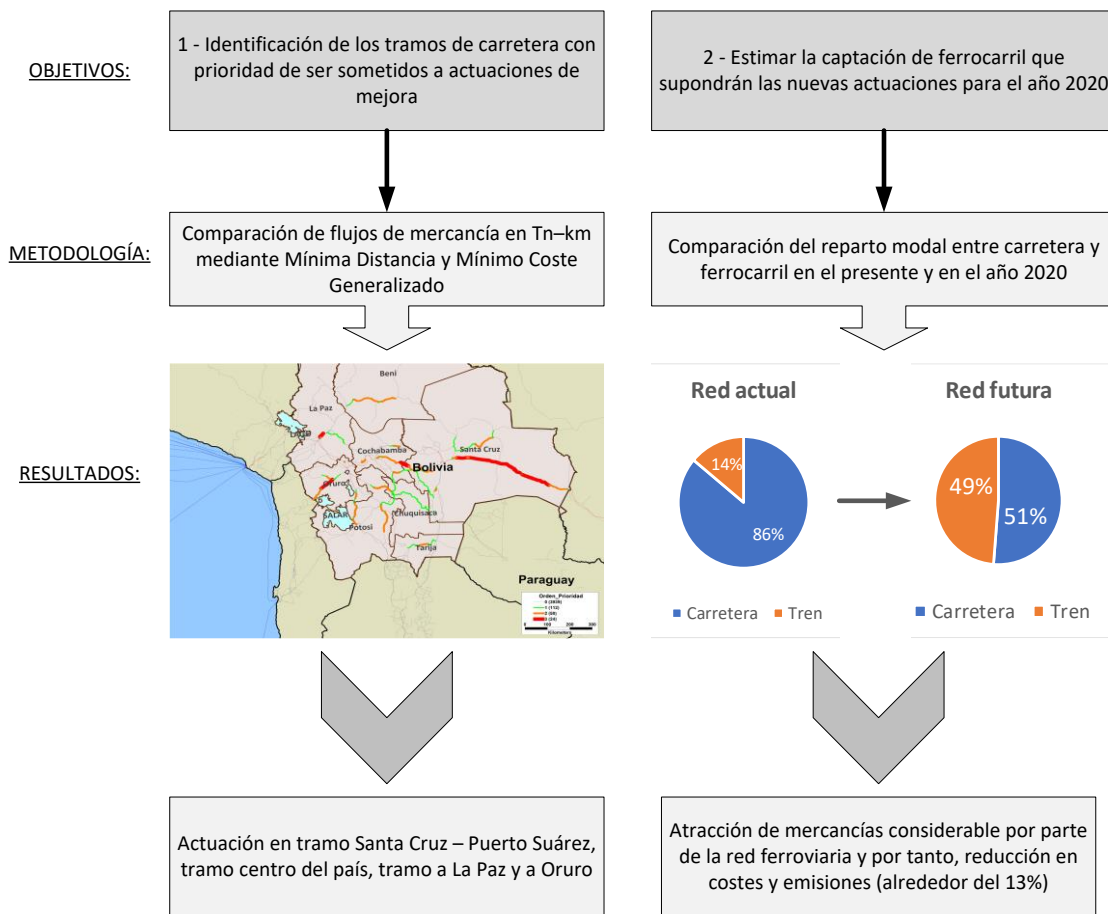


Figura 38: Conclusiones tras la experimentación realizada

6.2 Futuras líneas de investigación

El estudio realizado pone de manifiesto la relevancia que tienen los modelos de transporte en la fase de planificación de las infraestructuras atendiendo a la importancia y utilidad de las conclusiones extraídas.

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. Una línea de investigación que se presenta en este sentido es la investigación e implementación de una metodología que permita la optimización, ya no tanto de una 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.

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. Por lo tanto, se ha detectado una gran utilidad derivada de la consideración de tiempos de espera debido a la utilización de la red.

Consecuentemente, se 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, sino que se tendrán en cuenta el resto de nodos intermodales como son las terminales ferroviarias u otro tipo de puerto diferente a los marítimos como son los de los ríos navegables u aeropuertos.

Por tanto, en lo que se refiere al análisis del transporte teniendo en cuenta congestiones, se presenta de gran utilidad el desarrollo de algoritmos iterativos para la asignación de mercancías en nodos intermodales ya que 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 y, 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 un problema de este tipo de forma eficiente sea un reto que requiera futuro trabajo de investigación.

Bibliografía

- Burgholzer, Wolfgang, Gerhard Bauer, Martin Posset, and Werner Jammerneegg. 2013. "Analysing the Impact of Disruptions in Intermodal Transport Networks: A Micro Simulation-Based Model." In *Decision Support Systems*, , 1580–86.
- Bussieck, M. R., T. Winter, and U. T. Zimmermann. 1997. "Discrete Optimization in Public Rail Transport." *Mathematical Programming* 79(1–3): 415–44.
- Campos Méndez, Javier, and María Pilar Socorro Quevedo. 2010. "El Transporte En La Sociedad Del Siglo XXI: Política de Transporte Europea Y Española." *Ekonomiaz. Revista de Economía Vasca*: 12–33. <http://www1.euskadi.net/ekonomiaz/downloadPDF.apl?REG=1024>.
- Caris, A., C. Macharis, and G. K. Janssens. 2011. "Network Analysis of Container Barge Transport in the Port of Antwerp by Means of Simulation." *Journal of Transport Geography* 19(1): 125–33.
- Chen, L., and E. Miller-Hooks. 2012. "Resilience: An Indicator of Recovery Capability in Intermodal Freight Transport." *Transportation Science* 46(1): 109–23.
- Comisión Europea. 2011. "Libro Blanco Del Transporte."
- Feo Valero, María; Espino Espino, Raquel; García Menéndez, Leandro. 2007. "No Title." : 25.
- Fierek, Szymon, Andrzej Szarata, and Jacek Zak. 2012. "Wykorzystanie Modeli Symulacyjnych Podrozy W Wielokryterialnym Wyborze Wariantów Rozbudowy Sieci Tramwajowej." In *Modelowanie Podrozy I Prognozowanie Ruchu – Modelling 2012*,.
- Di Francesco, Massimo, Michela Lai, and Paola Zuddas. 2013. "Maritime Repositioning of Empty Containers under Uncertain Port Disruptions." *Computers and Industrial Engineering* 64(3): 827–37.
- García-Menéndez, L., and M. Feo-Valero. 2009. "European Common Transport Policy and Short-Sea Shipping: Empirical Evidence Based on Modal Choice Models." *Transport Reviews* 29(2): 239–59.
- Heavenrich, R M. 2005. "Light-Duty Automotive Technology and Fuel Economy Trends: 1975 through 2005." *Ann Arbor* (June). http://www.nytimes.com/packages/pdf/business/20050728_EPA/Trends-3_3_20051.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/B118AE84-C595-4143-BFEE-DF4AB7E35B9C.
- Holguín-Veras, José. 2002. "Revealed Preference Analysis of Commercial Vehicle Choice Process." *Journal of Transportation Engineering* 128(4): 336–46.
- Holguín-Veras, José, Miguel Jaller, et al. 2011. "Freight Generation, Freight Trip Generation, and Perils of Using Constant Trip Rates." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2224: 68–81. <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2224-09>.

- Holguín-Veras, José, Iván Sánchez, et al. 2011. "Time-Dependent Effects on Parameters of Freight Demand Models." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2224(1): 42–50.
- 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.
- International Energy Agency. 2011. *Challenges IEA Scoreboard*.
- Jiménez Herrero, Luis M. 2007. "Manual de Cálculo Y Reducción de Huella de Carbono En El Sector Del Comercio." *Estudios Gráficos Europeos*: 65. www.rincondelgenio.com.
- 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 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.
- 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.
- Kaspi, Mor, and Tal Raviv. 2013. "Service-Oriented Line Planning and Timetabling for Passenger Trains." *Transportation Science* 47(3): 295–311.
- Marto Sargento, Ana Lúcia. 2009. "INTRODUCING INPUT-OUTPUT ANALYSIS AT THE REGIONAL LEVEL: BASIC NOTIONS AND SPECIFIC ISSUES." : 102.
- Ministerio de Fomento, Gobierno de España. 2016. "Observatorio Del Transporte Y La Logística En España."
- Novak, David C., Christopher Hodgdon, Feng Guo, and Lisa Aultman-Hall. 2008. "Nationwide Freight Generation Models: A Spatial Regression Approach." *Networks and Spatial Economics* 11(1): 23–41.
- 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.
- . 2013. "An Aggregate Transport Demand Model for Import and Export Flow Simulation." *Transport* 30(1): 43–54. http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16484142.2013.820215#.VXcOdM_tl8s.
- Ortúzar, J, and L. G Willumsen. 2011. *Modelling Transport*. 4th ed. ed. John Wiley&sons. Ltd., United Kingdom.
- Ortuzar, Juan de Dios, and Luis G. Willumsen. 2011. *Modelling Transport Modelling Transport*.

- Ribeiro, S Kahn, S Kobayashi, and M Beuthe. 2007. "Transport and Its Infrastructure." *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* 111(October 2008): 324–86.
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Transport+and+its+infrastructure#0>.
- Schuschny, Andrés Ricardo. 2005. *Tópicos Sobre El Modelo E Insumo-Producto: teoría Y Aplicaciones*. Santiago de Chile.
- StadieSeifi, M. et al. 2014. "Multimodal Freight Transportation Planning: A Literature Review." *European Journal of Operational Research* 233(1): 1–15.
- Wardrop, J G. 1952. "ROAD PAPER. SOME THEORETICAL ASPECTS OF ROAD TRAFFIC RESEARCH." *ICE Proceedings: Engineering Divisions* 1(A.M.R.R., PART II): 325–362(37).
<http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/ipeds.1952.11259>.

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Factores que intervienen en el movimiento de mercancías | 16 |
| Tabla 2: Modelos desarrollados en Europa. (de Jong et al. (2013))..... | 24 |
| Tabla 3: Modelos desarrollados en Europa. (de Jong et al. (2013))..... | 25 |
| Tabla 4: Ventajas y desventajas de modelos de producción y atracción (Jong et. al. (2012)) | 30 |
| Tabla 5: Tipos de transformación de datos para análisis por regresión | 32 |
| Tabla 6: Factores que influyen en la elección modal | 39 |
| Tabla 7: Tipos de modelos de reparto modal..... | 39 |
| Tabla 8: Tipología de preferencias para el desarrollo de encuestas | 40 |
| Tabla 9: Particularidades que se pueden añadir en un modelo MMA..... | 48 |
| Tabla 10: Clasificación a gran escala de los modelos empleados en el estudio..... | 53 |
| Tabla 11: Subíndices empleados | 54 |
| Tabla 12: Alternativas de transporte a carretera | 54 |
| Tabla 13: Estructuras de datos empleadas en el modelo | 55 |
| Tabla 14: Países considerados para el movimiento de mercancías | 59 |
| Tabla 15: Categorías de mercancías | 60 |
| Tabla 16: Principales capas que forman la cartografía del modelo | 62 |
| Tabla 17: Aerolíneas que operan en Bolivia | 68 |
| Tabla 18: Información que proporciona la red de transporte | 70 |
| Tabla 19: Atributos básicos de las principales capas..... | 71 |
| Tabla 20: Resultados esperados obtenidos del modelo..... | 74 |
| Tabla 21: Criterios de asignación a la red..... | 80 |
| Tabla 22: Factores tenidos en cuenta para la priorización en la actuación sobre los tramos de carretera..... | 81 |
| Tabla 23: Órdenes de prioridad de actuación sobre los tramos de carretera | 81 |
| Tabla 24: Coste de exportación por país. (Banco Mundial) | 86 |
| Tabla 25: Reducción en costes y emisiones tras construcción CFBC | 86 |
| Tabla 26: Código de colores para la caracterización de los tramos de carretera | 88 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1: Consecuencias de los cambios en la economía en las redes de transporte | 7 |
| Figura 2: Multimodalidad e intermodalidad. (Ministerio de Fomento (2016)) | 8 |
| Figura 3: Evolución del reparto modal en España. (Ministerio de Fomento (2016))..... | 10 |
| Figura 4: Objetivos del estudio. Elaboración propia | 14 |
| Figura 5: Relación entre los principales elementos del modelo de transporte | 26 |
| Figura 6: Modelo clásico de las 4 etapas. (Ortúzar and Willumsen 2011) | 28 |
| Figura 7: Software empleado para desarrollar el modelo. (www.caliper.com)..... | 28 |
| Figura 8: Elementos principales de la modelización | 52 |
| Figura 9: Estructura general del modelo | 53 |
| Figura 10: Diagrama del modelo conceptual | 56 |
| Figura 11: TAZs municipales | 58 |
| Figura 12. Mapa con los centroides de las TAZ exteriores..... | 59 |
| Figura 13: Captura de pantalla del modelo desarrollado..... | 61 |
| Figura 14: Capa de países | 62 |
| Figura 15: Capa de Departamentos de Bolivia | 63 |
| Figura 16: Capa de Departamentos y Provincias de Bolivia | 63 |
| Figura 17: Capa de Departamentos, Provincias y Municipios de Bolivia | 64 |
| Figura 18: Red de carreteras principales..... | 65 |
| Figura 19: Redes ferroviarias principales | 66 |
| Figura 20: Hidrovías..... | 67 |
| Figura 21: Principales rutas aéreas desde Bolivia | 68 |
| Figura 22: Principales aeropuertos de Bolivia | 69 |
| Figura 23: Rutas marítimas y principales puertos mundiales | 70 |
| Figura 24: Ejemplo de problema de conectividad..... | 72 |
| Figura 25: Toneladas exportadas desde Bolivia de mercancía general según el país de exportación..... | 75 |
| Figura 26: Exportación de mercancías según modo de transporte | 76 |
| Figura 27: Exportación según tipo de mercancía | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 28: Toneladas importadas desde Bolivia de mercancía general según el país de importación | 77 |
| Figura 29: Importación de mercancías según modo de transporte | 77 |
| Figura 30: Importación según tipo de mercancía..... | 78 |
| Figura 31: Tramos de carretera según su prioridad de actuación | 83 |
| Figura 32: Reparto modal con la red actual | 84 |
| Figura 33: Reparto modal con la red futura | 84 |
| Figura 34: Reparto modal por tipo de mercancía con la red actual..... | 85 |
| Figura 35: Reparto modal por tipo de mercancía con la red futura | 85 |
| Figura 36: Flujo de mercancías mediante el criterio de mínima distancia..... | 87 |
| Figura 37: Flujo de mercancías mediante el criterio de mínima coste generalizado con la red actual..... | 87 |
| Figura 38: Conclusiones tras la experimentación realizada | 90 |