

Comparación y validación de matrices origen-destino de viajes en Metro de Santiago obtenidas a partir de encuestas y de transacciones de pago

Cristóbal Pineda*, Daniel Schwarz, Esteban Godoy

Gerencia de Planificación y Control de Gestión, Metro de Santiago. Santiago, Chile

* Autor para correspondencia:
cpineda@metro.cl

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es comparar y validar la información de matrices OD, trasbordos y perfiles de carga de pasajeros de la red de Metro de Santiago desde dos fuentes de datos: encuesta OD y datos de tarjetas inteligentes. Por un lado, es posible extraer estos elementos directamente desde la encuesta OD, dado que la encuesta contiene en forma detallada la ruta de aquellos viajes encuestados. Por otro lado, las matrices OD se pueden estimar a partir de una metodología en base a datos de transacciones de tarjetas inteligentes en el sistema de transporte público integrado de Santiago. Aquellas matrices estimadas son asignadas en un modelo de equilibrio en transporte público, desde donde se obtienen los niveles de carga de pasajeros. Ambos conjuntos de demanda muestran una fuerte correlación entre ellos, lo que permitiría en el futuro lograr una complementación entre ambas fuentes de datos, lo que a su vez redundaría en acotar la realización de la encuesta OD para la obtención de datos de comportamiento de los viajeros, o focalizar los esfuerzos en aspectos necesarios en la obtención de datos desagregados, ahorrando recursos considerables en el futuro.

Palabras clave: demanda, transporte público, matriz O-D, encuesta O-D, tarjetas de pago, metro

ABSTRACT

The aim of this paper is to compare and validate data of OD matrices, transfers flows and passenger loads of Metro de Santiago from two data sources: OD survey and smart cards. On the one hand, these elements can be extracted directly from the OD survey, since this tool contains the route of those surveyed trips in detail. On the other hand, the OD matrices can be estimated using a methodology based on transaction data extracted from the smart card used in the integrated transit system in Santiago. Those estimated OD matrices are then assigned in an equilibrium transit model, where passenger loads are obtained. Both sets of demands showed a strong correlation between them, allowing in the future a complementarity between the two data sources, which in turn leads to narrow the realization of the OD survey to obtain data on travel behavior or focus our efforts on necessary aspects in order to obtain disaggregated data, saving considerable resources.

Keywords: transit demand, OD matrices, OD survey, smartcards, subway

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Contar con una matriz origen-destino de viajes en transporte público es fundamental para estudiar la caracterización de la demanda. Este aspecto es útil como dato de entrada para una cantidad relevante de otras labores. Por ejemplo, en la planificación y desarrollo del sistema de transporte en el largo plazo, se utiliza como información base para calibrar modelos de demanda y asignación en la red en modelos estratégicos en la situación actual, luego de lo cual es posible proyectar la evolución de la demanda y cuantificar impactos de proyectos estructurales en la red de transporte público en el futuro. Por otro lado, la caracterización de la demanda es útil en temas operacionales a corto y mediano plazo, como la programación de la oferta de transporte y definición de trazados a un nivel estratégico; y el análisis de la distribución de espacios y uso eficiente de la infraestructura de transporte a un nivel táctico y operacional, entre otros.

En el caso de Metro de Santiago (Chile), se realiza en forma anual, una encuesta origen-destino con el objetivo de cuantificar la demanda y analizar el comportamiento de usuarios en términos de elección de ruta dentro de la red, la cual incide concretamente en la planificación de la oferta de trenes en los distintos períodos del día, en el análisis de la red a nivel estratégico en cuanto a perfiles de carga, como datos de entrada en microsimulación de la infraestructura de estaciones frente a flujos de subida, bajada y trasbordos, lo que permite identificar usos eficientes de los espacios, e incluso, como apoyo en la definición de aspectos comerciales dentro de la red. Sin embargo, lo anterior involucra un alto volumen de recursos humanos y monetarios en la realización y procesamiento de la encuesta, pues la muestra incluye alrededor de 150.000 viajes en distintos períodos, dentro de las 108 estaciones de la red, lo que representa casi un 6% de los viajes de un día laboral.

Paralelamente, la utilización de una tarjeta electrónica de pago sin contacto para el transporte público de Santiago –tarjeta bip!–, que incluye la integración tarifaria entre bus y metro- y los sistemas GPS con los que se encuentran equipados los buses, provee una importante cantidad de datos que permiten caracterizar los viajes en el sistema. Entre la información más relevante, está aquella correspondiente al día, la hora y la posición geográfica exacta del bus o la estación de metro al momento de la realización de una transacción en el paradero o estación de subida a un servicio. Munizaga y Palma (2012) proponen, utilizando esta fuente de datos, un modelo para la estimación del paradero o estación de bajada de cada etapa de viaje en el sistema completo, es decir, ya sea de buses o metro, donde se identifica efectivamente el origen y el destino de alrededor de un 80% de los viajes en un día. Luego, es posible construir una matriz origen-destino para cualquier día y período deseado con esta metodología. Ocupando los mismos principios que el estudio anterior, la Gerencia de Operaciones y Servicios (GOS) de Metro utiliza una metodología similar para estimar una matriz origen-destino de viajes en este modo, considerando para ello sólo las validaciones realizadas en las estaciones del ferrocarril subterráneo.

En este trabajo, se presenta una comparación entre la matriz origen-destino obtenida mediante técnicas tradicionales de preferencias reveladas en la red –EOD Metro- con respecto a la matriz obtenida con la metodología propuesta por Munizaga y Palma (2012), así como la desarrollada por la Gerencia de Operaciones y Servicios de Metro, para el período punta mañana, en dos cortes temporales: abril 2013 y mayo 2014.

También en este trabajo, se realiza una validación de las estimaciones de los perfiles de carga en las distintas líneas de la red de Metro, utilizando como datos de entrada las matrices origen-destino obtenidas mediante ambas metodologías ya mencionadas. Por un lado, es posible construir desde la EOD Metro los perfiles de carga por período, dado que se pregunta directamente a los encuestados la ruta escogida entre el par origen-destino del viaje, es decir, las elecciones de estación de trasbordo por parte de los usuarios. Por otro lado, con las matrices origen-destino construidas mediante la metodología de Munizaga y Palma (2012) y la metodología de la Gerencia de Operaciones y Servicios de Metro, se realiza un proceso de asignación a la red de este modo, con lo que es posible construir los perfiles de carga. Ambos conjuntos de perfiles, al igual que en el caso de las matrices origen-destino, también muestran altos grados de correlación con los datos construidos a partir la encuesta de Metro, en ambos cortes temporales analizados.

Adicional a lo anterior, también se realizan comparaciones complementarias de los volúmenes de flujo de trasbordo por movimiento, los cuales permiten cuantificar el uso de este tipo de estaciones y de la infraestructura asociada, en períodos de alta congestión.

Todas las comparaciones descritas anteriormente podrían permitir en un futuro implementar metodologías de complementariedad entre ambas fuentes de datos. Por ejemplo, es posible reducir la muestra de la encuesta origen-destino y utilizar los datos masivos para construir perfiles de carga o analizar flujos de entrada, salida o trasbordos dentro de la red de Metro, incurriendo en ahorros considerables desde el punto de vista humano y monetario en la realización de la encuesta. Por otro lado, con la EOD es posible corregir sesgos en la metodología para la estimación de estaciones de bajada, punto importante cuando el 20% de los viajes no es posible identificarles efectivamente una estación o paradero de bajada con la metodología de Munizaga y Palma (2012); o robustecer la calibración de la asignación a la red en el modelo de transporte público en cuanto a elección de rutas y obtener flujos de trasbordo más cercanos a las condiciones imperantes en Metro.

2. DATOS Y PROGRAMAS COMPUTACIONALES

En esta sección, se describen las fuentes de datos y los programas computacionales utilizados para alcanzar los objetivos de este trabajo.

2.1 Matriz de viajes a partir de la encuesta origen-destino en Metro (EOD Metro)

La encuesta permite realizar, en primer lugar, una caracterización socioeconómica de los usuarios de Metro al recolectar antecedentes como la edad, sexo e ingreso de los usuarios, así como el propósito del viaje.

Por otra parte, respecto a la información asociada a los viajes propiamente tal, la encuesta recoge antecedentes referidos a la accesibilidad a la red por parte de los usuarios, a través de preguntas referentes al modo de acceso y egreso, así como las cuadras caminadas en el origen y destino del viaje. Finalmente, se levanta información respecto a la estructura de viajes de los usuarios en la red de Metro, obteniendo para cada viaje encuestado la secuencia de etapas realizada lo más precisamente posible. Esto es, estación de origen del viaje -donde es realizada la encuesta-, la o las estaciones de combinación utilizadas en su trayecto, y finalmente, la estación de destino.

La información levantada en la encuesta permite realizar una serie de análisis agregados y desagregados, ya que aparte de conocer la matriz entre estaciones, es posible construir con esta información el volumen de trasbordos para cada movimiento en una estación de combinación. Este aspecto es especialmente crítico en los períodos punta, cuando los volúmenes de flujo son altos. También es posible construir los perfiles de carga a partir de las subidas y bajadas determinadas en cada estación para cada uno de los sentidos en todas las líneas. Estos antecedentes apoyan la generación de los planes de operación así como la implementación de medidas de gestión y/o el desarrollo de proyectos de infraestructura de la red, permitiendo programar eficientemente los recursos y desarrollar proyectos de gestión o infraestructura en estaciones de trasbordo.

La metodología de la encuesta es la siguiente: se realiza en todas las estaciones de la red, entrevistando a los usuarios una vez que han traspasado los torniquetes, en días laborales, sábados y domingos en temporada normal, en un número limitado de períodos -usualmente alrededor de 8 horas durante un día laboral y alrededor de dos horas en sábados y domingos-. Para cada estación, el número de encuestas a realizar es de aproximadamente un 12% de la afluencia de la estación en el respectivo período para cada tipo de usuario -tarifa completa o tarifa estudiante (rebajada)-. En total, se realizaron más de 156.000 encuestas en el año 2013 en día laboral. En el año 2014, dado que no existieron cambios relevantes en la red -tales como nuevas líneas, extensiones o cambios relevantes en la oferta-, se decidió realizar una encuesta abreviada, en un número reducido de estaciones, totalizando alrededor de 83.000 encuestas en día laboral.

En una hora del período punta mañana, la afluencia en la red de Metro es de alrededor de 240.000 usuarios, por lo que el número de encuestas requeridas es de aproximadamente 29.000 en una hora de este período. La encuesta completa requiere de una muestra de aproximadamente 200.000 encuestas para los períodos indicados anteriormente, es decir laboral, sábado y domingo. La muestra es determinada de manera aleatoria por tipo de tarifa pagada. El factor de expansión de la muestra es estimado directamente como la razón entre la afluencia total de la estación y el número de encuestas realizadas para cada tipo de usuario.

Si bien la información recopilada a través de la metodología recién descrita presenta buenos resultados y ha sido validada con información externa e independiente, existe una serie de factores que han llevado a Metro a estudiar métodos alternativos para construir matrices de viajes en su red. Entre los factores más importantes se pueden considerar los siguientes:

- Aumento en los recursos requeridos y en la complejidad de la aplicación de la encuesta por crecimiento de la red de Metro: si bien la red actual de Metro aún permite estimar adecuadamente las matrices a partir de una muestra razonable, es necesario indicar que en los próximos años se espera un importante crecimiento de la red, con dos nuevas líneas, dos extensiones y 32 nuevas estaciones, es decir un crecimiento de alrededor de un 30%. Este crecimiento no sólo aumenta de manera más que proporcional el número de pares origen-destino, sino que además provoca la generación de múltiples nuevas rutas entre dos puntos en la red, lo que por un lado, aumenta de manera importante el tamaño muestral requerido; y por otro, dificulta la aplicación de la encuesta tradicional para determinar patrones de viajes en la red, incrementando los recursos monetarios y logísticos requeridos para el desarrollo de la misma.

- Resistencia de usuarios a responder la encuesta: en los últimos años se ha podido apreciar que existe una creciente resistencia de los usuarios de Metro a responder la encuesta, lo que es especialmente notorio en los períodos punta. La introducción de instrumentos tecnológicos para desarrollar la encuesta –como aplicaciones digitales para la recolección de datos- ha reducido la tasa de rechazo, sin embargo es esperable que en los próximos años esta tasa se mantenga o aumente.
- Espacios inadecuados para realizar la encuesta: debido al alto volumen de usuarios en ciertas estaciones de la red y al reducido espacio físico entre los torniquetes y las escaleras para acceder a los andenes, la aplicación de la encuesta puede generar problemas en el flujo de pasajeros, bloqueando incluso en algunas ocasiones el normal tránsito de usuarios. Lo anterior ha motivado a que durante las últimas aplicaciones de la encuesta, el desarrollo de ésta se realice en el andén, sin perturbar el flujo de pasajeros en la mesanina de la estación.
- Tecnologías de la información y big data: el desarrollo de las tecnologías de la información ha permitido implementar una serie de sistemas que permiten generar información valiosa para caracterizar el funcionamiento del sistema de transporte y la manera en que los usuarios se desplazan en él. Particularmente, la implementación del sistema de transporte público integrado de Santiago ha expandido el uso de la tarjeta electrónica de prepago. Los desarrollos asociados al uso de esta tarjeta permiten caracterizar los viajes en el sistema de transporte público, aspecto que es detallado en el punto 2.3. Además, existen otros sistemas adicionales como sistemas de posicionamiento y de pesaje tanto en la vía como en los propios trenes que permiten complementar la información de validaciones en el sistema. Lo anterior motiva a hacer un uso más intensivo de esta información, cuya disponibilidad es muy superior a la obtenida a partir de encuestas de movilidad.

2.2 Programa computacional CALDAS

La encuesta EOD Metro genera la información necesaria para alimentar el programa computacional CALDAS (Metro S.A., 2007), desarrollado internamente por Metro de Santiago. Este es un software de asignación de flujos de pasajeros en la red de Metro, basado en intervalos de una hora.

La metodología en la cual se basa este software es la siguiente: por un lado, se considera como datos de entrada la información real de afluencias en la red de Metro, que puede ser de un día en particular o las afluencias promedio de un período de tiempo definido –semanal, mensual o anual-. Por otro lado, desde la EOD de Metro se extrae la distribución de destinos y de elección de rutas para cada estación de origen de la red, cargando estas distribuciones en el software. Finalmente, el software asigna las afluencias reales a la red de Metro considerando estas distribuciones de estación de destino y elección de ruta desde la EOD de Metro.

CALDAS genera variados reportes basados en intervalos de una hora, tales como perfiles de demanda, flujos de trasbordo por movimiento, distancia media de viaje, etc.

2.3 Matriz origen-destino de viajes del sistema de transporte público a partir de información de validaciones de la tarjeta electrónica de prepago (bip! DTPM)

En cada día laboral en el sistema de transporte público integrado de la ciudad de Santiago se realizan alrededor de 5,6 millones de transacciones. La gran mayoría de ellas se realiza a través del uso de la tarjeta electrónica de prepago. Sólo aproximadamente 100.000 viajes, esto es alrededor de un 2%, son realizados utilizando el boleto magnético que permite realizar viajes exclusivamente en la red de Metro.

Complementariamente, a cada transacción en el sistema integrado es posible asignarle una coordenada espacial y temporal. Esto es directo en el caso de una validación en Metro, debido a que los validadores están asociados a una estación y cuentan con información de la hora de la transacción. Por otra parte, en el caso de las transacciones en buses, el dispositivo GPS presente en cada vehículo permite determinar la localización y la hora de cada una de las transacciones.

A partir de la información antes indicada, para determinar la matriz origen-destino de viajes en el sistema, es necesario utilizar un método de estimación para inferir el paradero de bajada de cada una de las validaciones del sistema. Para ello, considerando

que cada tarjeta de prepago tiene un identificador único, Munizaga y Palma (2012) desarrollaron una metodología que estima el paradero de bajada como el punto donde se realiza la siguiente transacción con la misma tarjeta. De esta manera, es posible estimar la parada de una etapa de viaje en alrededor de un 80% de las transacciones. Esta metodología se ha podido validar tanto en forma endógena –utilizando la misma base de datos de transacciones para verificar la existencia comportamientos anómalos-, como en forma exógena, contrastando las estimaciones realizadas con los resultados de la EOD de Metro y entrevistas con voluntarios (Munizaga *et al.*, 2014).

Cabe mencionar que esta metodología presenta dos ventajas importantes frente a las encuestas de viajes tradicionales: por una parte, logra una cobertura mucho mayor que las encuestas de los viajes totales en el sistema; y por otro, permite tener información para cualquier hora del día, día específico y/o temporada. Sin embargo, uno de los aspectos importantes que es necesario mejorar resulta ser la lentitud de los tiempos de procesamiento y la estimación de datos mediante esta metodología, ya que al día de hoy todavía resulta más rápido contar con la información de la encuesta origen-destino de viaje realizada con el método tradicional.

2.4 Matriz origen-destino de viajes del sistema de Metro a partir de información de validaciones de la tarjeta electrónica de prepago (bip! GOS)

Metro de Santiago, a través de la Gerencia de Operaciones y Servicios, ha desarrollado una metodología similar a la presentada en la sección 2.3 en cuanto a la estimación de paraderos de bajada de cada transacción, utilizando para ello exclusivamente la información de validaciones en la red de Metro.

Dado que esta información sólo incluye parcialmente las validaciones del sistema de transporte, al no considerar las etapas que se producen en bus, podría no ser representativa de los viajes totales en metro o presentar una baja cantidad de viajes estimados comparados con la afluencia en el período. También es posible que las estimaciones de estación de salida de cada viaje contengan sesgos al no considerar información relevante proveniente desde las etapas posteriores en buses. Sin embargo, esta información presenta la gran ventaja de estar disponible prácticamente en línea, con lo que la construcción de la matriz estimada puede ser realizada prontamente de ser requerido.

Tanto en el caso de la matriz bip! DTPM como en la matriz bip! GOS el gran problema es que no se tiene información respecto a la ruta de los viajes, es decir, no es posible construir directamente los perfiles de carga, ni los flujos de trasbordo en este tipo de estaciones, lo que es también uno de los aspectos secundarios que motiva el desarrollo del presente trabajo.

2.5 Modelo de asignación de transporte público con restricción de capacidad (ARTP_RC)

El modelo de asignación de transporte público con restricción de capacidad ARTP_RC desarrollado por el Estado de Chile a través de la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA), supone que la elección de modo de transporte público y de ruta sobre cada una de las redes modales consideradas se hace bajo un enfoque de líneas comunes con efectos de congestión, desarrollado por De Cea y Fernández (1993), que a su vez, extienden un modelo previo de Chriqui y Robillard (1975). Esto es, dada la matriz de demanda global en transporte público y una red multimodal, debidamente calibrada, los usuarios sobre dicha red escogen aquella ruta de transporte público que minimiza su tiempo (costo) generalizado de viaje entre un par de nodos de la red. Así, se obtendrá un equilibrio de tráfico tal que, para cada par OD, todas las rutas usadas tendrán iguales costos generalizados (mínimos), en tanto aquellas rutas no usadas tendrán costos generalizados iguales o mayores que dicho mínimo.

Este modelo considera restricción de capacidad de los vehículos. Por lo tanto, si aumentan los flujos de pasajeros, también aumentan los tiempos de viaje de los usuarios, lo que finalmente redundará en que éstos irán considerando un conjunto más amplio de rutas alternativas que se harán atractivas a medida que aumentan los niveles de congestión.

La mayoría de los parámetros del modelo de comportamiento han sido calibrados para la ciudad de Santiago para los períodos punta mañana y fuera de punta como parte del estudio SECTRA (2005). Sin embargo, los parámetros de atractividad por línea fueron modificados, bajo la premisa de que al asignar viajes sólo en la red de Metro, no existen diferencias relevantes entre las distintas líneas. Distinto es el caso cuando se asignan viajes en una red general de transporte público, donde las líneas de metro compiten con servicios de buses u otros modos de transporte masivo, por lo que si se hace necesario diferenciar estas atractividades.

El modelo de asignación ARTP_RC será utilizado para asignar las matrices bip! DTPM (sección 2.3) y bip! GOS (sección 2.4), para estimar la proporción de uso de cada ruta entre cada par OD de la red, de manera de construir perfiles para validarlos y compararlos con los construidos a partir de la información de la EOD de Metro (sección 2.1). Además, se utilizan datos complementarios, como las mediciones de carga por peso, que se describen en la sección 2.6.

2.6 Mediciones de carga por conteo de pasajeros y por peso de trenes en las vías (RW)

Para validar la información de perfiles de carga, especialmente en lo que se refiere al punto de carga máxima de cada línea de la red de Metro, se realizan periódicamente conteos manuales de subidas y bajadas de pasajeros en cada estación aguas arriba del punto de carga máxima en cada línea y sentido, lo que posteriormente permite replicar los perfiles de carga en los tramos de la red medidos.

Por otro lado, en puntos específicos de la red, se dispone de equipos que registran el peso de los trenes, tecnología denominada Railweight (RW). Luego, conociendo previamente el peso del tren al vacío –sin pasajeros-, y luego asumiendo un valor promedio de peso por persona, es posible calcular una estimación de la cantidad de pasajeros que pasa por sobre el punto en cuestión en un período determinado.

Esto permite comparar los resultados en lo referente a carga de pasajeros tanto de los conteos manuales como de RW con los valores de carga estimados a partir de la EOD Metro.

Esta información será utilizada en conjunto con las otras fuentes para comparar los resultados obtenidos con la metodología de construcción de perfiles aquí desarrollada.

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el presente trabajo tiene como uno de los objetivos finales generar los mismos insumos que arroja la EOD Metro como datos de entrada al programa CALDAS, esto es, distribución de destinos y rutas para viajes originados por cada estación. Para ello, se utilizará la información desde las tarjetas de pago y procesos de asignación de estas matrices. Esto posibilita construir la información antes indicada para una cantidad de períodos mayor a lo que en la actualidad cubre la encuesta origen-destino de viajes en metro, la cual está acotada a sólo ocho períodos del día y en un período específico del año. En cambio, los datos de las tarjetas de pago están disponibles para cualquier período del día y del año requerido, y a un costo considerablemente menor. Estas son las dos mayores ventajas de la metodología aquí propuesta.

La metodología de trabajo considera, en primer lugar, comparar para el período punta mañana (7:30 a 8:30) las matrices bip! DTPM y bip! GOS con la matriz EOD Metro, tanto en términos del tamaño de la matriz, como en términos de la estructura de la misma, ya sea a partir de la estimación del volumen de viajes para cada estación de destino como para la cantidad de viajes en cada par origen-destino de la red.

Luego, estas matrices –bip! DTPM y bip! GOS- son expandidas en forma acotada a los orígenes (Ortúzar y Willumsen, 2011) como se indica en la ec. 1:

$$F_i = \frac{O_T}{O_{BIP}} \quad (1)$$

donde F_i es el factor de expansión para la estación de origen i ; O_T son los viajes totales con origen en la estación i , medido con información real proveniente desde los torniquetes en cada estación; y O_{BIP} son los viajes con origen en la estación i reportados en las matrices bip! DTPM o bip! GOS en el período de comparación. Esta expansión es realizada con la afluencia promedio en día laboral tanto en la semana analizada para abril 2013 como para mayo 2014, ambas en el período punta mañana.

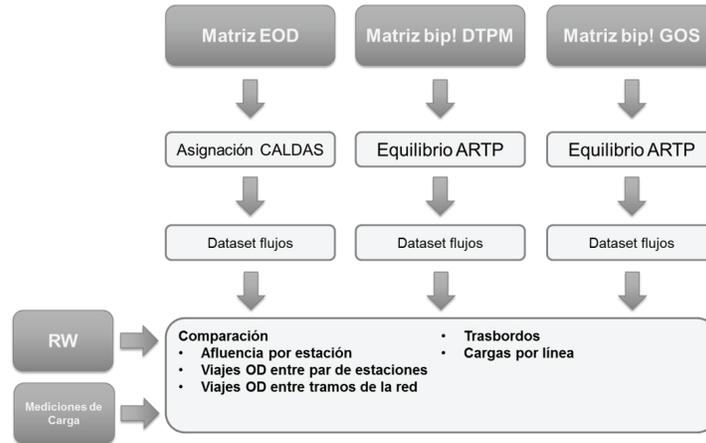
Para construir los perfiles de carga y trasbordos, y compararlos entre las diferentes fuentes de información, es necesario construir la red modelación que represente adecuadamente la oferta de Metro en el modelo ARTP_RC. La construcción de la red considera las variables operacionales para el primer semestre tanto del año 2013 como del 2014, según corresponda. Estas variables se refieren básicamente a frecuencia de operación, capacidad promedio de un tren, tipo de servicio (normal, con salto de estación o bucle), tiempos de viaje interestación, tiempos de trasbordo en cada estación, y tiempos de detención.

Una vez construida la red se realiza el proceso de asignación de cada una de las matrices antes indicadas, comparando sus resultados para el período punta de la mañana con los de la EOD de Metro.

Para validar los resultados con fuentes de datos externas se comparan los perfiles de carga y las cargas máximas de cada una de estas fuentes de datos tanto con la carga obtenida mediante pesos del tren (RW), como con los perfiles de carga contruados a partir de conteos manuales de pasajeros, fuentes descritas en la sección 2.6.

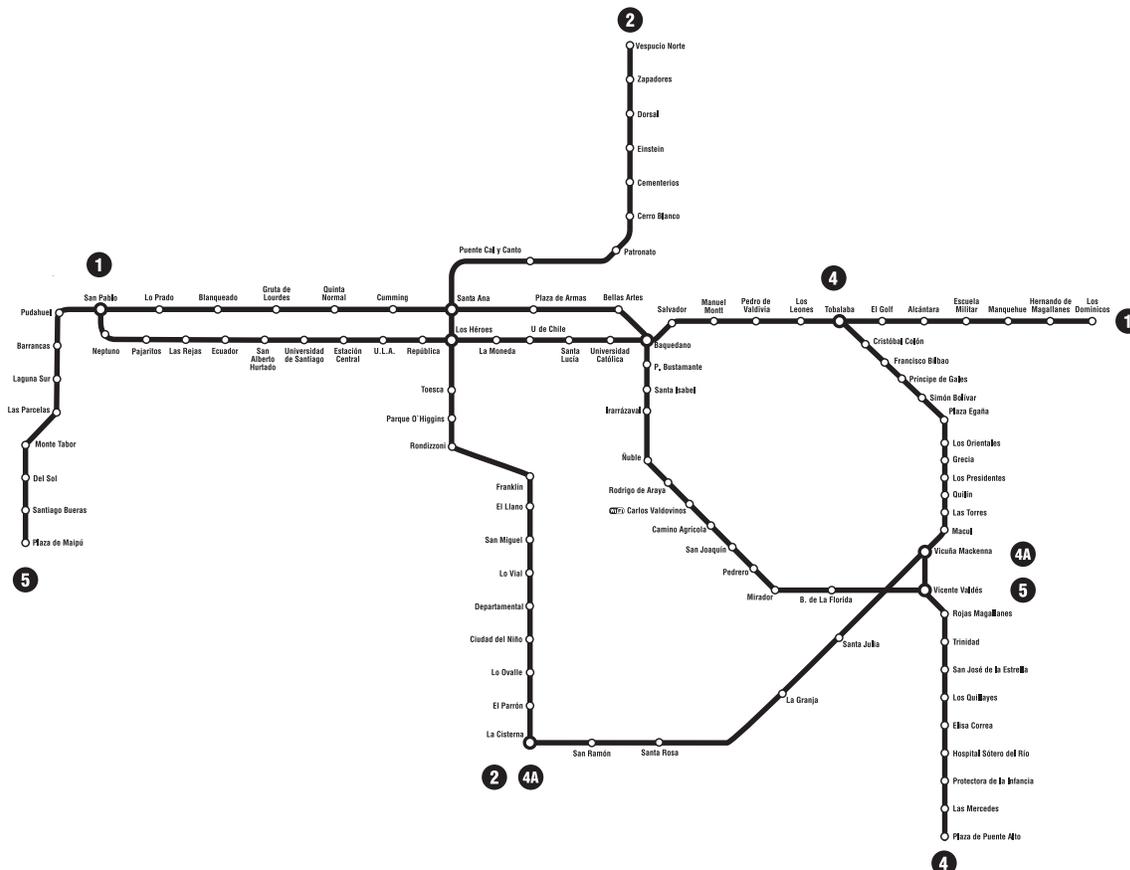
Para mayor claridad, se presenta en la Figura 1 un esquema de la metodología descrita en esta sección.

Figura 1: Esquema metodológico



Para futuras referencias en cuanto a la descripción de resultados, se incluye en la Figura 2 un mapa de la red de Metro.

Figura 2: Mapa de Red, Metro de Santiago



4. RESULTADOS

En esta sección, se presentan los principales resultados de la comparación entre el proceso de equilibrio en transporte público de las matrices bip! DTPM y bip! GOS con respecto a la EOD Metro. En primer lugar, se presenta un análisis y una comparación de las matrices de viaje, tanto en número de viajes como en la estructura y correlación entre ellas. Luego, se analizan los resultados del proceso de asignación de viajes, donde se comparan perfiles de carga y flujos de trasbordo obtenidos entre las distintas líneas de la red de Metro, para las distintas fuentes de datos.

4.1 Número de viajes

Las fuentes analizadas arrojan matrices de distintos tamaños, dada la metodología de estimación de viajes de cada una de ellas. Por ejemplo, a partir de las estimaciones bip! DTPM o bip! GOS existe una cierta proporción de viajes a los cuales no es posible estimarles un paradero de bajada, debido a la pérdida de información por errores informáticos (datos corruptos, errores en el posicionamiento del GPS, etc.). También se produce la pérdida de datos porque la cadena de viajes de una misma tarjeta no permite estimar un paradero de bajada en alguna de las etapas, lo cual ocasiona distorsiones en el número de viajes estimado para cada matriz.

Por otro lado, mientras la matriz de viajes EOD Metro y bip! GOS contiene aquellos viajes con hora de inicio en el período PAM, la matriz de viajes bip! DTPM contienen aquellos viajes con hora media dentro del período PAM. El número de viajes estimado de las matrices para ambos cortes temporales en análisis se presenta en la Tabla 1:

Tabla 1: Número de viajes por matriz, años 2013-2014

Matriz	Abril 2013		Mayo 2014	
	Número de viajes [pax/hr]	Diferencia con viajes reales [%]	Número de viajes [pax/hr]	Diferencia con viajes reales [%]
EOD Metro	255.056	--	251.109	--
bip! DTPM	266.707	+4,5%	266.573	+6,2%
bip! GOS	196.718	-22,9%	197.549	-21,3%

Se aprecia que la matriz bip! DTPM sobreestima levemente el tamaño total de la matriz, posiblemente porque para construirla se utilizó el criterio de la hora media de viaje. Por otro lado en el caso de la matriz bip! GOS, se aprecia una subestimación de la misma, lo que se debe a que para un número apreciable de viajes no es posible estimar la estación de bajada porque se pierde la información sobre transacciones en buses, en comparación con la metodología bip! DTPM.

4.2 Correlación de la estructura entre matrices

En esta sección, se analiza la estructura de la matriz de demanda obtenida mediante metodologías alternativas de estimación de viajes con respecto a la obtenida mediante encuestas. Para observar el grado de correlación entre las distintas fuentes, se realiza la comparación de matrices con el mismo número de viajes. Dado esto, las matrices bip! DTPM y bip! GOS fueron expandidas por un factor simple acotado a los orígenes por estación descrito en la sección 3 (Ortúzar y Willumsen, 2011), de manera tal que estas matrices conformen el mismo número total de viajes que la matriz con la afluencia real registrada, representada por EOD Metro. Luego, se conforman tres matrices de viajes con 255.056 pax/hr para abril 2013; y tres matrices con 251.109 pax/hr para mayo 2014.

A partir de lo anterior, es posible establecer correlaciones entre las distintas fuentes de datos: en particular, entre las matrices bip! DTPM y bip! GOS con respecto a la EOD Metro. Cada una de estas comparaciones se cuantifica según sus respectivos coeficientes de correlación lineal R2, y también se cuantifica la desviación de la raíz cuadrática media (RMSD), dada por la ec. 2:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (x_i^{ref} - x_i^{est})^2} \quad (2)$$

donde x_i^{ref} y x_i^{est} son los valores de referencia y de estimación respectivamente para una cierta observación, mientras que N es la cantidad total de observaciones a comparar. En este caso, el valor RMSD se interpreta como la diferencia medio, en unidades de pax/hr, entre el valor que arroja la EOD Metro y la matriz bip! en análisis. Este mismo indicador también se reporta en valores relativos, como porcentaje de desviación entre ambas muestras.

Se realizan comparaciones entre las distintas fuentes de datos a partir de tres tipos de agregación: viajes atraídos por estación, viajes entre par origen-destino de estaciones, y viajes entre par origen-destino entre tramos de red, que agregan los viajes en un cierto número de estaciones contiguas. Para esta última comparación, se divide la red en 14 tramos, los que se describen en la Tabla 2.

Tabla 2: Definición de tramos de red en metro

Tramo	Línea	Estación Inicio	Estación Final
L1 Poniente	L1	SAN PABLO L1	REPÚBLICA
L1 Centro	L1	LOS HEROES L1	UNIVERSIDAD CATÓLICA
L1 Oriente 01	L1	BAQUEDANO L1	LOS LEONES
L1 Oriente 02	L1	TOBALABA L1	LOS DOMÍNICOS
L2 Norte	L2	VESPUCIO NORTE	PATRONATO
L2 Centro	L2	CAL Y CANTO	PARQUE O'HIGGINS
L2 Sur	L2	RONDIZZONI	LA CISTERNA L2
L4 Oriente	L4	TOBALABA L4	VICUÑA MACKENNA L4
L4 Sur	L4	VICENTE VALDÉS L4	PLAZA PUENTE ALTO
L4A	L4A	VICUÑA MACKENNA L4A	LA CISTERNA L4A
L5 Poniente 02	L5	PLAZA DE MAIPÚ	BARRANCAS
L5 Poniente 01	L5	PUDAHUEL	CUMMING
L5 Centro	L5	SANTA ANA L5	BELLAS ARTES
L5 Sur	L5	BAQUEDANO L5	VICENTE VALDÉS L5

En la Tabla 3 se reportan las comparaciones entre la EOD Metro y bip! DTPM, mientras que en la Tabla 4 se reportan las comparaciones correspondientes a bip! GOS con respecto a EOD Metro.

Tabla 3: Correlación de viajes bip! DTPM-EOD Metro, período punta mañana

Tipo de viaje	N° Obs.	Abril 2013				Mayo 2014			
		R2	Prom. EOD [pax/hr]	RMSD [pax/hr]	RMSD %	R2	Prom. EOD [pax/hr]	RMSD [pax/hr]	RMSD %
Atraídos estación	100	0,961	2.548	693	28%	0,898	2.511	1.115	28%
OD estaciones	9.470	0,791	26,91	27,29	76%	0,662	25,83	33,63	76%
OD tramos	196	0,935	1.300	444	56%	0,926	1.281	455	68%

Tabla 4: Correlación de viajes bip! GOS-EOD Metro, período punta mañana

Tipo de viaje	N° Obs.	Abril 2013				Mayo 2014			
		R2	Prom. EOD [pax/hr]	RMSD [pax/hr]	RMSD %	R2	Prom. EOD [pax/hr]	RMSD [pax/hr]	RMSD %
Atraídos estación	100	0,953	2.548	715	27%	0,914	2.511	947	28%
OD estaciones	9.470	0,779	26,91	27,99	76%	0,689	25,83	30,03	69%
OD tramos	196	0,919	1.300	497	52%	0,916	1.281	476	43%

En general, se aprecia que se obtienen altos grados de correlación para los volúmenes de viaje. Es destacable la correlación cuadrática existente en los viajes atraídos por estación, para las dos estimaciones utilizadas, con respecto a la EOD Metro: siempre superior a 0,9 tanto para bip! DTPM como para bip! GOS, demostrando que las estimaciones de estación de bajada mediante la metodología de Munizaga y Palma (2012) se ajustan a lo reportado mediante encuestas de viaje. En cuanto a los viajes origen-destino entre par de estaciones, se considera un ajuste aceptable, alcanzando coeficientes de correlación de 0,791 y 0,779 respectivamente al 2013. Para el año 2014, estos valores sufrieron un descenso relevante, llegando a 0,662 y 0,689 para bip! DTPM y bip! GOS, aunque en parte, esto se explica por la muestra abreviada utilizada para la realización de la EOD 2014.

Además, se incluye en el análisis la correlación por los viajes atraídos agregando por tramo de red, lo cual mejora la correlación entre las distintas fuentes de datos, logrando coeficientes R2 superiores a 0,91 para las matrices bip! DTPM y bip! GOS, en comparación con la EOD Metro, en ambos cortes temporales.

Para observar si existe algún sesgo entre las comparaciones de las distintas fuentes de datos, se realiza un análisis desagregado de tipo espacial. En la Tabla 5 se reportan los indicadores RMSD—tanto en términos absolutos como relativos—, para cuantificar las dispersiones de las estimaciones con respecto al valor de referencia que arroja la EOD, para cada tramo de red descrito en la Tabla 2. Se incluye este análisis solo para la muestra del año 2013, dado que para el 2014 los resultados son similares.

Tabla 5: Correlación de viajes EOD Metro con bip! DTPM y bip! GOS, viajes atraídos por tramo de red, período punta mañana, año 2013

Tramo	N° Obs.	Prom. EOD [pax/hr]	bip! DTPM		bip! GOS	
			RMSD [pax/hr]	RMSD %	RMSD [pax/hr]	RMSD %
L1 Poniente	10	2.203	609	34%	603	33%
L1 Centro	5	7.497	863	12%	760	8%
L1 Oriente 01	4	5.999	1.316	22%	1.036	17%
L1 Oriente 02	7	6.300	1.322	20%	1.707	21%
L2 Norte	7	1.531	276	17%	282	16%
L2 Centro	3	3.141	387	11%	476	19%
L2 Sur	10	1.436	419	22%	392	20%
L4 Oriente	12	1.776	493	29%	525	28%
L4 Sur	10	989	451	39%	387	36%
L4A	4	426	68	29%	143	30%
L5 Poniente 02	7	533	133	49%	113	39%
L5 Poniente 01	6	1.045	239	24%	250	27%
L5 Centro	4	6.839	1.522	19%	1.130	14%
L5 Sur	11	2.040	601	26%	775	32%

Es posible apreciar que los tramos cuyos promedios son altos en términos de pasajeros atraídos –como L1 Centro, L1 Oriente 01-02 o L5 Centro– tienen valores de desviación de la raíz cuadrática media más altos, pero sin embargo, en términos relativos, se ubican dentro de los más bajos a nivel de red, indicando que la estimación en estos tramos es más robusta. Lo contrario ocurre con los tramos que tienen menores niveles de viajes atraídos por tramo: menores desviaciones absolutas, pero mayores desviaciones relativas. Esta conclusión es importante, pues tiene un correlato con los niveles de similitud entre los perfiles de carga reportados en la sección 4.3, dado que allí se reportan a un nivel más agregado los volúmenes de subidas y bajadas por estación o tramo, indicando que las desviaciones entre la EOD y las estimaciones bip! son más robustas donde justamente son más grandes aquellos volúmenes de viaje.

4.3 Perfiles de carga

Con las matrices bip! DTPM y bip! GOS construidas y ajustadas mediante la metodología descrita en la sección 3, se realiza el proceso de asignación de viajes, obteniendo los perfiles de carga para cada una de las líneas de la red, en ambos sentidos en el período punta de la mañana, para los cortes temporales 2013 y 2014. Estos perfiles de carga, mostrados en las Figuras 3-7 se comparan con los resultantes de la EOD Metro, y también con algunas mediciones realizadas en tramos puntuales de la red. Además, en algunos casos se muestran los valores de carga medidos con equipos de pesaje en puntos específicos, los cuales se denotan con la sigla RW.

En general, la correlación de carga entre las distintas fuentes de datos con respecto a la EOD Metro es alta, como lo demuestran los coeficientes de correlación de carga por segmentos para toda la red: mayor a 0,96 en todos los casos (Figura 8).

Existen algunas diferencias, que pueden deberse a distintos factores. En Línea 5, sentido P-S (Figura 7), la carga obtenida mediante el modelo de asignación es más alta que la registrada mediante encuestas, en ambos cortes temporales analizados. Sin embargo, las cargas bip! DTPM y bip! GOS se asemejan bastante a la medición de carga realizada durante el 2014, lo cual puede atribuirse a sesgos en la muestra de la encuesta origen-destino. Por otro lado, en Línea 2, sentido S-N (Figura 4), la carga obtenida tiene una correlación prácticamente perfecta con lo reportado en la EOD Metro, pero tiene una pequeña desviación en la zona central de la línea con respecto a las mediciones de carga en ese tramo.

Por otro lado, es destacable que las cargas máximas obtenidas con el modelo de asignación en Líneas 1, 2, 4 y 5 son consistentes con las cargas medidas con los equipos de pesaje (RW), lo que es otro elemento más que reafirma la validez de la metodología propuesta.

Por último, cabe mencionar que existen perfiles que no tienen un buen ajuste y que presentan claras discrepancias, como Línea 4, sentido N-S (Figura 5); o Línea 4A, sentido O-P (Figura 6). Sin embargo, ninguno de estos perfiles representan los sentidos más cargados de cada línea, por lo que en términos prácticos, no son utilizados en forma intensiva para la programación de la oferta u otros aspectos de planificación, como sí lo son los sentidos de cada línea con las cargas máximas.

Figura 3: Perfiles de carga EOD Metro, bip! DTPM y bip! GOS, período punta mañana 2013-2014, Línea 1

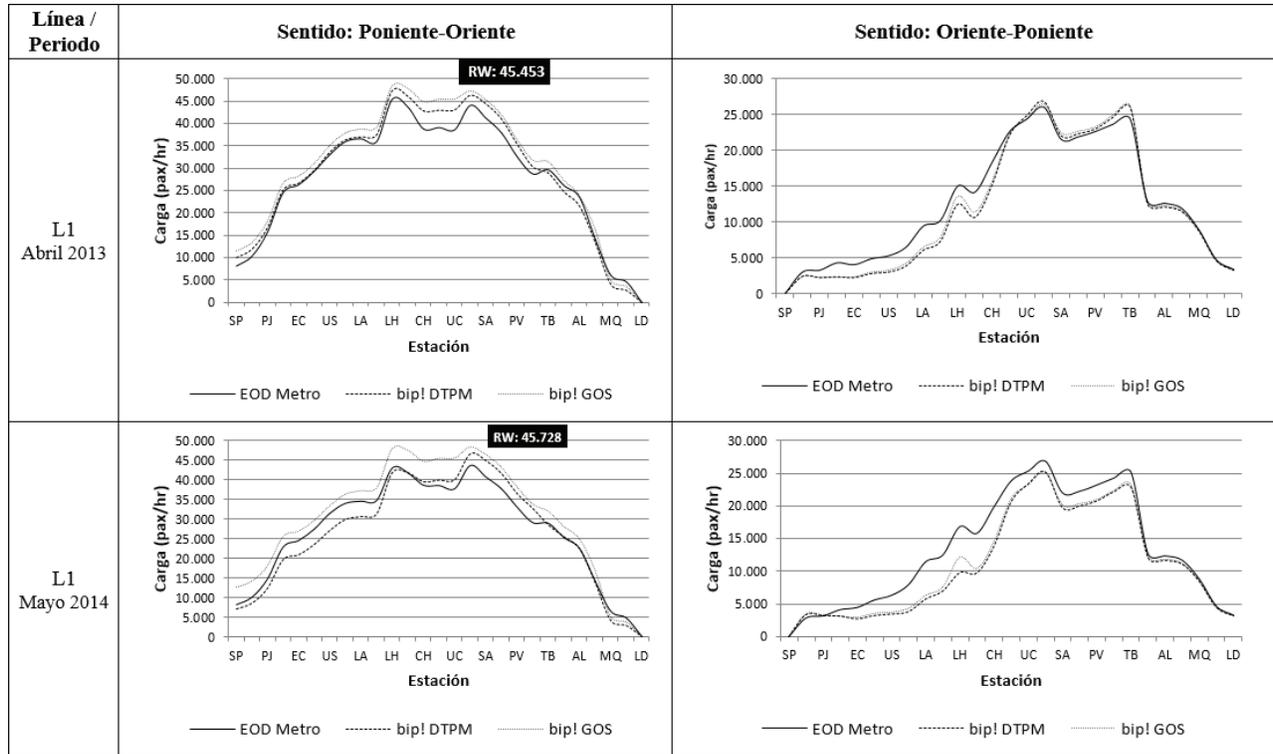


Figura 4: Perfiles de carga EOD Metro, bip! DTPM y bip! GOS, período punta mañana 2013-2014, Línea 2

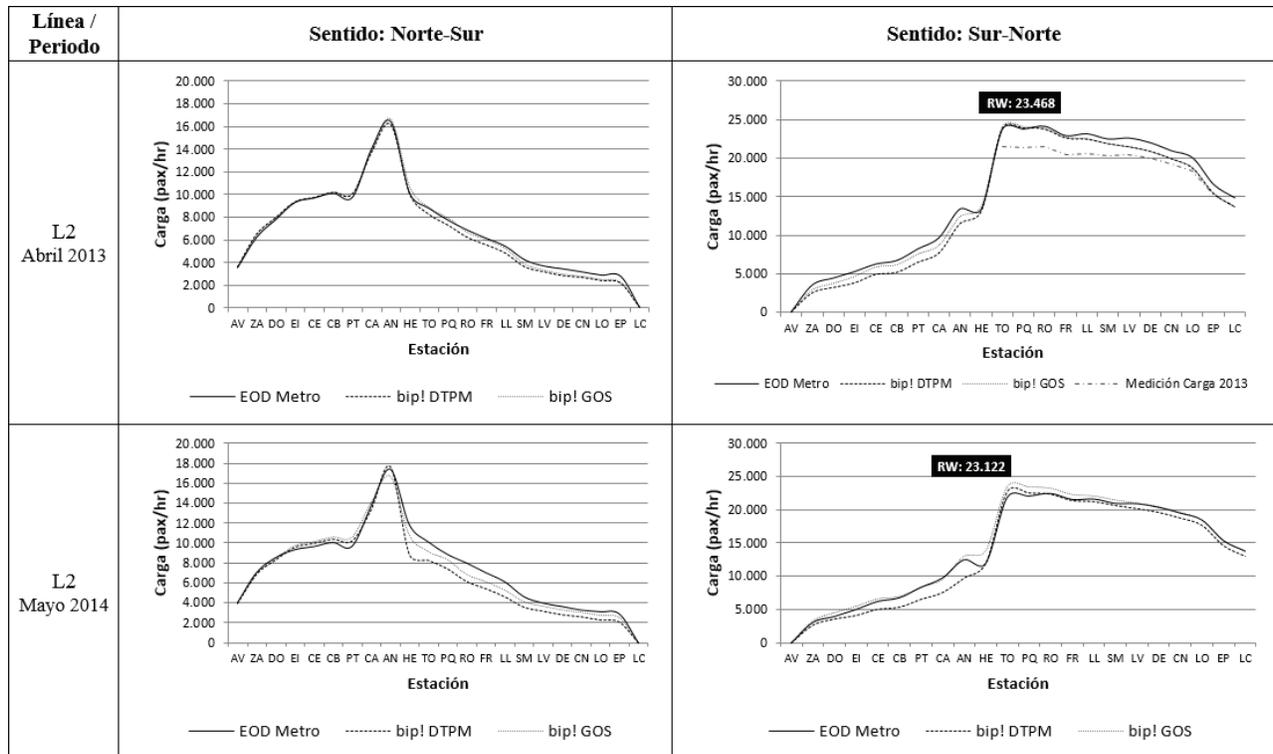


Figura 5: Perfiles de carga EOD Metro, bip! DTPM y bip! GOS, período punta mañana 2013-2014, Línea 4

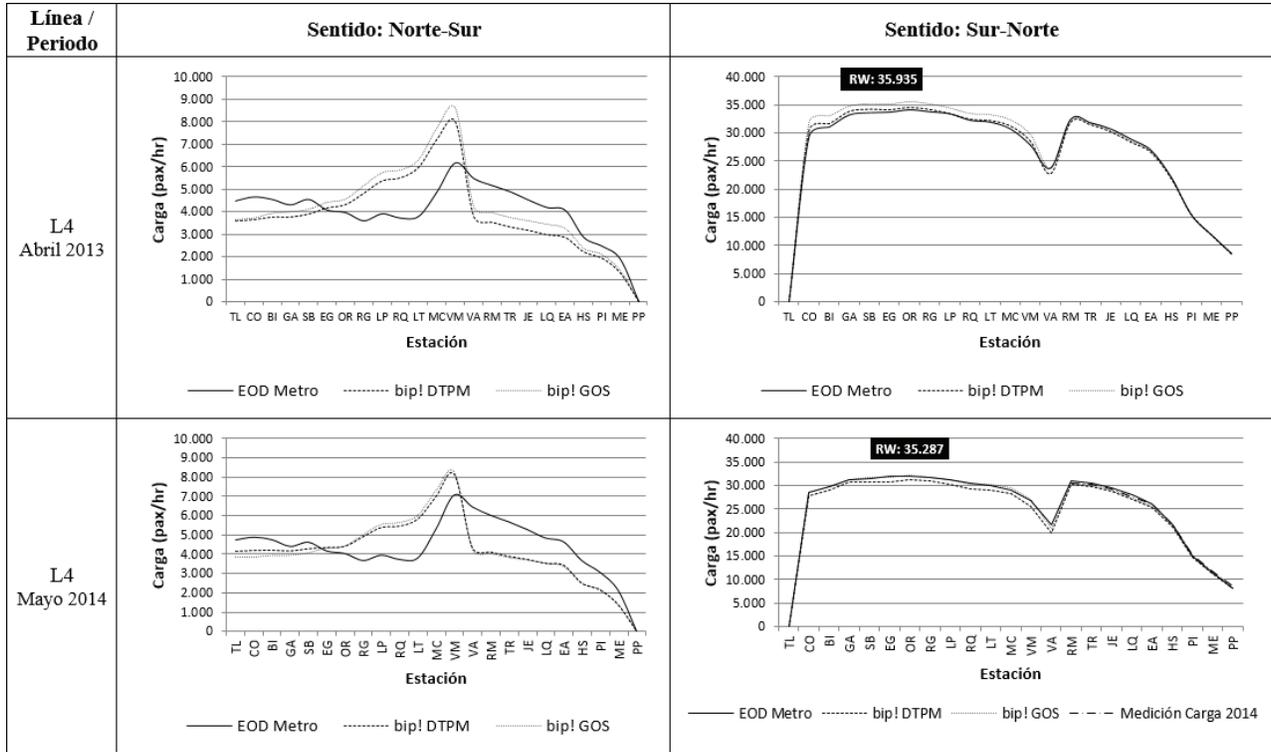


Figura 6: Perfiles de carga EOD Metro, bip! DTPM y bip! GOS, período punta mañana 2013-2014, Línea 4A

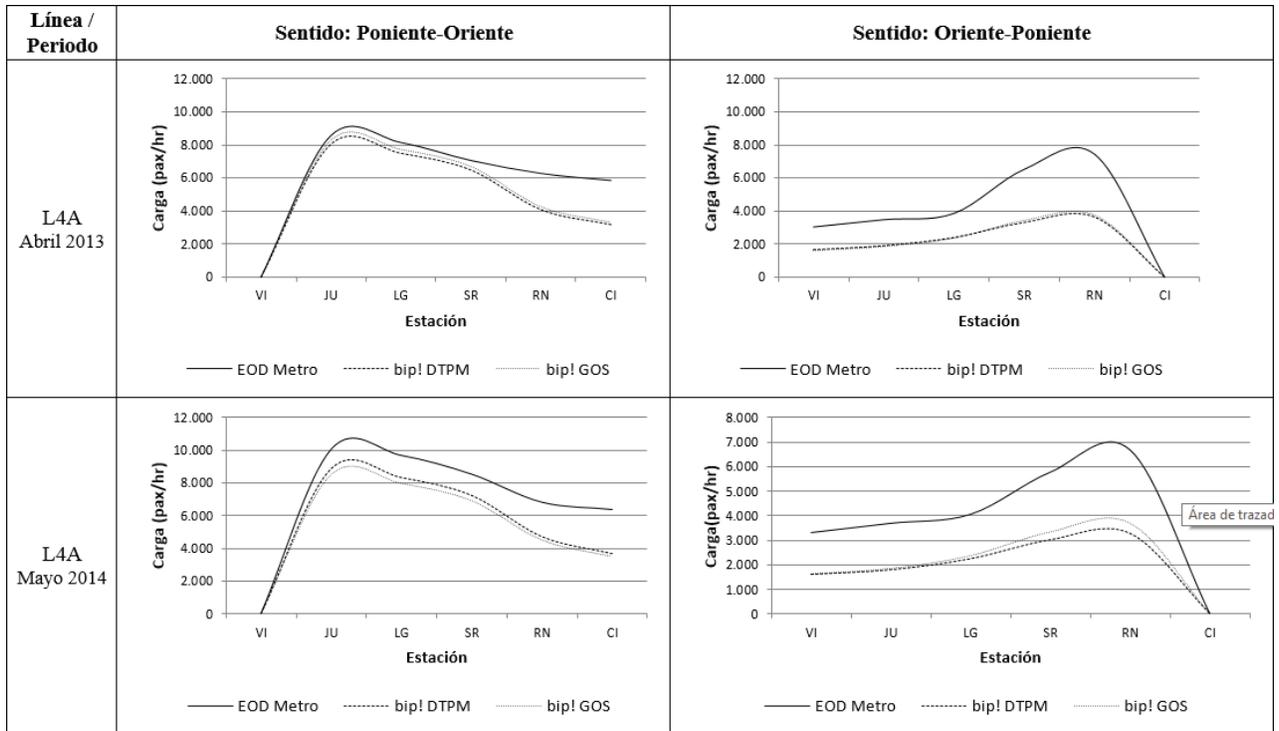


Figura 7: Perfiles de carga EOD Metro, bip! DTPM y bip! GOS, período punta mañana 2013-2014, Línea 5

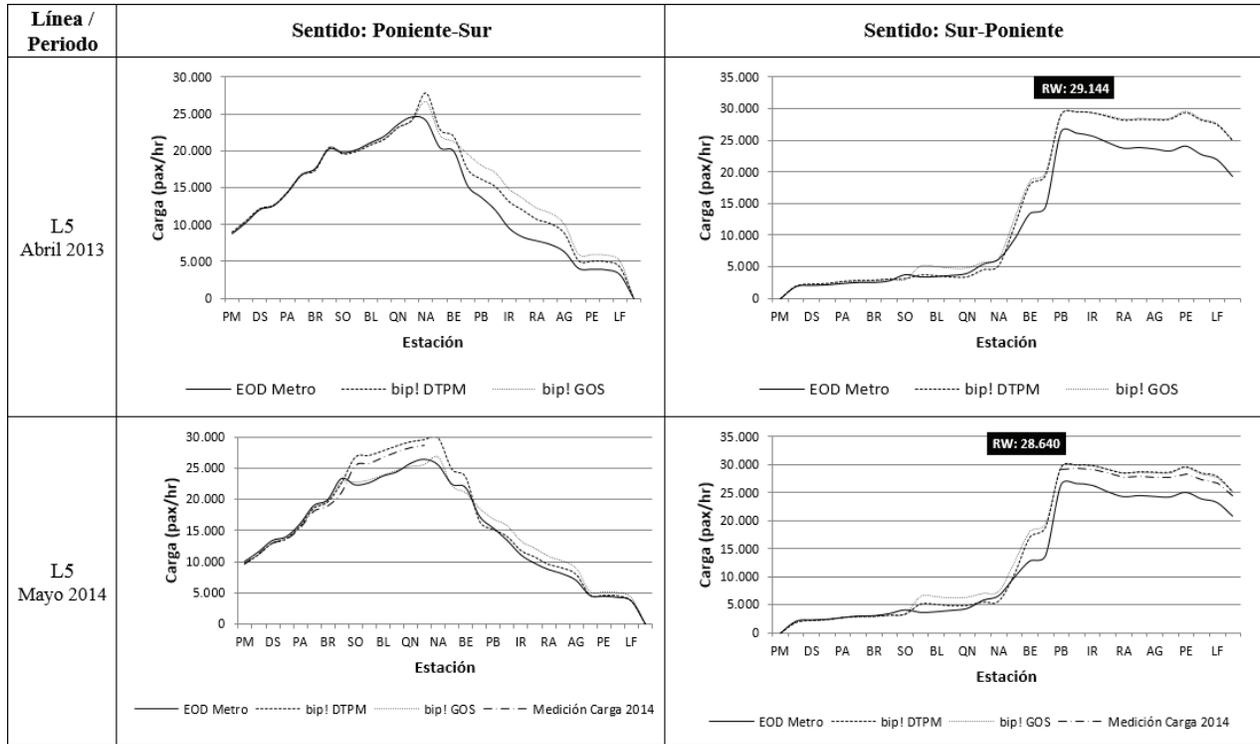


Figura 8: Correlación de carga en segmentos de red, bip! DTPM-EOD Metro y bip! GOS-EOD Metro

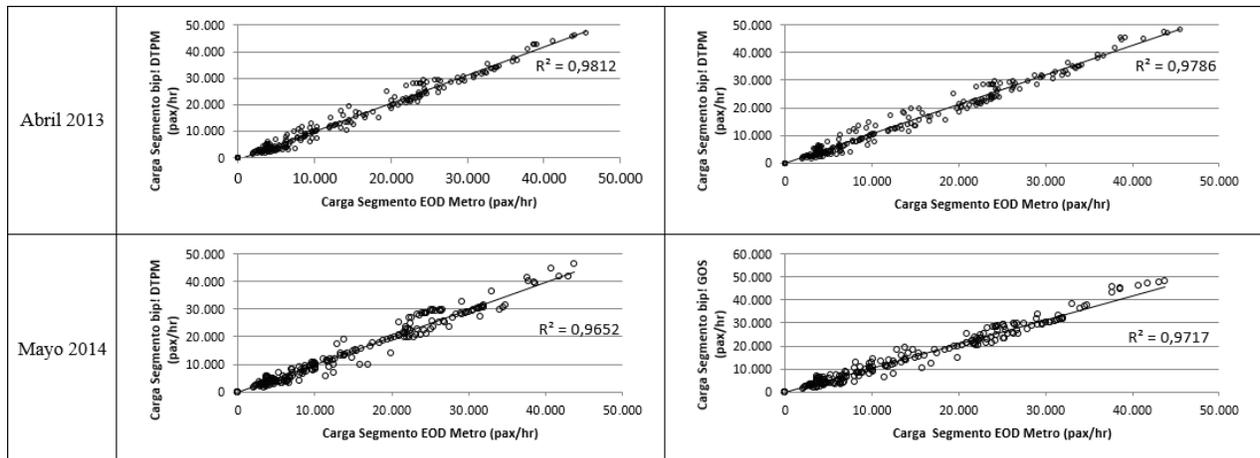


Figura 9: Flujos de trasbordos, período punta mañana, estaciones Santa Ana, Baquedano y La Cisterna

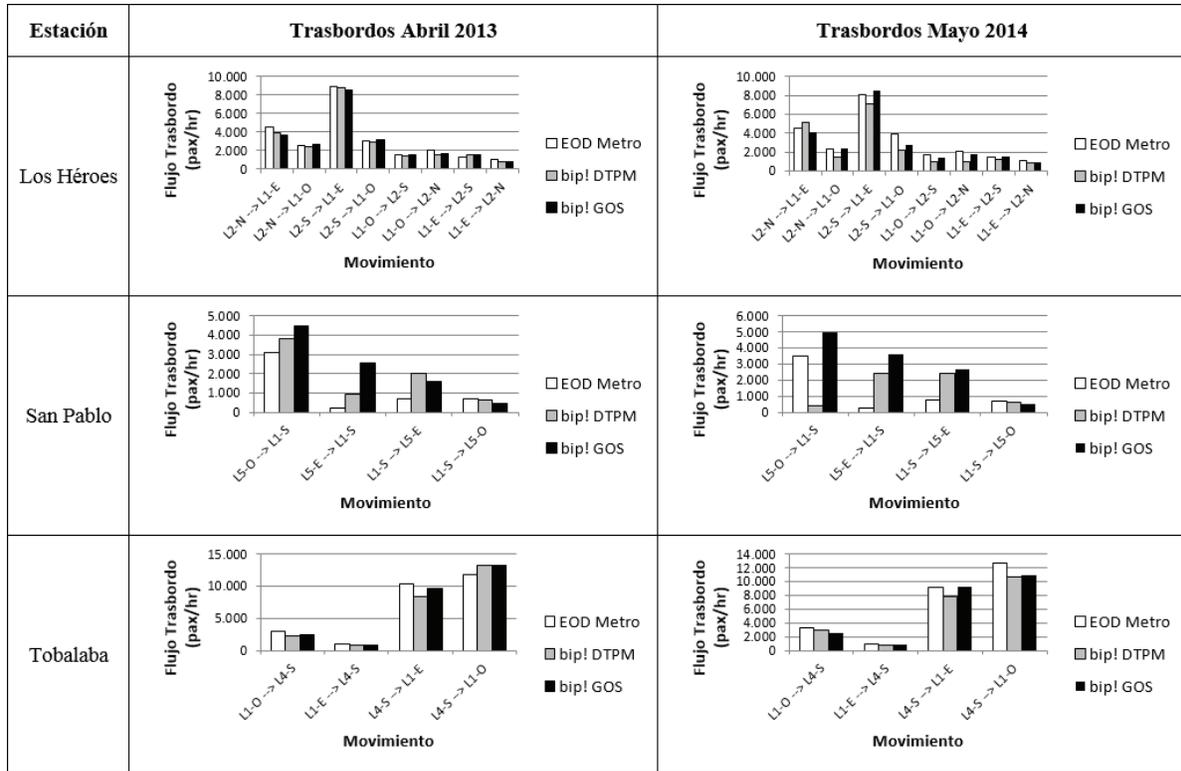


Figura 10: Flujos de trasbordos, período punta mañana, estaciones Los Héroes, San Pablo y Tobalaba

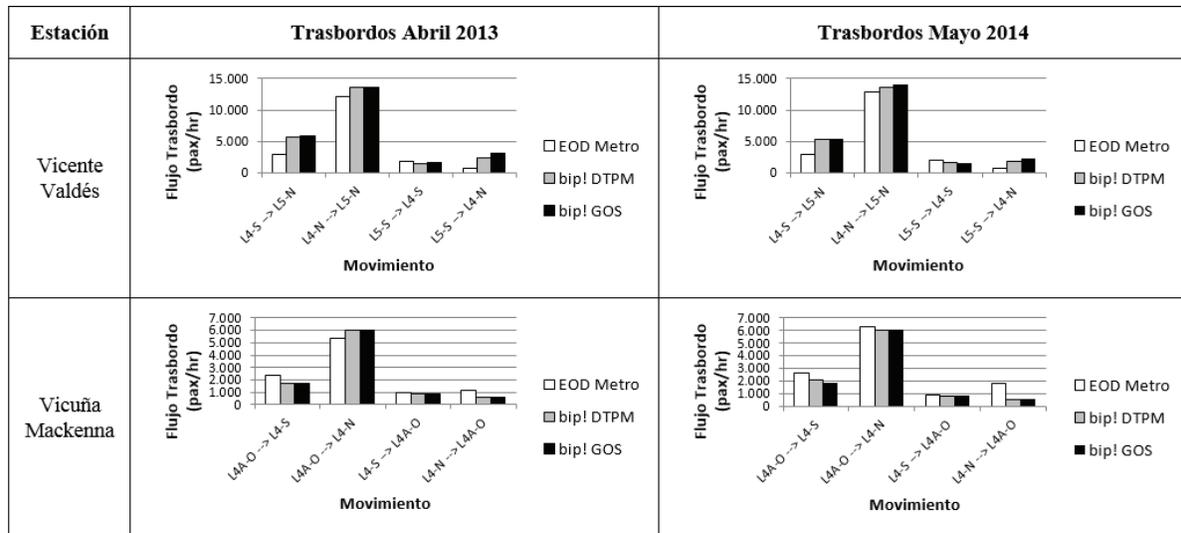
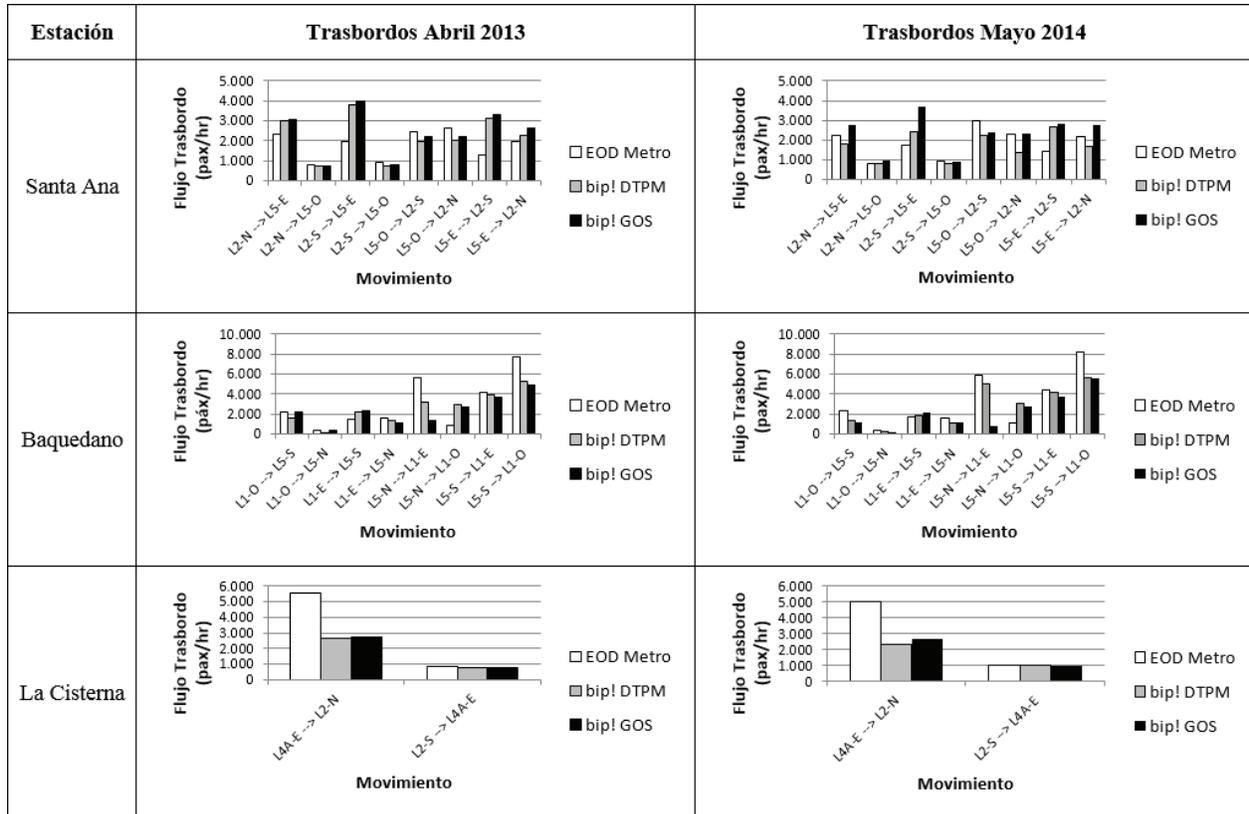


Figura 11: Flujos de trasbordos, período punta mañana, estaciones Vicente Valdés y Vicuña Mackenna



4.4 Trasbordos

En las Figuras 9-11 se muestran los flujos de trasbordo por estación y movimiento, entre las dos fuentes analizadas y la EOD Metro. En forma cualitativa, los flujos se asemejan bastante en magnitud entre sí.

Las diferencias encontradas pueden explicarse por las rutas suplementarias que es posible encontrar en algunos viajes. Por ejemplo, en estación Baquedano, los flujos de trasbordo de bip! DTPM y bip! GOS son sistemáticamente menores en comparación a EOD Metro; y a su vez, el efecto inverso ocurre en estación San Pablo. Esto indica que, para una cierta proporción de viajes cuyo origen está en las estaciones en la zona poniente de Línea 5 y cuyo destino se encuentra en la zona oriente de Línea 1, el modelo predice una ruta distinta a lo recogido vía encuestas. Ciertamente, para saber en definitiva cuál de los dos valores es más cercano a las condiciones reales de la red, se deben realizar mediciones de trasbordo en estaciones particulares, donde sea observable este fenómeno.

5. CONCLUSIONES

La correlación entre los viajes estimados con información proveniente de las tarjetas de pago y lo recogido mediante la EOD es alta, como se demuestra en distintos ámbitos como: viajes atraídos por estación o por tramo de red, viajes OD entre pares de estaciones, lo que permite construir matrices de viaje consistentes entre sí. A partir de lo anterior, la obtención de los perfiles de carga y flujos de trasbordo también replica consistentemente los datos recogidos con la EOD en general.

Observando el grado de correlación entre la EOD y los datos recogidos con las tarjetas de pago en el sistema de transporte público, permite avizorar que es posible complementar las fuentes de datos provenientes desde encuestas presenciales y de transacciones de tarjetas de pago, logrando a la vez acotar la realización de la EOD, tanto en extensión espacial a través de la red de Metro o en forma temporal, realizando la EOD con una menor frecuencia en el tiempo. Además, también se propone como parte de la metodología propuesta los mecanismos para la asignación de viajes y la obtención de perfiles de carga. Ello permite incurrir en

un ahorro considerable de recursos monetarios y humanos para la empresa, pues la parte de los datos de viaje y comportamiento del usuario es posible obtenerla a muy bajo costo, enfocando los esfuerzos en puntos específicos de la red en los cuales se requiera mayor información en forma desagregada. Lo anterior, es especialmente relevante considerando la futura expansión de la red en el año 2018, con dos líneas y 28 estaciones nuevas.

Sin embargo, para validar en forma más robusta la metodología aquí descrita se considera necesario realizar algunas tareas adicionales, entre las que se pueden mencionar: comparación de las distintas fuentes de datos con la EOD en otros periodos –punta tarde, fuera de punta, sábados o domingos–, y mediciones puntuales de flujos de trasbordo o de carga en tramos específicos de la red. Todo esto, con el objetivo de lograr una mejor calibración en el modelo de asignación, y que replique en forma efectiva estas mediciones. En este mismo ámbito, y contando con mediciones reales de carga de pasajeros, es posible hacer más robusta la metodología utilizando otros criterios para la construcción de las matrices en términos de su estructura, calibración de los parámetros del modelo de asignación y réplica de las condiciones reales de la red, como por ejemplo, usar los indicadores estadísticos GEH de carga en segmentos de red para medir la correlación.

Entre otros desarrollos y usos futuros de esta metodología también puede mencionarse la alimentación del software de asignación CALDAS, reemplazando parte de los parámetros de entrada del software obtenidos actualmente con la EOD por los parámetros extraídos y estimados con la información de tarjetas bip!. Esto abre la opción de estimar perfiles de carga y flujos de trasbordo para cualquier día y período requerido, cobertura que sería muy difícil de alcanzar con la realización de encuestas origen-destino tradicionales, por los recursos humanos y monetarios que esto involucraría. A pesar de que con una EOD más reducida podría producirse una pérdida de otros datos que pudiesen ser relevantes o útiles sobre los viajeros, tales como edad, sexo, modos de acceso, u otros datos socioeconómicos, este tipo de datos se pueden obtener con la realización de encuestas más acotadas, que apunten específicamente a la realización del perfil del usuario.

REFERENCIAS

Chriqui, C., Robillard, P. (1975) Common bus lines. *Transportation Science* 9, 115-121.

De Cea, J., Fernández, J.E. (1993) Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model. *Transportation Science* 27, 133-147.

Metro S.A. (2007) Desarrollo e implementación del sistema de cálculo de la demanda de pasajeros de Metro CALDAS.

Munizaga, M.A., Palma, C (2012) Estimation of a disaggregate multimodal public transport Origin–Destination matrix from passive smartcard data from Santiago, Chile. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24, 9-18.

Munizaga, M., Devillaine, F., Navarrete, C., Silva, D (2014) Validating travel behavior estimated from smartcard data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 44, 70-79.

Ortúzar, J. de D., Willumsen, L.G. (2008) Modelos de transporte. Traducción de A. Ibeas y L. Dell’Olio. PubliCan – Ediciones de la Universidad de Cantabria.

