

En español

In English

## Estimación de costos externos marginales de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario en Colombia

Luis Gabriel Márquez Díaz<sup>1</sup>

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la investigación para la modelación estratégica de transporte de carga en Colombia incluyendo sus costos externos. El modelo utilizado sigue una estructura secuencial de equilibrio entre las fases de distribución y asignación, es de escala nacional interregional, con una perspectiva de decisiones del orden estratégico. La red de transporte utilizada consta de 27.469 km de carreteras, 11.257 km de ríos navegables, 2.192 km de ferrocarril y un conjunto de conectores de centroides para establecer el nexo con el sistema de zonificación, compuesto por 70 zonas internas y 8 zonas externas. Cada arco de la red incluye, entre los costos internos, el del tiempo y el de operación, y entre los costos externos, la congestión, accidentes, contaminación del aire y emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El análisis de costos internos no incluyó los de posesión vehicular, y en la evaluación de los costos externos no se tuvieron en cuenta los relacionados con ruido, afectación del paisaje y cambio climático. El cálculo de costos marginales sobre la red se hace aplicando dos métodos. El primero supone que la demanda adicional no afecta el equilibrio de la red y estima el costo marginal sumando los costos marginales sobre los arcos de la ruta más corta. El segundo presume variación del equilibrio existente y estima el costo marginal calculando la diferencia entre las dos situaciones de equilibrio. Los dos métodos son aplicados sobre siete corredores de transporte de carga en Colombia. En los costos externos se encuentra un promedio de 28 \$/ton/km en el modo de transporte carretero; 0,21 \$/ton/km en el modo de transporte fluvial y 3,25 \$/ton/km en el modo de transporte ferroviario, con una preponderancia de los costos ambientales superior al 90%.

**Palabras claves:** modelación del transporte, transporte de carga, costos externos del transporte.

**Recibido:** diciembre 2 de 2009

**Aceptado:** enero 15 de 2011

### Introducción

A pesar de los esfuerzos que se han hecho por modelar el transporte de carga, en Colombia son pocos los antecedentes de la modelación, incluyendo costos externos. Entre 1979 y 1981 el Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Colombia contrató el primer estudio de transporte de carga, con la asistencia técnica

## Estimating marginal external costs for road, rail and river transport in Colombia

Luis Gabriel Márquez Díaz<sup>2</sup>

### ABSTRACT

This report presents the results of research regarding strategic freight transport network modelling in Colombia using external cost. The model uses sequential equilibrium between distribution and traffic assignment phases; it is national and inter-regional, involving strategic decision-making. The Colombian transport network consists of 27,469 km of roads, 11,257 km of navigable rivers, 2,192 km of railway lines and a set of centroid connectors for establishing a link with the zoning system (consisting of 70 internal areas and 8 external areas). Each link in a network involves internal costs: time, operation and external costs, congestion, accidents, air pollution and CO<sub>2</sub> emissions. Vehicle ownership costs were excluded from internal cost analysis; costs such as noise, climate change and effects on the landscape were not studied in external costs. Marginal costs regarding the network were estimated by two methods. First, it was assumed that an additional unit of demand did not affect equilibrium in a transport network and then marginal cost was estimated as being the sum of marginal costs regarding links in the shortest path. The other approach assumed that an additional unit of demand changed network equilibrium; marginal costs were then estimated by calculating the difference between the two equilibrium scenarios. The methods were applied to 7 selected routes covering the most important Colombian freight transport corridors. An average 0.014 US\$/ton/km rate was estimated for external costs regarding highway transport, 0.000105 US\$/ton/km for water transport and 0.001625 US\$/ton/km for railroad transport (preponderance of environmental costs exceeding 90%).

**Keywords:** transport modelling, freight transport, external transport costs.

**Received:** December 2th 2009

**Accepted:** January 15th 2011

### Introduction

Despite efforts made to model freight transport in Colombia, few studies have been made into transport modelling including external costs. The Colombian Ministry of Public Works and Transport sponsored the first study of freight transport, technical assistance being provided by the Netherlands' Economic Institute

<sup>1</sup>Ingeniero de Transporte y Vías. M.Sc. en Ingeniería con énfasis en Transporte, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Profesor, Escuela de Ingeniería en Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. luis.marquez@uptc.edu.co

<sup>2</sup>Transport and highways Engineer. M.Sc. in Engineering with emphasis on Transport, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Professor, School of Transport and Highway Engineering, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. luis.marquez@uptc.edu.co

ca del Netherlands Economic Institute. En 1985 se actualizó ese estudio sin lograr culminar la etapa de implementación y entonces se ejecutó el Plan Maestro de Transporte, que concluyó en 1994. En 1998, con la asesoría técnica del consorcio Cal & Mayor y Asociados (2002) surgió el Plan Estratégico de Transporte, concebido bajo una metodología que considera las características económicas y geográficas del país y las condiciones del sector transporte. Recientemente, la Unión Temporal Modelación de Transporte (UTMT, 2008), conformada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Universidad Nacional Sede Medellín y la Fundación Universidad del Norte, desarrolló durante los años 2007 y 2008 un proyecto de investigación con la finalidad de calibrar un modelo de transporte de carga para analizar los impactos producidos sobre las redes de transporte. Con base en los resultados de ese estudio se desarrolló un trabajo de investigación complementario, con el cual se hizo el análisis de los costos internos y externos de la red estratégica considerada (Márquez, 2009).

En el ámbito internacional, en cambio, se encuentran referentes importantes acerca de la modelación de costos externos del transporte de carga. Janic (2007) desarrolló un modelo para comparar los costos internos y externos en una red de transporte de carga intermodal en la Unión Europea. Beuthe et al. (2002) estudiaron los costos de externalidades del transporte de carga y propusieron algunas estrategias de internalización. Nijkamp et al. (2004) compararon el poder descriptivo y predictivo de dos clases de modelos estadísticos de estimación para redes de transporte multimodal, utilizando una familia de modelos de elección discreta. En Estados Unidos, Forkenbrock (2001) estudió los costos del transporte de carga en cuatro tipos representativos de trenes, estimando para cada uno de ellos los costos privados y los costos externos, comprobando sus diferencias porcentuales. Ozbay et al. (2007) aplicaron tres metodologías alternativas para estimar los costos marginales en una red de transporte utilizando los métodos de asignación todo o nada, incremental y de equilibrio de usuario.

En el presente artículo se emplea el modelo estratégico de transporte de carga (UTMT, 2008), adaptado para estudiar los costos internos y externos (Márquez, 2009), cuyos parámetros han sido previamente calibrados en forma empírica para extraer indicadores de costos internos y externos, y estimar los costos marginales sobre la red estratégica de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario en Colombia.

## Los costos de transporte en la red estratégica

Para cada arco de la red estratégica en el modelo, la función del costo total se expresa como la suma del costo privado del tiempo de viaje, el costo interno de operación y un conjunto de costos externos, conformado por los siguientes elementos: congestión, accidentes, polución del aire, cambio climático e infraestructura. Otros costos, como el del ruido y el de la afectación del paisaje, que podrían representar cerca del 10% de los costos externos (ISIS et al., 1998; Infrás, 2004), no han sido incluidos, puesto que se encuentran fuera del alcance establecido.

La mayoría de los procedimientos usados para resolver el problema de asignación de vehículos equivalentes (veq) a la red de transporte actualizan los costos iterativamente con base en la función de desempeño de los arcos. Aunque diferentes formula-

between 1979 and 1981. This study was updated in 1985, but could not be implemented and a Master Transport Plan was then developed, which ended in 1994. A Strategic Transport Plan was developed in 1998, technical assistance being provided by Cal & Mayor y Asociados from Mexico (2002); a methodology was applied that considered Colombia's economic and geographic conditions as well as the transport sector. Recently, the Transport Modelling Temporary Merger (TMTM or Unión Temporal Modelación del Transporte - UTMT, 2008), consisting of the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, the Universidad Nacional de Colombia and Fundación Universidad del Norte, engaged in a research project to standardise a freight transport model for analysing its impact on transport networks during 2007 and 2008. Based on the results of this study, additional research was carried out by analysing internal and external costs in the strategic network being considered (Márquez, 2009).

By contrast, there are important references on freight transport modelling in the international arena, including external costs. Janic (2007) developed a model for comparing internal and external costs for an intermodal freight transport network in the European Union. Beuthe et al., (2002) studied the costs of freight transport externalities and suggested some internalisation strategies. Nijkamp et al., (2004) compared the descriptive and predictive power of two kinds of statistical estimation models for multimodal transport networks using a family of discrete choice models. Forkenbrock (2001) studied the costs of freight transport in the USA in four representative types of train, estimating private and external costs for each and evaluating their percentage differences. Ozbay et al., (2007) applied three alternative approaches for estimating marginal costs in a transport network by using assignment methods, such as all or nothing, incremental and user equilibrium.

The present paper adapts a strategic freight transport model (TMTM, 2008) for studying internal and external costs (Márquez, 2009) whose parameters had been previously calibrated to extract internal and external cost indicators and then estimate transport marginal costs for road, river and rail transport in Colombia, in the strategic network.

## Transport costs in strategic networks

Total cost for each link in a strategic network in the model can be expressed as the sum of private travel time cost, internal operation cost and a set of external costs which included the following: congestion, accidents, air pollution, climate change and infrastructure. Costs such as noise and effects on the landscape, which could represent about 10% of external costs (ISIS et al., 1998; INFRAS, 2004), have not been included in this study as being beyond its scope.

Most procedures used for solving the passenger car equivalent (PCE) assignment problem have relied on updating cost based on the volume-delay function. Although different formulations have been suggested (Branston, 1976, Davidson, 1966; Spiess, 1990,

En español

In English

ciones han sido sugeridas (Branston, 1976; Davidson, 1966; Spiess, 1990; National Research Council, 2000), se eligió la función BPR de la Bureau of Public Roads (Traffic Assignment Manual; BPR, 1964), que tradicionalmente ha sido una de las más usadas para actualizar los costos sobre la red de transporte. En esta función el costo interno del tiempo es función del tiempo de viaje a flujo libre, calculado como la relación entre la distancia del arco y la velocidad a flujo libre; el volumen vehicular, expresado en vehículos equivalentes por unidad de tiempo; la capacidad del arco, dada en las mismas unidades en que se expresa el volumen; el valor del tiempo, en unidades monetarias por unidad de tiempo, y los parámetros de calibración  $\alpha$  y  $\beta$  de la función BPR.

Si bien el costo social de la congestión puede verse como una medida artificial de la ineficiencia en el uso de la infraestructura de transporte (Doll, 2002), es común aceptar que la congestión produce también una externalidad; la mejor práctica para la estimación de su costo se basa en las relaciones flujo-demora, el valor del tiempo y las elasticidades de la demanda de transporte (Maibach *et al.*, 2008). En este caso se hizo el cálculo del costo marginal de la congestión aplicando el costo marginal de la función BPR sobre cada arco, manteniendo la especificación de los parámetros ya referidos.

La incorporación del costo de la accidentalidad utiliza una adaptación del modelo de Lindberg (2002), que aunque no es tan complejo como el de Rizzi (2005), permite una mejor especificación que otras formulaciones estudiadas (ISIS *et al.*, 1998; Beuthe *et al.*, 2002; FHWA, 2005; Ozbay *et al.*, 2007). Para Lindberg (2002) el costo total de la accidentalidad es función del número de accidentes y de la disposición a pagar por reducir el riesgo de accidente, por parte del individuo, de sus allegados y del costo externo del sistema. El costo marginal total de la accidentalidad con respecto al volumen de tránsito se deduce de la función de costo total; como el número de accidentes es una función del volumen de tránsito, se encuentra un factor de riesgo de accidentalidad y con base en él se obtiene el costo marginal externo descontando el costo privado, que es internalizado por el usuario.

Con respecto a los efectos ambientales producidos por el transporte (Bickel *et al.*, 2006), que involucran habitualmente tres componentes: salud, vegetación y daños materiales (Murphy y Delucci, 1998), se utiliza un costo generalizado para simplificar el análisis. Mahmud y Van Arem (2008) estudiaron varios enfoques de modelación de tráfico para estimar la cantidad de emisiones, encontrando que en aplicaciones de gran escala es apropiado el uso de modelos como el Mobile (U. S. EPA, 2003), aunque también son considerados de interés modelos un poco más sencillos como el Modem (Osses y Henríquez, 2002), que emplea la técnica de los factores de emisión (EEA, 2007), estableciendo un valor representativo de la cantidad de sustancia contaminante que se libera a la atmósfera con relación a la actividad asociada que la produce. Siguiendo esta línea, se plantea estimar los costos de la polución del aire en función de factores tales como: el flujo vehicular, un factor de emisión, expresado en gramos por vehículo y por kilómetro, y un parámetro de calibración que induce el costo monetario de la polución de cada emisión contaminante.

La formulación propuesta se utiliza de manera alternativa para

National Research Council, 2000), the Bureau of Public Roads' (BPR) Traffic Assignment Manual (1964) was chosen as it has been one of the most traditionally-used for updating transport network costs. Internal cost is determined in this mathematical function by free flow travel time, calculated as the ratio between length and free flow speed, traffic flow (expressed as vehicles per unit of time), link capacity (expressed in the same units as traffic volume), value of time (in monetary units per unit of time) and calibration parameters in BPR function,  $\alpha$  and  $\beta$ .

While the social cost of congestion can be seen as an artificial measurement of inefficiency in using transport infrastructure (Doll, 2002), it is accepted that congestion also produces an externality. The best practice for estimating congestion cost is based on volume-delay functions, value of time and transport demand elasticity (Maibach *et al.*, 2008). In this case, congestion marginal cost is calculated on marginal BPR cost for each link, maintaining the above parameters' specification.

Although not as complex as the Rizzi model (2005), accident cost can be analysed by an adaptation of the Lindberg model (2002) allowing better specification than other formulations tested (ISIS *et al.*, 1998; Beuthe *et al.*, 2002, FHWA, 2005; Ozbay *et al.*, 2007). The total cost of an accident, according to Lindberg (2002), depends on the number of accidents and willingness to pay to reduce accident risk by individuals, their relatives and external cost in a system. The total marginal cost of accidents regarding traffic volume is deducted from total cost as being the number of accidents regarding traffic volume; an accident risk factor is found and external marginal cost then obtained by subtracting private cost internalised by a user.

Regarding environmental effects caused by transport (Bickel *et al.*, 2006), which usually involve health, vegetation and property damage (Murphy and Delucci, 1998), generalized cost is used for simplifying analysis. Mahmud and van Arem (2008) have studied several traffic modelling approaches for estimating the amount of emissions, finding that models such as MOBILE (US EPA, 2003) can be used in large-scale applications; however, simpler models such as MODEM (Osses and Henríquez, 2002) which uses the emission factor technique (EEA, 2007), are also considered of interest as they establish a value representing the amount of pollutant released into the atmosphere regarding the associated activity which has produced it. Following this approach, air pollution costs are estimated from factors such as traffic flow, emission factor (in grams per vehicle per kilometre) and a calibration parameter which includes the cost of each pollutant.

Maintaining the same functional relationship and changing emis-

En español

In English

estimar individualmente los costos producidos por la emisión de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), conservando la misma forma funcional y cambiando los factores de emisión y parámetros de costo para cada sustancia contaminante.

El costo de la infraestructura se calcula como un costo medio, en función de la longitud y el número de carriles que representa cada arco. Como el costo no está en función del flujo, el costo marginal por efecto de un vehículo adicional no puede ser calculado directamente, así que se utiliza la relación entre el tiempo de viaje de un vehículo adicional y el tiempo que transcurre entre cada ciclo de mantenimiento (Ozbay *et al.*, 2007).

## Desarrollo experimental

El análisis de la demanda de transporte tomó como punto de partida el modelo estratégico de transporte de carga desarrollado por la UTMT (2008), que utilizó el enfoque de productos para estimar la demanda de transporte de carga, siguiendo una adaptación del modelo clásico de transporte de los cuatro pasos. El modelo fue concebido a escala nacional interregional, con una perspectiva de decisiones del orden estratégico, y utilizó una división espacial de 70 zonas internas y 8 zonas externas que concentran los movimientos de carga que se puedan atraer o producir en Venezuela, Atlántico Sur, Pacífico Sur, Ecuador, Tokio, costa oeste de los Estados Unidos, costa este de los Estados Unidos y Rotterdam (Márquez, 2008).

Con respecto a la oferta de transporte, la red para la modelación estratégica del transporte de carga en Colombia se conformó por una selección de arcos y nodos de los modos de transporte carretero, fluvial y ferroviario, junto con información de variables de impedancia, tiempos y capacidad, necesarios para la utilización de los algoritmos de asignación. La red de transporte caracterizó 27.469 km de carreteras, 11.257 km de ríos navegables y 2.192 km de ferrocarril; adicionalmente se incluyó un conjunto representativo de arcos marítimos para conectar las zonas externas internacionales y un conjunto de conectores de centroides para establecer la conexión con las zonas internas.

La estimación de los parámetros de las funciones de costo en el modo carretero consideró 22 tipologías de arcos homogéneos y un camión representativo, en el modo fluvial se consideró un convoy típico y en el modo ferroviario se utilizó un tren típico. Para la obtención del valor del tiempo se experimentó con dos enfoques alternativos: uno basado en los factores de costo y otro cimentado en modelos de elección discreta (Fowkes *et al.*, 1989). La estimación empírica de los demás parámetros se hizo con base en información secundaria producida por diferentes entidades en el país.

El cálculo de los costos marginales sobre la red estratégica de transporte se efectuó aplicando dos métodos:

*Equilibrio en estado de inercia:* se asumió que una unidad adicional de demanda entre un par OD no afecta el equilibrio total de la red de transporte, es decir, que la red de transporte experimenta un estado de inercia que es razonable hasta alcanzar cierto umbral de variación de demanda. En este caso el costo marginal total (CMT) se calculó así:

- ◆ Se determinó la ruta más corta entre el par OD dado.

sion factors and cost parameters for each pollutant, the proposed formulation has been used to estimate the costs produced by carbon monoxide (CO), nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) and sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) emission.

Infrastructure cost has been calculated as average cost depending on the length and number of lanes representing each link. As cost is not a function of flow, the relationship between the travel time of an additional vehicle and the time between each maintenance cycle has been used because the marginal cost effect of an additional vehicle cannot be calculated directly (Ozbay *et al.*, 2007).

## Experimental approach

The strategic freight transport model developed by the TMTM (2008) was used for analysing transport demand in this investigation; it was based on product approach for estimating freight transport demand and adapting a four-step transport model. The model was designed at national level, involving strategic decision-making and zoning consisting of 70 internal and 8 external zones concentrating freight attracted or produced in Venezuela, the South Atlantic, the South Pacific, Ecuador, Tokyo, the US West Coast, the US East Coast and Rotterdam (Márquez, 2008).

Regarding transport supply, the network for strategically modelling freight transport in Colombia was formed by a selection of links and road, river and rail transport nodes, along with details concerning impedance variables, time and capacity required for using assignment methods. The Colombian transport network consists of 27,469 km of roads, 11,257 km of navigable rivers and 2,192 km of railway; the network also includes a set of connectors linking international external areas by sea and a set of connectors to connect centroids with inland areas.

Cost estimation considered 22 kinds of homogeneous link and a representative truck for highways, a typical convoy for river transport and a typical train for rail transport. Two alternative approaches were used for experimentally obtaining the value of time; one was based on cost factors and the other on discrete choice models (Fowkes *et al.*, 1989). The other parameters were estimated using secondary data produced by Colombian entities.

Two different methods were used for calculating the strategic transport network's marginal costs:

*Inertial condition equilibrium:* It was assumed that an additional unit of demand between OD pair did not affect transport network equilibrium, meaning that the transport network has reasonable inertia up to a certain threshold of change in demand. In this case, total marginal cost (TMC) was calculated as follows:

- ◆ The shortest path between the given OD pair was determined;

En español

- ◆ Se estimó el CMT de cada arco en la ruta más corta utilizando la derivada de la función de costo total de ese arco.
- ◆ Se estimó el CMT de una unidad adicional de demanda de transporte de carga entre el par OD seleccionado sobre la red de transporte como la suma de los costos marginales de los arcos sobre la ruta más corta.

*Equilibrio en estado de variación:* se supuso que una unidad de demanda de transporte de carga adicional, entre un par OD sobre la red de transporte, causaba variación al equilibrio existente, lo cual es razonable siempre y cuando la cantidad de demanda de transporte de carga adicional haya superado el umbral que hipotéticamente mantiene a la red de transporte en estado de inercia. En este segundo enfoque el CMT se calculó así:

- ◆ Se utilizó el método de asignación de equilibrio estocástico de usuario para asignar la demanda de transporte de carga total entre el par OD.
- ◆ Se estimó el costo total sobre la red de transporte para la condición de equilibrio alcanzada por el método de asignación utilizado.
- ◆ Se incrementó en 1% la demanda de transporte de carga entre el par OD con respecto a la demanda de transporte de carga original del par OD.
- ◆ Se estimó el CMT de una unidad adicional calculando la diferencia entre el costo total de la red de transporte con incremento del 1% de demanda  $CT_1$  y el costo de la red de transporte en la condición de equilibrio original  $CT_0$  y luego dividiendo esa diferencia por la demanda de transporte de carga extra asignada  $\Delta_{OD}$ , así:

$$CMT = \frac{CT_1 - CT_0}{\Delta_{OD}}$$

## Resultados

Todos los costos presentados se expresan en pesos colombianos del año 2005. No se encontró diferencia entre los resultados de las dos metodologías, ya que la demanda de transporte adicional del 1%, utilizada en el método denominado "equilibrio en estado de variación", no fue suficiente para causar la esperada variación del equilibrio existente.

En el modo de transporte carretero (tabla 1) se descubrió que en promedio el costo del tiempo representa un 5% del costo interno total considerado, lo cual explica en parte el predominio de este modo de transporte en el país, puesto que los costos de oportunidad de la carga transportada, así como la mayor confiabilidad en la entrega, hacen más atractiva su utilización.

En el modo de transporte fluvial se observó que el costo interno asociado con el tiempo en un convoy tipo es del orden del 60% del costo interno total, siendo ésta posiblemente una de las razones por las que el modo de transporte fluvial sea utilizado en la movilización de mercancías con bajos costos de oportunidad.

En cuanto al modo de transporte ferroviario, se encontró que el valor del tiempo representa el 30% del costo interno total. Al comparar los resultados en los modos de transporte estudiados

In English

- ◆ *TMC* was estimated for each link in the shortest path using the derivative of total cost for such link; and
- ◆ The *TMC* produced by an additional unit of freight transport demand between OD pair selected in the transport network was estimated as the sum of marginal costs in links in the shortest path.

*Variation condition equilibrium:* It was assumed that one unit of demand for additional freight, between OD pair in the transport network would cause changes in existing equilibrium, this being reasonable if the amount of demand for additional freight exceeded the threshold hypothetically keeping the transport network in equilibrium. *TMC* was calculated in this second approach as follows:

- ◆ The stochastic user equilibrium assignment method was used for assigning total freight demand between OD pair;
- ◆ Total transport network cost for equilibrium reached was estimated by the assignment method;
- ◆ Freight transport demand between OD pair was increased by 1% on original freight demand for OD pair; and
- ◆ *TMC* for an additional unit was estimated by calculating the difference between total transport network cost for increased 1%  $TC_1$  demand and transport network cost in original equilibrium  $TC_0$ , and then dividing that difference by demand for extra cargo  $\Delta_{OD}$  assigned, as:

$$TMC = \frac{TC_1 - TC_0}{\Delta_{OD}}$$

## Results

All costs were estimated in US dollars for 2005. There was no difference between the results produced by both methods because demand for an additional 1% transport used in a method called "variation condition equilibrium" was not sufficient to cause the expected change in equilibrium.

Concerning road transport (Table 1), it was found that time cost represented 5% of total internal cost considered (on average), partially explaining this transport mode's predominance in Colombia since freight opportunity costs and greater delivery reliability are more attractive.

Internal convoy cost of time was 60% of total internal cost in river transport mode and this was possibly one of the reasons why river transport is used to transport goods having low opportunity cost.

Regarding rail transport, it was found that the value of time represented 30% of total internal cost. Comparing the results (Figure 1), it was found that internal road transport costs was 3.5 times

En español

In English

(figura 1) se encontró que los costos internos del modo de transporte carretero son 3,5 veces más grandes que los costos internos del modo de transporte fluvial; igualmente, que entre los modos de transporte carretero y ferroviario la relación es de 2,4; y entre los modos ferroviario y fluvial, de 1,7.

Tabla 1. Costos internos del modo de transporte carretero.

Ruta	Descripción	Costo interno (\$/veq)		
		Tiempo	Operación	Total
1	Boyacá noreste – Bogotá	5.919	100.094	106.013
2	Santander suroeste - Cesar sur	5.038	102.680	107.718
3	Cundinamarca oeste - Atlántico Colombia	14.457	290.259	304.716
4	Bogotá - Magdalena norte	17.267	341.297	358.564
5	Quindío - Valle del Cauca oeste	6.035	111.179	117.214
6	Bogotá - Nariño sureste	25.570	402.831	428.401
7	Antioquia Metro - Norte de Santander sur	19.602	309.045	328.647

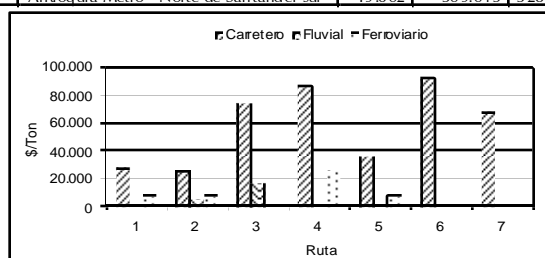


Figura 1. Comparación de los costos internos por modo y ruta.

Considerando un factor de carga promedio, expresado en toneladas por vehículo para cada modo de transporte y un factor de vehículo equivalente, se recuperó un indicador de costo interno para cada uno de los modos de transporte, encontrando lo siguiente: 74 \$/ton/km en el modo de transporte carretero, 19 \$/ton/km en el modo de transporte fluvial y 27 \$/ton/km en el modo de transporte ferroviario.

Los resultados obtenidos en el modo de transporte carretero (tabla 2) alertan acerca de la preponderancia del costo externo del impacto ambiental frente a los demás componentes de costos externos analizados. Se pudo constatar que el costo externo del impacto ambiental alcanza a representar cerca del 94% de los costos externos del modo de transporte carretero.

Tabla 2. Costos externos del modo de transporte carretero

Ruta	Costo externo (\$/veq)			Total
	Congestión	Accidentalidad	Ambiental	
1	2.332	298	37.685	40.315
2	1.985	350	35.052	37.387
3	5.695	966	98.255	104.916
4	6.802	1.115	122.039	129.956
5	2.377	356	46.375	49.108
6	10.073	1.026	152.508	163.607
7	7.722	820	118.601	127.143

Pudo comprobarse también que el costo externo de la accidentalidad es el componente de menor importancia, puesto que no alcanza a representar ni siquiera el 1% del costo externo total del modo de transporte carretero, lo cual es razonable ya que la accidentalidad es un fenómeno que cobra mayor importancia en el ámbito urbano. En el modo de transporte fluvial todo el peso de los costos indirectos recae en la valoración del impacto ambiental, representado por los de las emisiones contaminantes y el costo del CO<sub>2</sub>.

En el modo de transporte ferroviario se encontró también que el costo externo ambiental es el más importante, representando algo más del 87% del costo externo total, seguido del costo ex-

larger than domestic river transport costs. There was a 2.4 ratio between road and rail transport modes and 1.7 ratio between rail and river transport modes.

Table 1. Internal highway costs

Route	Description	Internal cost (US\$/pce)		
		Time	Operating	Sum
1	Boyacá Noreste – Bogotá	2.96	50.05	53.01
2	Santander Suroeste - Cesar Sur	2.52	51.34	53.86
3	Cundinamarca Oeste - Atlántico Colombia	7.23	145.13	152.36
4	Bogotá - Magdalena Norte	8.63	170.65	179.28
5	Quindío - Valle del Cauca Oeste	3.02	55.59	58.61
6	Bogotá - Nariño Sureste	12.79	201.42	214.21
7	Antioquia Metro - Norte de Santander Sur	9.80	154.52	164.32

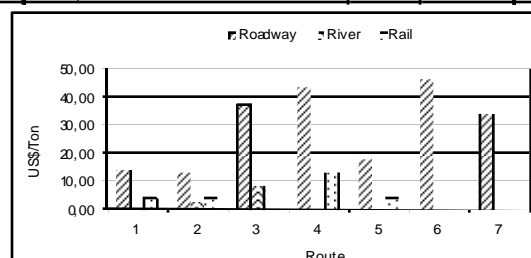


Figure 1. Comparing internal costs by mode and route

Considering an average load factor, expressed in tons per vehicle for each mode of transport and an equivalent passenger car factor, internal cost indicators were obtained for each transport mode: 0.037 US\$/ton/km for road transport, 0.0095 US\$/ton/km for river transport and 0.0135 US\$/ton/km for rail transport.

The road transport results (Table 2) had a preponderance of external environmental cost regarding the other external cost components analysed. It was found that external environmental cost represented 94% of external road transport costs.

Table 2. External road transport costs

Route	External cost (US\$/pce)				Sum
	Congestion	Accident	Environmental	Sum	
1	1.17	0.15	18.84	20.16	
2	0.99	0.18	17.53	18.70	
3	2.85	0.48	49.13	52.46	
4	3.40	0.56	61.02	64.98	
5	1.19	0.18	23.19	24.56	
6	5.04	0.51	76.25	81.80	
7	3.86	0.41	59.30	63.57	

It also became clear that the external cost of accidents was the minor component because it failed to represent 1% of total external road transport cost which is reasonable since accidents are a major phenomenon in urban transport. Evaluating environmental costs (consisting of emission costs and the cost of CO<sub>2</sub>) represented total indirect water transport costs.

It was also found that environmental external cost was most important in rail transport, representing just over 87% of total external costs, followed by 12% external congestion cost. The

En español

temo de la congestión con el 12%. Este último costo se percibe particularmente alto y se explica, en primer lugar, por la forma como fueron penalizados los arcos que representan el paso por las estaciones, y en segundo lugar, por la baja capacidad de los arcos ferroviarios con que se alimenta la función BPR.

La comparación de los costos externos entre los diversos modos de transporte (figura 2) dio como resultado una relación de 1 a 110 de los costos externos del modo de transporte carretero con respecto al modo de transporte fluvial, y de 1 a 8 con respecto al modo de transporte ferroviario; en la única ruta comparable entre los modos de transporte fluvial y ferroviario se obtuvo una relación de 1 a 17.

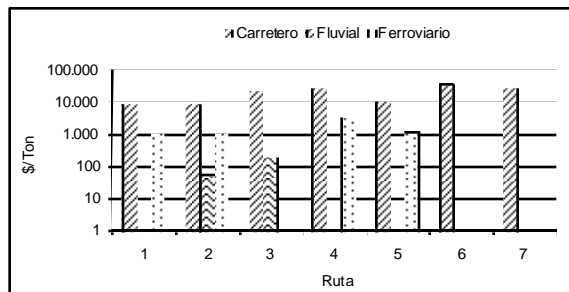


Figura 2. Comparación de los costos externos por modo y ruta.

Se recuperó un indicador promedio de los costos externos para cada modo de transporte, hallándose lo siguiente: 28 \$/ton/km en el modo de transporte carretero; 0,21 \$/ton/km en el modo de transporte fluvial y 3,25 \$/ton/km en el modo de transporte ferroviario. En el modo de transporte carretero los costos externos son equivalentes al 37% de los costos internos valorados; en el modo de transporte ferroviario alcanzan una cuantía equivalente al 12%, y en el modo de transporte fluvial apenas sí representan algo más del 1%.

### Conclusiones

Se modeló una red estratégica de transporte de carga en Colombia, incluyendo el costo de las externalidades, y se experimentó con el modelo para extraer indicadores de costos internos y externos.

Los costos marginales sobre la red de transporte fueron obtenidos sumando los costos marginales sobre la ruta más corta en cada caso estudiado, siguiendo la metodología denominada "equilibrio en estado de inercia"; el segundo método, identificado como "equilibrio en estado de variación", arrojó los mismos resultados, ya que la cantidad adicional de demanda de transporte de carga no superó el umbral que hipotéticamente mantiene a la red de transporte en estado de inercia. Se concluye que en aquellos casos en los que no se presenta gran congestión en redes, los dos métodos son equivalentes, siendo recomendable utilizar el primero de ellos por su gran sencillez y facilidad de implementación.

La estimación de los costos internos no incluyó el cálculo de los costos fijos, representados especialmente en los costos por la posesión vehicular, así que la correcta interpretación de los resultados obtenidos debe tener presente este hecho, en especial cuando se trate de hacer comparaciones respecto a los demás costos.

In English

latter cost was particularly high; it was explained by how links modelling the way through railway stations were penalized and the low railway link capacity in BPR functions.

Comparing different transport modes' external costs (Figure 2) resulted in a 1:110 ratio for external road transport costs compared to river transport and 1:8 regarding rail transport (a 1:17 ratio was obtained for the only comparable route between river and rail modes).

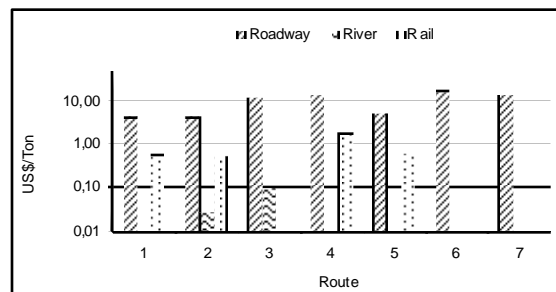


Figure 2. Comparing external costs by mode and route

An average external cost indicator for each transport mode was found: 0.014 US\$/ton/km for highway transport, 0.000105 US\$/ton/km for water transport and 0.001625 US\$/ton/km for rail-road transport. External costs accounted for 37% of internal road transport costs, 12% for rail transport and just over 1% for river transport.

### Conclusions

A strategic freight transport network in Colombia was modelled, including external costs, and the model was used for experimentally extracting internal and external cost indicators.

Adding marginal costs for the shortest path in each case studied led to marginal transport network costs being obtained with inertial equilibrium methodology. The same results were obtained with variation equilibrium because the additional amount of freight transport demand did not exceed the threshold hypothetically maintaining transport network equilibrium. When there was no network congestion, it was concluded that both methods were equivalent. It is recommended using the first method as it is simpler and easier to implement.

Vehicle ownership costs were not included when estimating internal costs, so the correct interpretation of results must consider this fact, especially when making comparisons with other costs.

Se identificaron perspectivas de trabajos futuros tales como: determinación de los factores de emisión de contaminantes y del dióxido de carbono por los vehículos de transporte de carga, sobre los principales corredores viales del país; disposición a pagar por la mitigación del impacto ambiental ocasionado por el transporte de carga; cuantificación del efecto de los vehículos de transporte de carga sobre el deterioro causado a la infraestructura vial del país, y estimación del valor estadístico de la vida en Colombia para el análisis del impacto de la accidentalidad.

## Nomenclatura

- $\alpha$ : Parámetro de calibración de la función BPR
- $\beta$ : Parámetro de calibración de la función BPR
- CMT: Costo marginal total
- CT: Costo total
- $CT_0$ : Costo de la red de transporte en la condición de equilibrio original
- $CT_1$ : Costo de la red de transporte con incremento del 1% de demanda
- $\Delta_{OD}$ : Diferencia de la demanda de transporte extra asignada
- veq: Vehículo equivalente

## Referencias / References

- Beuthe M., Degrandt F., Geerts J-F., Jourquin B., External costs of the Belgian interurban freight traffic: a network analysis of their internalisation., *Transportation Research Part D* 7, 2002, pp. 285-301.
- Bickel, P., Friedrich, R., Link, H., Stewart, L. and NASH, C., Introducing Environmental Externalities into Transport Pricing: Measurement and Implications., *Transport Reviews*, Vol. 26, No. 4, July 2006, pp. 389-415.
- Branston, D., Link Capacity Functions: A Review., *Transportation Research* 10, 1976, pp. 223-236.
- Cal & Mayor y Asociados., Plan Estratégico del Transporte de Carga en Colombia., Documento Resumen, Ministerio de Transporte, Colombia, 2002, pp. 8-10.
- Davidson, K. B., A flow travel time relationship for use in transportation planning., *Australian Road Research Board* 3, 1966, pp. 183-194.
- Doll, C., UNITE, Case Studies 7A to 7D - Inter-urban road and rail user costs UNITE., ITS, University of Leeds, Karlsruhe, 2002, pp. 3-4.
- EEA, EMEP/CORINAIR, Emission Inventory Guidebook, Technical report N° 16, Group 7: Road Transport, Chapter B710, 2007, pp. 8-10.
- Federal Highway Administration (FHWA), Motor Vehicle Accident Costs, [Available online]: <<http://www.fhwa.dot.gov/legisregs/directives/techadv/t57502>>, 2005, [Reference: 11-11-2008].
- Forkenbrock, D., Comparison of External Costs of Rail and Truck Freight Transport, *Transportation Research A*, Vol. 35, No. 4,

Prospects for further research were identified, such as determining emission factors concerning pollutants and carbon dioxide produced by freight transport vehicles in Colombia's major transport corridors, willingness to pay for mitigating the environmental impact caused by freight transport vehicles, quantifying damage to Colombian road infrastructure by freight transport vehicles and estimating the value of a statistical life in Colombia to analyse the impact of accidents.

## Notation

- $\alpha$ : BPR function calibration parameter
- $\beta$ : BPR function calibration parameter
- TMC: total marginal cost
- TC: total cost
- $TC_0$ : cost of transport network in original equilibrium
- $TC_1$ : cost of transport network with 1% increase in demand
- $\Delta_{OD}$ : increasing transport demand
- PCE: passenger car equivalent

- May 2001, pp. 321-337.
- Fowkes, A.S., Nash, C.A., Tweddle, G., Valuing the attributes of freight transport quality: Results of the stated preference survey., working paper 276, ITS, University of Leeds, Yorkshire, 1989, pp. 7-16.
- INFRAS., External cost of transport., Update Study, Final Report, Zurich/Karlsruhe, October 2004, pp. 32-56.
- Isis, E., Inestene, Z., Isi-Fraunhofer, Who-Eceh, Q., Quality Indicators for Transport Systems., Final Report for Publication, Contract n°: ST-96-SC-115, Rome, April 1998, pp. 28-55.
- Janić, M., Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network., *Transportation Research Part D* 12, 2007, pp. 33-44.
- Lindberg, G., Deliverable 9: Accident Cost Case Studies., Case Study 8d: External Accident Cost of Heavy Goods Vehicles, ITS, University of Leeds, 2002, pp. 3-19.
- Mahmod, M., van Arem, B., A simulation framework for modelling the impacts of an integrated road-vehicle system on local air quality., Centre for Transport Studies, University of Twente, the Netherlands, TRAIL Research School, Delft, October 2008, pp. 1-10.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Handbook on estimation of external costs in the transport sector., Report, Delft, February, 2008, pp. 23-35.
- Márquez, L., Propuesta de zonificación para la modelación estratégica del transporte de carga en Colombia., Actas del XV Congreso Panamericano de Tránsito y Transporte, Cartagena, septiembre de 2008.



- Márquez, L., Modelación de una red estratégica de transporte de carga en Colombia utilizando costos de externalidades., tesis presentada a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, para optar al grado de Magister en Ingeniería con énfasis en Transporte, Tunja, 2009.
- Murphy, J. Delucci, M., A Review of the Literature on the Social Cost of Motor Vehicle Use in the United States., Institute of Transportation Studies, University of California, 1998, Paper UCD-ITS-REP-98-22.
- National Research Council., Transportation Research Board., 2000 Highway Capacity Manual, Washington, D.C., 2000.
- Nijkamp, P. Reggiani, A, Tsang, W.F., Comparative modelling of interregional transport flows: Applications to multimodal European freight transport., *European Journal of Operational Research* 155, 2004, pp. 584-602.
- Osses, M., Henríquez, A, Modelo de emisiones vehiculares MO-DEM., Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Santiago, 2002, pp. 1-14.
- Ozbay, K, Bartin, B., Yanmaz-Tuzel, O., Berechma, J., Alternative methods for estimating full marginal costs of highway transportation., *Transportation Research Part A* 41, 2007, pp. 768-786.
- Rizzi, L.L, Diseño de instrumentos económicos para la internalización de externalidades de accidentes de tránsito., *Cuadernos de Economía*, número 126, 2005, pp. 283-305.
- Spiess, H. Conical Volume-Delay Functions., *Transportation Science* 24, 1990, pp. 153-158.
- Unión Temporal Modelación del Transporte UTMT., Investigación para desarrollar y poner en funcionamiento los modelos de demanda y de oferta de transporte que permitan proponer opciones en materia de infraestructura para aumentar la competitividad de los productos colombianos., Informe final, Bogotá, 2008.
- U.S., Environmental Protection Agency EPA, User's Guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2: Mobile Source Emission Factor Model, EPA420-R-03-010, august 2003, pp. 184-198.