

Resumen

La modelación estratégica del transporte de carga ha sido un tema de creciente interés por su utilidad para la evaluación de proyectos. Uno de los tópicos relevantes es la valoración de los parámetros que definen los niveles de servicio de los arcos; tema que es tratado en este artículo, en el que se valoran los parámetros de las funciones de costos, involucrando costos internos y externos, para la red intermodal colombiana, empleando una metodología que se podría aplicar fácilmente en otros sistemas de transporte. Estableciendo tipologías de arcos, se estudian los costos internos referidos al valor del tiempo y los costos de operación; adicionalmente, se estudian cinco componentes de costos externos: congestión, accidentes, polución, efectos sobre cambio climático y daños a infraestructura. Se logró valorar los parámetros de las funciones de costos en arcos de los modos transporte carretero, ferroviario y fluvial y, con ellos, estudiar los costos marginales sobre la red estratégica de transporte de carga de Colombia.

Palabras clave: Costos del transporte, planificación del transporte, transporte de carga.

Abstract

Strategic freight transportation modeling has been a topic of growing interest because of its use for evaluating projects. One of the most important topics is to appraisal the parameters that define the level of service in links. This article presents the evaluation of the cost functions parameter, involving internal and external costs, which were applied to the intermodal network in Colombia, using a methodology that could be easily transferred to other transportation contexts. Considering different link typologies, we study the internal cost of time and operation, in addition to the five components of external costs: congestion, accidents, pollution, climate change, and damage on infrastructure. It was possible to estimate cost function parameters for different modes: road, rail and inland waterways, and to analyze the marginal costs on the Colombian freight transportation strategic network.

Keywords: Freight transportation, transportation planning, transportations costs.

Fecha de recepción: 2 de abril de 2011
Fecha de aceptación: 13 de septiembre de 2011

1. INTRODUCCIÓN

El interés por la modelación del transporte de carga en Colombia ha ido creciendo con el paso del tiempo en un proceso liderado por las instituciones del Estado del orden nacional, que inició en la década de los sesenta con el modelo de Harvard, el cual fue aplicado a la red nacional de transporte como herramienta de apoyo para la elaboración de un plan de desarrollo del sistema de transporte interurbano. En 1979, el Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Colombia contrató un estudio de transporte de carga con la asistencia técnica del Netherlands Economic Institute; en 2000 fue realizado el estudio que dio origen al Plan Estratégico de Transporte (PET) [1], y más adelante, en 2008, se ejecutó el estudio de la Unión Temporal Modelación de Transporte (UTMT) [2], que contó con la participación de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Universidad Nacional - sede Medellín y la Fundación Universidad del Norte.

Los estudios referidos, que han sido liderados por entidades estatales, no han abordado el problema de transporte desde la perspectiva pública, pues los análisis no han considerado los costos de las externalidades del transporte, que son fundamentales en la evaluación social de proyectos y que permitirían consolidar un instrumento idóneo para el desarrollo y aprobación de políticas públicas en materia de transporte [3]. No obstante, en la literatura se encuentran referentes muy importantes acerca de la inclusión de costos de externalidades en la modelización del transporte de carga.

En la Unión Europea se desarrolló un modelo para calcular y comparar los costos internos y externos en una red de transporte de carga intermodal [4], en el que además de los costos internos fueron incluidos los costos de polución del aire, congestión, ruido y accidentes de tráfico. En Bélgica [5] se estudió el efecto de los costos de externalidades generadas por los modos de transporte, mediante la simulación de los efectos que sobre la red de transporte genera la internalización de costos externos. Otros estudios en el ámbito europeo han comparado el poder descriptivo y predictivo de distintas clases de modelos, utilizando familias de modelos de elección discreta, lo cual permite determinar el efecto de varios sistemas de cobro en un segmento específico de la red de transporte carretero [6].

En Estados Unidos de América han sido estudiados en forma comparativa cuatro tipos representativos de trenes [7], y se han encontrado las diferencias porcentuales entre los costos privados y los costos externos generados por la utilización de esos equipos de transporte de carga. También se ha experimentado con 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 [8].

En otros contextos, las experiencias en la evaluación de externalidades del transporte de carga, con base en la estimación de costos internos a partir de los costos de mercado y valorando empíricamente los costos de las externalidades como polución del aire, gases de efecto invernadero, infraestructura, congestión, ruido y accidentes [9], han concluido que los costos externos de la congestión exceden los impactos negativos generados sobre el ambiente y el uso de la infraestructura.

La existencia de una base conceptual amplia acerca de la modelación de sistemas de transporte de carga con costos de externalidades ha motivado este trabajo de investigación, que contribuye a la obtención de información esencial para apoyar la eficiente asignación de recursos del sector transporte en el contexto colombiano, el aseguramiento de la equidad entre los distintos modos de transporte disponibles y el desarrollo de mecanismos efectivos de gestión y precio para alcanzar el óptimo social.

Las principales aportaciones del trabajo de investigación realizado se ubican en el análisis de las funciones de costos internos y externos utilizadas en la modelación del transporte de carga, la consolidación de un modelo estratégico de transporte de carga para Colombia que permite el análisis de externalidades y la estimación de los parámetros de las funciones aplicables al caso colombiano para los modos de transporte carretero, ferroviario y fluvial, experiencia que puede ser fácilmente transferida a otros contextos, especialmente en países en vías de desarrollo.

3. FUNCIONES DE COSTO

Los costos sociales totales del transporte normalmente son separados en costos internos y costos externos [10]. Los costos internos, también llamados costos privados o directos, incluyen los costos que los usuarios

perciben directamente, como el costo de operación y el costo del tiempo. A su vez, los costos externos, también denominados costos indirectos, se refieren a los costos que no son asumidos directamente por los usuarios, tales como buena parte del costo de la accidentalidad, costo de contaminación, costo de la congestión impuesta a otros usuarios, y en ciertos casos, el costo generado por el deterioro debido al uso de la infraestructura [8]. Así, el costo total, CT , que caracteriza cada uno de los arcos del modelo de transporte puede expresarse como

$$CT = CP_t + CP_{opr} + CE \quad (1)$$

Donde CP_t es el costo privado asociado con el valor del tiempo consumido, CP_{opr} es el costo interno de operación y CE representa los costos de las externalidades consideradas: congestión, accidentes, contaminación del aire, cambio climático y costo externo de la infraestructura.

Otros costos, como los producidos por el ruido y la afectación del paisaje, que podrían representar cerca del 10% de los costos externos [11], [12], no han sido incluidos dentro del alcance de la investigación realizada.

Costo del tiempo y de la congestión

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 o a través de modelos de equilibrio simultáneo [13] con base en la función de desempeño de los arcos, la cual establece matemáticamente la relación entre un indicador de nivel de servicio (tiempo, costo o costo generalizado) y el flujo del arco. Aunque han sido sugeridas diferentes formulaciones [14] - [19], la función BPR del *Bureau of Public Roads* es una de las más usadas para estimar los costos sobre los arcos de una red de transporte.

En las funciones del tipo BPR, el costo del tiempo de desplazamiento sobre cada arco es función del tiempo de viaje a flujo libre, calculado como la relación entre la distancia L del arco y la velocidad a flujo libre V_o ; del volumen Q expresado en VEQ sobre el arco por unidad de tiempo; de la capacidad C del arco, dada en las mismas unidades en que se expresa el volumen; del valor del tiempo VOT en unidades monetarias por unidad

de tiempo, y de los parámetros de calibración α y β , que usualmente han sido fijados en 0,15 y 4,0 respectivamente [18], tal como se describe en la ecuación (2), que corresponde a la curva de costos medios:

$$CP_i = Q \cdot VOT \cdot \frac{L}{V_0} \left[1 + \alpha \left(\frac{Q}{C} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

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 [19], es común aceptar que ella en sí misma es una externalidad, dada por la diferencia entre la curva de costos marginales y la curva de costos medios. 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 [20]. En este caso, el costo marginal de la congestión CME_{cong} sobre cada arco se estima tal como se muestra en (3):

$$CME_{cong} = \alpha \cdot \beta \cdot VOT \cdot \frac{L}{V_0} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^\beta \quad (3)$$

Costos internos de operación

Normalmente, los costos internos de operación están relacionados con el costo del combustible, el pago de peajes, que es usado habitualmente como un mecanismo de internalización, y demás costos percibidos por los individuos, que deben expresarse con fines de modelación en unidades monetarias por unidad de distancia [11]. El costo privado de operación CP_{opr} en cada modo de transporte depende en gran medida de la longitud de cada arco; no obstante, debe considerarse que en el modo de transporte carretero, e incluso en el modo de transporte ferroviario, el costo privado de operación cambia con las condiciones topográficas del arco y con la intensidad de utilización de los arcos.

Modelos más rigurosos especifican los costos de operación en función del volumen Q del arco, mediante la utilización de modelos de consumo de combustible que varían con la velocidad [8], [21] y que deben ser calibrados a partir de observaciones para distintas condiciones del sistema.

Sin embargo, en una perspectiva de decisiones del orden estratégico, se considera razonable trabajar con valores empíricos de los costos internos de operación en función de la longitud L y las características topográficas m de los arcos, tal como se indica a continuación:

$$CP_{opr} = Q \cdot f(L; m) \quad (4)$$

Costo de los accidentes

Son diversas las funciones de costo que han sido utilizadas para incorporar el efecto de la accidentalidad en la modelación del transporte. Efectuado el análisis de distintas funciones de costos a la luz de la información disponible, se juzga aceptable utilizar una adaptación del modelo de Lindberg [22], que aunque no es tan complejo como el modelo de Rizzi [23], permite una mejor especificación que las demás formulaciones estudiadas [8], [5], [11], [24], [25].

Para Lindberg [22], el costo total de la accidentalidad CT_{acc} es función del número de accidentes A , que, en realidad, puede ser visto como un vector que representa diferentes grados de severidad, y de ciertas variables como la disposición a pagar del individuo a , la de sus familiares y amigos b y el costo externo del sistema c , que se relaciona principalmente con los costos médicos y del sistema de seguridad social, tal como se indica en seguida:

$$CT_{acc} = A(a+b+c) \quad (5)$$

A su vez, el costo marginal total de la accidentalidad CMT_{acc} con respecto al volumen de tránsito Q se deduce a partir de la función de costo total; dado que A es una función del volumen de tránsito Q , se encuentra que

$$CMT_{acc} = \frac{\partial A}{\partial Q}(a+b+c) \quad (6)$$

Por tanto, es posible obtener el costo marginal externo CME_{acc} descontando el costo privado CMP_{acc} que es internalizado por el usuario:

$$CME_{acc} = CMT_{acc} - CMP_{acc} \quad (7)$$

Aunque podría utilizarse una función mucho más compleja, si se introduce $r=A/Q$ como el riesgo de accidente y $1-\theta$ como la parte del costo total del

accidente que recaee sobre los demás usuarios, se tiene que

$$CT_{acc} = Qr\theta (a+b) + Qr(1-\theta)[a+b+c] \quad (8)$$

Costos ambientales por polución

Aunque el cálculo de los costos producidos por la polución involucra habitualmente tres componentes: afectaciones a salud, vegetación y daños materiales [26], en este trabajo de investigación se utiliza un costo generalizado, puesto que no interesa acometer ese nivel de detalle. Mahmod [27] estudia varios enfoques de modelación de tráfico para estimar la cantidad de emisiones, y ha encontrado que en aplicaciones de gran escala (nacional o regional) es apropiado el uso de modelos como el MOBILE [28]; aunque también son considerados de interés modelos un poco más sencillos como el MODEM [29], que emplea la técnica de los factores de emisión [30], y establece un valor representativo de la cantidad de sustancia contaminante que se libera a la atmósfera con relación a la actividad asociada que la produce [31]. Siguiendo la línea del método de los factores de emisión, se plantea de manera general el modelo que se va a utilizar para estimar los costos de la polución del aire, CE_i , para cada una de las emisiones contaminantes, i , como se muestra en (9):

$$CE_i = Q(\beta_i \cdot FE_i) \cdot L \quad (9)$$

Donde Q representa el flujo vehicular, FE_i es el factor de emisión expresado en gramos por vehículo y por kilómetro, β_i incluye el costo monetario de la polución de cada emisión contaminante; a su vez, L es la longitud del arco evaluado.

El factor de emisión está relacionado con el consumo de combustible y puede ser estimado usando una ecuación cuadrática en función de la velocidad [21], [8]; aunque esta es una práctica que funciona mejor en el ámbito urbano, donde la congestión de los arcos produce variaciones apreciables de la velocidad y, en consecuencia, una mayor sensibilidad del consumo de combustible. La formulación propuesta puede ser utilizada de manera alternativa para estimar individualmente los costos producidos por la emisión de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂), conservando la misma forma

funcional y cambiando los factores de emisión y parámetros de costo para cada sustancia contaminante.

Los costos del cambio climático tienen un gran nivel de complejidad debido al hecho que su impacto es global y los patrones de riesgo son difíciles de anticipar [20]; sin embargo, dada la perspectiva de decisiones del modelo, se cree conveniente dar un tratamiento similar al de las emisiones contaminantes descritas en la sección anterior, donde las emisiones de CO₂ son estimadas en función del tipo de arco.

Costo por uso de la infraestructura

Los costos de mantenimiento de la infraestructura, como la repavimentación de carreteras o rehabilitación de ferrocarriles, son complejos de analizar con base en datos empíricos, ya que la información se toma normalmente con intervalos de tiempo muy grandes. Al utilizar observaciones de solo unos pocos años generalmente no se tienen suficientes datos para establecer la forma en que los costos varían con respecto al tráfico, lo que se traduce en una gran dificultad para establecer los costos marginales del uso de la infraestructura [32]. Sin embargo, es una práctica común que los costos del uso de la infraestructura sean equiparados a los costos medios de mantenimiento [8], razón por la cual el costo de la infraestructura se calcula como un costo medio que puede estar en función de la longitud y el número de carriles que representa cada arco.

$$CE_{\text{infr}} = f(L; N) \quad (10)$$

Donde L representa la longitud del arco y N el número de carriles.

Ahora, dado que según esta aproximación el costo no depende del flujo, el costo marginal por efecto de un vehículo adicional no puede ser calculado directamente, así que se utiliza la siguiente relación [8]:

$$CME_{\text{infr}} = f(L; N) \cdot \frac{t}{T} \quad (11)$$

Donde t es el tiempo de viaje de un vehículo adicional y T es el tiempo entre cada ciclo de mantenimiento.

4. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Se tomó como punto de partida el modelo estratégico de transporte de carga de la UTMT [2], que fue concebido a escala nacional, con una perspectiva de decisiones del orden estratégico; el modelo se ajustó particularmente en la implementación de las funciones de costo previamente descritas, estableciendo las interrelaciones claves en el modelo. La estructura secuencial del modelo se presenta en la figura 1:

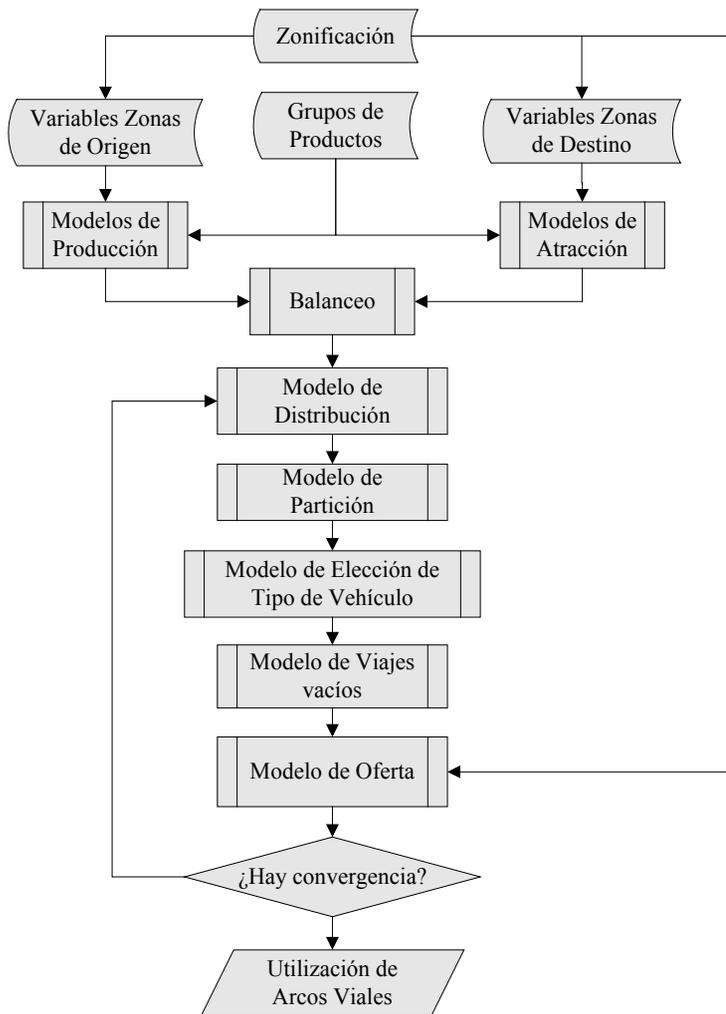


Figura 1. Modelo de transporte utilizado

Para abordar el análisis de la demanda de transporte se utilizó una división espacial de 70 zonas internas y 8 zonas externas; estas últimas para incluir los movimientos de carga que se puedan atraer o producir en Venezuela, Atlántico Sur, Pacífico Sur, Ecuador, Tokio, Costa Oeste de Estados Unidos, Costa Este de Estados Unidos y Róterdam. Los modelos de producción y consumo analizaron 34 grupos de productos: abonos y fertilizantes, aceites y grasas animales, productos de la industria de alimentos, alimentos para animales, arroz, azúcar, banano o plátano, cervezas y fermentados, gaseosas, biocombustibles, café, carbón, cementos y yeso, productos cerámicos, derivados del petróleo, ferróníquel, flores, frutas, excepto banano o plátano, ganado bovino y porcino, hierro y acero, leche, legumbres y hortalizas, madera, maíz, manufacturas diversas, otros productos, otras harinas, papa, papel y cartón, paquetes postales y envíos, petróleo crudo, sal, soya, trigo y vehículos. Los vectores de producción y de consumo se distribuyeron con modelos gravitatorios específicos, con los cuales se obtuvieron las matrices de transporte de carga.

La estimación de parámetros de las funciones de costo de la red estratégica de transporte de carga en Colombia se hizo con base en la revisión de información secundaria proveniente de varias fuentes. Dada la complejidad de la red carretera en comparación con las redes de los demás modos de transporte estudiados, la estimación de los parámetros utilizó la clasificación de 22 tipologías de tramos homogéneos adoptada por la UTMT [2]; esta categorización, en el caso de las carreteras de dos carriles, consta de tres clases de terreno, dos tipos de superficie y tres estados de la infraestructura, considerando una tipología única para los pasos urbanos [33].

En el modo de transporte fluvial no se utilizó ninguna clasificación de arcos, aunque para efectos de la modelación se consideró el convoy tipo de la cuenca del río Magdalena, el más importante del país. Un tratamiento similar se dio al modo de transporte ferroviario, en el cual no se incorporó directamente el efecto de la pendiente, pero se definió también un tren tipo para modelación; esta simplificación es razonable considerando que las líneas férreas en operación se encuentran sobre terreno plano.

Parámetros de los costos del tiempo de viaje y la congestión

Siguiendo a Fowkes *et al.* [34] se acotó el VOT por reducir medio día de viaje en un rango de 5 a 30% con respecto al costo del flete; de esta manera,

actualizando los fletes del modo de transporte carretero [35] con el índice de precios al consumidor IPC [36] y considerando el tiempo medio de recorrido para cada ruta se estimaron los valores 60 COL\$/hora/t, 210 COL\$/hora/t y 360 COL\$/hora/t para representar mercancías con costo de oportunidad: bajo, medio y alto respectivamente. A la fecha del estudio se tenía una tasa de cambio de 1US\$ = 1 850 COL\$.

Para evaluar la velocidad en el modo de transporte carretero se consideró un valor representativo para cada tipología de arco. Atendiendo a estudios previos, en el modo de transporte fluvial se utilizó una velocidad promedio de 17 km/h [33], en tanto que en el modo de transporte ferroviario se utilizó un rango de velocidad que fluctúa según las condiciones topográficas y el estado de la línea entre 25 y 50 km/h.

Con respecto a los parámetros de la función BPR, para la modelación se utilizaron valores globales de α y β para cada uno de los modos de transporte estudiados, obtenidos a partir de la experimentación bajo distintas condiciones, tratando de acercarse los flujos de transporte modelados a las observaciones de campo provenientes de las estaciones de conteo disponibles en el territorio nacional. En el modo carretero fueron utilizados los valores tradicionales de 0,15 y 4, que registraron un mejor desempeño que los valores propuestos por la UTMT [2]; en el modo de transporte fluvial se usaron parámetros de 0,02 y 16, para representar aquella situación crítica pero hipotética en la cual la demanda se acerca a la capacidad de los arcos de transporte del modo fluvial; para el modo de transporte ferroviario, los valores utilizados fueron 0,1 y 8.

Parámetros de los costos de operación

En el modo de transporte por carretera, el cálculo de los costos de operación se hizo con base en los datos consignados en la tabla 1, que contiene los costos variables de referencia para tres configuraciones de vehículos de carga por tipo de terreno, expresados en COL\$/km para el año 2005; el cálculo realizado no incluyó costos fijos como: seguros, salarios y prestaciones básicas, parqueadero, impuesto de rodamiento, recuperación de capital y gastos de administración.

Tabla 1

Costos de referencia del modo de transporte carretero en Colombia

Costo variable por kilómetro (COL\$/km del año 2005)	Configuración del vehículo		
	C2	C3	CS
Plano	905	1 087	1 582
Ondulado	1 092	1 197	1 776
Montañoso	1 381	1 381	2 099

En las demás redes de transporte estudiadas, el cálculo de los costos internos se hizo con base en los costos indicativos propuestos por Litman [37]; para el modo de transporte fluvial se utilizó el convoy típico de la cuenca del río Magdalena, que consta de un remolcador y 6 barcasas [33], y en cuanto al modo de transporte ferroviario, se tomó como referencia un tren tipo de una locomotora y 22 vagones [33]. Bajo esos supuestos se encontró en el modo de transporte fluvial un costo interno de 6 000 COL\$/km/convoy tipo y en el modo de transporte ferroviario un costo interno de 8 000 COL\$/km/tren tipo.

Parámetros del costo de la accidentalidad

- *El riesgo de accidente*

Según el Fondo de Prevención Vial de Colombia [38], tan solo 5 070 accidentes del modo de transporte carretero, es decir, el 2,7% del total, se presentan fuera de las zonas urbanas; de estos, 54,6% registran solo daños, 10,1% son accidentes con muertos y 35,3% con heridos. La misma fuente indica que los vehículos de transporte de carga participan en el 5,4% de los accidentes del modo de transporte carretero.

Tomando como referencia las cifras oficiales se encontró en 2005 un total de 271 accidentes de vehículos de transporte de carga por carretera, que representan un promedio de 0,07528 accidentes/hora, considerando un año de 300 días y un día de 12 horas. Dividiendo el número total de accidentes por hora entre la demanda total horaria de transporte de carga, que según el modelo estratégico es de 68 919 VEQ/hora [39], se encontró que el riesgo de accidente para los vehículos de transporte de carga por carretera es de $2,5 \times 10^{-9}$, con una proporción de accidentes fatales igual a

10,1%. Siguiendo el mismo análisis se estimó el riesgo de accidente para los modos de transporte fluvial y ferroviario, y se encontró los valores de $1,4836 \times 10^{-11}$ y $3,6090 \times 10^{-11}$, con proporción de accidentes fatales de 20,8 y 60,5% respectivamente.

- *El valor estadístico de la vida*

La correcta estimación del valor estadístico de la vida (VEV) para Colombia implicaría el desarrollo de un estudio específico en el que se determine la disposición a pagar por disminuir el riesgo de accidente; sin embargo, en virtud de los alcances de este trabajo de investigación y tomando en cuenta que no se encontraron referentes acerca del VEV en el país, se decidió utilizar como referencia el equivalente a €2 000 000 del año 2005, que al ser ajustado en función del producto interno bruto (PIB) por persona para Europa [40] y del PIB *per cápita* por paridad del poder adquisitivo en Colombia [41] se estimó el VEV para Colombia en COL\$ 1 366 200 000. A partir de esta valoración y manteniendo las mismas proporciones encontradas en el proyecto QUITS [12] con respecto al VEV en caso de muerte, se estimó el VEV para un accidente grave en COL\$ 59 196 124 y para un accidente leve en COL\$ 5 821 775.

Siguiendo las recomendaciones de Beuthe *et al.* [5], pero subrayando que cada caso de estudio en particular para cada modo y país debe tener sus propios valores, se tomó una proporción equivalente al 40% del VEV del usuario para estimar el VEV expresado por los familiares y amigos, y se calculó el costo externo del sistema como el 10% del valor especificado para cada grado de severidad, encontrando así las sumas de COL\$ 136 620 000 en accidentes fatales, COL\$ 5 919 612 en accidentes graves y COL\$ 582 177 en accidentes leves.

- *Porcentaje del costo que se internaliza*

El parámetro θ , que determina la parte del costo total del accidente que internaliza el individuo, tiene un límite inferior igual a 0, que se refiere a la situación en la que el individuo no internaliza ninguna parte del costo, y un límite superior igual a 1, en la que el individuo internaliza por completo el costo del accidente. En el país existe el seguro obligatorio contra accidentes de tránsito que cubre parcialmente los gastos hospitalarios derivados de

accidentes de tránsito, por lo cual es posible considerar un valor promedio del parámetro θ igual a 0,5.

Parámetros de los costos ambientales

- *Los factores de emisión*

Para el cálculo de los factores de emisión FE se tomó como referencia las estimaciones hechas por Manzi *et al.* [42] para la ciudad de Bogotá, que aunque provienen de la aplicación de un modelo urbano con baja participación de vehículos de transporte de carga, produjo valores significativos y con coeficientes de dispersión aceptables para esta clase de vehículos.

Al examinar las condiciones de tráfico imperantes en el estudio se encontró que el volumen total de 395 000 vehículos observados registró una velocidad promedio de 30 km/h, y por lo tanto, según las apreciaciones de los autores, los valores de FE reportados se consideran válidos para un rango entre 0 y 60 km/h [43]. Sin embargo, para incorporar una mayor variación en el modelo se decidió usar los factores obtenidos para caracterizar de manera directa los arcos localizados en terreno montañoso, que en el modelo estratégico tienen una velocidad media de 30,4 km/h, y se hizo su conversión a VEQ utilizando el factor de equivalencia de 3,53. Posteriormente se hizo el cálculo de los FE para cada tipo de terreno (tabla 2), con base en los consumos de combustible de la estructura de costos de operación de los vehículos de carga por configuración [43].

Tabla 2
Factores de emisión del modo de transporte carretero

Emisión	FE (g/km/VEQ)		
	Plano	Ondulado	Montañoso
CO	54,52	75,29	109,07
NO _x	2,69	3,72	5,38
SO ₂	0,42	0,59	0,85
CO ₂	180,00	248,56	360,06

En el modo de transporte fluvial se encontró que el consumo de combustible mensual es aproximadamente de 40 000 gal [44] con un rendimiento de 5,2

km/gal [45]. El cotejo de estos indicadores con los del modo de transporte carretero en terreno plano dio como resultado los siguientes FE para el modo de transporte fluvial: CO: 83,88 g/km/convoy tipo, NO_x: 4,14 g/km/convoy tipo, SO₂: 0,65 g/km/convoy tipo y CO₂: 276,92 g/km/convoy tipo.

En el caso del transporte ferroviario, se encontró que el material rodante utiliza en general combustible diesel [46], con excepción de Acerías Paz de Río, que opera el único ferrocarril eléctrico de carga del país [47], razón por la cual sus emisiones no son cubiertas por un inventario de fuentes móviles. Como no fue posible estimar las emisiones asociadas a los arcos de la red privada de Acerías Paz de Río, se optó por excluir del análisis los costos externos ambientales de estos 38 km de red ferroviaria. En los demás arcos de la red del modo de transporte ferroviario se utilizó información relativa a las locomotoras de arrastre, cuyas emisiones son estimadas en función de la cantidad de combustible quemado; las emisiones de las locomotoras de patio no fueron incluidas en el cálculo que se realizó. Estos fueron los FE encontrados para el modo de transporte ferroviario: CO: 602,3 g/km/tren tipo, NO_x: 29,8 g/km/tren tipo, SO₂: 4,7 g/km/tren tipo y CO₂: 1 988,5 g/km/tren tipo.

- *Parámetros de costo de las emisiones*

A partir de los cálculos hechos por Byatt *et al.* [48] se tomó como referencia inicial un promedio de 85 US\$/t-CO₂, cuantía que ellos mismos calificaron de elevada, puesto que la revisión de la experiencia de Australia, la Unión Europea, Estados Unidos, Canadá y Nueva Zelanda había sugerido valores distintos. Litman [37] sugiere utilizar valores del orden de 12,5 US\$/t-CO₂, aunque estudios más recientes presentan cuantías alrededor de 100 US\$/t-CO₂ [49]. Con respecto al costo de las demás emisiones también se encontró una gran variación de los valores propuestos; así que después de haber revisado distintas fuentes [49], [50] se decidió ajustar los valores propuestos por Litman [51], especialmente en cuanto al costo de CO₂, que se encontró subvalorado con respecto a las demás referencias, y se hallaron los resultados que se muestran en la tabla 3, expresados en COL\$/g para cada emisión contaminante.

Tabla 3
Parámetros de costo de las emisiones

Emisión	COL\$/g
CO	0,762
NO _x	19,625
SO ₂	23,541
CO ₂	0,063

Parámetros del costo de la infraestructura

El cálculo de los costos asociados a la infraestructura en el modo de transporte carretero tomó como base los costos anuales de mantenimiento por kilómetro consignados en el documento Conpes 3085 [52], cuyas cuantías originales fueron actualizadas según el IPC [36], y se encontró en promedio un costo de mantenimiento rutinario igual a $4,12 \times 10^6$ COL\$/km y un costo de mantenimiento periódico igual a $38,6 \times 10^6$ COL\$/km para el año 2005. Independientemente de la verdadera frecuencia con que se aplique cada una de estas labores de mantenimiento, el hecho de tener los costos definidos en COL\$/km/año permitió utilizar un tiempo de ciclo igual a 8 640 horas; de esta manera y con el ánimo de utilizar un solo parámetro de costo marginal para toda la red del modo de transporte carretero se calculó la velocidad promedio, y luego de aplicar la relación propuesta por Ozbay *et al.* [8] se encontró un valor de 27,65 COL\$/VEQ/km.

Siguiendo el mismo esquema de cálculo se encontró para el modo de transporte ferroviario un valor de 223 COL\$/tren tipo/km, que dadas las condiciones de explotación [52] es internalizado por los accionistas actuales, los cuales realizan bajo su cuenta y riesgo las inversiones para ampliar y mantener la red férrea concesionada que se encuentra en operación.

Por otra parte, se encontró que los principales proyectos de mantenimiento en los corredores fluviales más importantes están orientados al control de inundaciones y sedimentación, mantenimiento de las condiciones de navegabilidad y expansión de infraestructura portuaria [53]; de esta manera, las obras de dragado, que permiten recuperar las condiciones de navegabilidad de los ríos, no están relacionadas propiamente con el uso de la infraestructura fluvial por parte de las embarcaciones [54], sino que

se originan por el transporte y disposición de sedimentos que ocasiona la propia dinámica de los ríos; por esta razón se consideró que el daño marginal causado a la infraestructura por efecto de un convoy tipo puede ser desestimado sin incurrir en mayores errores de valoración, así que en el modo de transporte fluvial se supuso un costo marginal de mantenimiento igual a cero.

CONCLUSIONES

A través de este trabajo fueron estudiadas y analizadas las funciones de costos internos y externos utilizadas en la modelación del transporte de carga. Se encontró que es posible estimar empíricamente los parámetros de las funciones aplicables al transporte de carga interregional en Colombia en los modos de transporte carretero, ferroviario y fluvial, y con ellos, modelar los costos marginales sobre una red estratégica de transporte de carga.

El desarrollo de modelos involucrando costos externos es particularmente útil para la evaluación de políticas de transporte. Para la estimación de parámetros de las funciones de costos fue necesario transferir o adaptar valores ampliamente utilizados en la modelación estratégica de carga. El estudio se ubicó en un ámbito de decisiones del orden estratégico, que no se apoyó en información primaria de campo, así que se considera importante realizar otros estudios más detallados que permitan estimar parámetros “colombianos” acordes con la tipología y condiciones de operación de las vías del país; tener parámetros locales permitiría obtener estimaciones más precisas de los costos externos del transporte usando las formulaciones propuestas. Futuras investigaciones pueden orientarse a la obtención directa de parámetros propios, destacando entre estos el valor estadístico de la vida y el valor del tiempo para la carga.

REFERENCIAS

- [1] Cal & Mayor y Asociados, *Plan estratégico del transporte de carga en Colombia. Documento resumen*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte, 2002.
- [2] Unión Temporal Modelación del Transporte, *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 compe-*

tividad de los productos colombianos. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte, 2008.

- [3] R. Roson and K. Small, *Environment and Transport in Economic Modelling*. London: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [4] M. Janic, "Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network", *Transportation Research, Part D*, vol. 12, pp. 33-44, 2007.
- [5] M. Beuthe, F. Degrandt, J-F. Geerts, and B. Jourquin, "External costs of the Belgian interurban freight traffic: a network analysis of their internalisation", *Transportation Research, Part D*, vol. 7, pp. 285-301, 2002.
- [6] P. Nijkamp, A. Reggiani, and W.F. Tsang, "Comparative modelling of interregional transport flows: Applications to multimodal European freight transport", *European Journal of Operational Research*, vol. 155, pp. 584-602, 2004.
- [7] D. Forkenbrock, "Comparison of External Costs of Rail and Truck Freight Transport", *Transportation Research, Part A*, vol. 35, pp. 321-337, May 2001.
- [8] K. Ozbay, B. Bartin, O. Yanmaz-Tuzel, and J. Berechman, "Alternative methods for estimating full marginal costs of highway transportation", *Transportation Research, Part A*, vol. 41, pp. 768-786, 2007.
- [9] M. Piecyk and A.C. McKinnon, *Internalising the External Costs of Road Freight Transport in the UK*. Heriot-Watt University: Logistics Research Centre School of Management and Languages, 2007.
- [10] K. Button, *Transport Economics*, 3rd ed. Cheltenham: Edward Elgard, 2010.
- [11] ISIS *et al.*, *QUITS, Quality Indicators for Transport Systems, Final Report for Publication*, Contract n° ST-96-SC-115, project funded in part by THE EUROPEAN COMMISSION - DGVII under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, Rome, April 1998.
- [12] INFRAS, *External cost of transport, Update Study. Final Report*, Zurich/Karlsruhe, October 2004.
- [13] J.E. Fernández, J. De Cea, and A. Soto, "A multimodal supply-demand equilibrium model for predicting intercity freight flows", *Transportation Research, Part B*, vol. 37, pp. 615-640, 2003.
- [14] D. Branston, "Link Capacity Functions: A Review", *Transportation Research*, vol. 10, pp. 223-236, 1976.
- [15] K. B. Davidson, "A flow travel time relationship for use in transportation planning", *Australian Road Research Board*, vol. 3, pp. 183-194, 1966.
- [16] H. Spiess, "Conical Volume-Delay Functions", *Transportation Science*, vol. 24, pp. 153-158, 1990.
- [17] National Research Council, *Transportation Research Board, 2000 Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board National Research Council, 2000.
- [18] Caliper Corporation, *Travel demand modeling with TransCAD 4.8*, Newton, Massachusetts, 2005.

- [19] C. Doll, UNITE, *Case Studies 7A to 7D - Inter-urban road and rail user costs UNITE. (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency)*, working funded by 5th Framework RTD Programme, ITS, University of Leeds, Karlsruhe, 2002.
- [20] M. Maibach, *Handbook on estimation of external costs in the transport sector*, produced within the study Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT), 2008.
- [21] J. B. Odoki and H. G. R. Kerali, *Highway Development & Management HDM-4*, vol. 4, Analytical Framework and Model Descriptions: Part F. World Road Association, 2000.
- [22] G. Lindberg, *Deliverable 9: Accident Cost Case Studies, Case Study 8d: External Accident Cost of Heavy Goods Vehicles (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency) Deliverable 9*, funded by 5th framework RTD programme, ITS, 2002.
- [23] L. I. Rizzi, "Diseño de instrumentos económicos para la internalización de externalidades de accidentes de tránsito", *Cuadernos de Economía*, vol. 42, pp. 283-305, 2005.
- [24] Departamento Nacional de Planeación (DNP), *Asesoría para formular una política para desarrollar la evaluación económica de proyectos de transporte urbano de pasajeros en Colombia. Informe n° 3. Identificación de Opciones, Recomendación y Diseño* (primer volumen). Bogotá: Unión Temporal Universidad de los Andes e Instituto Ser de Investigación, 2003.
- [25] Federal Highway Administration (FHWA), *Highway cost responsibility*, [Available on line]: <http://www.fhwa.dot.gov/policy/hcas/final/five.htm>, [Accessed: November 11 2008].
- [26] J. Murphy and M. Delucchi, *A Review of the Literature on the Social Cost of Motor Vehicle Use in the United States*, Institute of Transportation Studies. University of California, Davis. Paper UCD-ITS-REP-98-22, 1998.
- [27] M. Mahmud, *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, 2008.
- [28] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *User's Guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2: Mobile Source Emission Factor Model*, 2002.
- [29] M. Osses, *Modelo de emisiones vehiculares MODEM*, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago, Chile : Universidad de Chile, Unidad de Medio Ambiente y Energía SECTRA, 2002.
- [30] EEA, *EMEP/CORINAIR Emissions Inventory Guidebook*, 3rd ed., september 2003 update, Technical report n° 30, 2003.
- [31] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), *Summary of emission factors*, available on line: <http://www.epa.gov> [Accessed: September 10, 2008].
- [32] H. Link and J. E. Nilsson, "Measuring the Marginal Social Cost of Transport", *Research in Transportation Economics*, vol. 14, pp. 49-83, 2005.

- [33] L. Márquez, *Modelo de oferta de transporte para Colombia: Calibración y Asignación*. Unión Temporal Modelación de Transporte. Bogotá: Ministerio de Transporte, 2008.
- [34] A. S. Fowkes, C.A. Nash, and G. Tweddle, *Valuing the attributes of freight transport quality: Results of the stated preference survey*. ITS working paper 276. Leeds, Yorkshire, UK: University of Leeds, Institute for Transport Studies, 1989.
- [35] Ministerio de Transporte, *Anuario Estadístico de Transporte 2006*, Bogotá, Colombia: Oficina de Planeación, Grupo de Planeación Sectorial, 2007.
- [36] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), *Variación del índice de precios al consumidor IPC en Colombia 1993 - 2008*, [Documento en línea]: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/ipc/dic08/IPC_Variacion.xls [Consultado: Marzo 16, 2009].
- [37] T. Litman, *Transportation Cost Analysis: Techniques, Estimates and Implications*. Canada: Victoria Transport Policy Institute, 2002.
- [38] Fondo de Prevención Vial, *Informe de Accidentalidad 2005*. Bogotá, 2005.
- [39] L. Márquez, *Matrices Origen - Destino I*. Unión Temporal Modelación de Transporte. Bogotá: Ministerio de Transporte, 2008.
- [40] Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), Table 2. Breakdown of GDP per capita in its components, [Available on line]: <http://www.oecd.org/dataoecd/30/40/29867116.xls>. [Accessed, March 8, 2006]
- [41] M. Barrientos, *Colombia - Producto Interno Bruto (PIB) per capita (US\$)*, [Documento en línea]: <http://www.indexmundi.com/g/g.aspx?c=co&v=67&l=es> [Consultado: Mayo 19, 2009].
- [42] V. Manzi, L.C. Belalcázar, E. Giraldo, E. Zárate, y A. Clappier, "Estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles en la ciudad de Bogotá", *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, vol. 18, pp. 18-25, 2003.
- [43] G. J. Pérez, *La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia*, Documentos de trabajo sobre economía regional, n° 64. Bogotá: Banco de la República, 2005, p. 70.
- [44] M. Pardo, V. Manotas, H. Campanella y J. Páez, "Método de medición de combustible en una embarcación fluvial", revista *Ingeniería y Ciencia*, vol. 2, pp. 5-27, 2006.
- [45] Ministerio de Transporte, *Metodologías tarifarias del transporte fluvial en Colombia: Análisis conceptual*. Bogotá: Oficina de Regulación Económica, 2006.
- [46] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), *Manual de inventario de fuentes difusas*. Disponible en línea: www1.minambiente.gov.co/prensa/banner_home/proyectos_en_tramite/inventario_emisiones/4_fuentesfijasdifusas.doc. [Consulta: 8 de marzo de 2008].

- [47] ISA, *Información del sector eléctrico colombiano*. Número 94, 19 de marzo - 25 de marzo. Disponible en: http://www2.isa.com.co/gmem/servicios_informacion/servicios_virtuales/capitulo3/isacom/Fr94_25/ISA.htm. [Consulta: 8 de marzo de 2008].
- [48] I. Byatt *et al.*, "The Stern Review: A Dual Critique. Part II: Economics Aspects", *World Economics*, vol. 7, pp. 199-229, 2006.
- [49] J. Brainard *et al.*, "The social value of carbon sequestered in Great Britain's woodlands", *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 1257-1267, 2009.
- [50] J. Munksgaard *et al.*, "An environmental performance index for products reflecting damage costs", *Ecological Economics*, vol. 64, pp. 119-130, 2007.
- [51] T. Litman, *Air Pollution Costs Spreadsheet*. Available on line: www.vtppi.org/airpollution.xls. 2006
- [52] Departamento Nacional de Planeación (DNP), *Documento CONPES 3085. Plan de expansión de la red nacional de carreteras* (versión aprobada). Bogotá: DNP: UINFE-DITRAN, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, 2000.
- [53] J. A. Arias *et al.*, *Desarrollo de las concesiones férreas en Colombia*. Bogotá: Contraloría General de la República, Sector infraestructura física y telecomunicaciones, comercio exterior y desarrollo regional, 2007.
- [54] Corporación Autónoma del Río Grande de la Magdalena (CORMAGDALENA), *Mantenimiento del canal del Dique, estudios y documentos previos*. Bogotá, 2008.