

Funciones de costos internos y externos en un modelo estratégico de transporte de carga

Internal and External Functions Costs in a Model of Strategic Freight Transportation

Luis Gabriel Márquez Díaz*

Resumen

Se revisan las funciones de costos internos y externos, con fines de modelación estratégica del transporte de carga. Se estudian el costo interno del tiempo, el costo interno de operación y cinco componentes del costo externo: costo externo de la congestión, costo externo de los accidentes, costos de la polución del aire, costo del cambio climático y costo externo de la infraestructura; a partir de estos se deriva la función de costo marginal total. Se encuentra que es posible estimar de forma empírica 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 estudiar los costos marginales sobre una red estratégica de transporte de carga.

Palabras clave: modelación del transporte, transporte de carga, costos externos del transporte.

Abstract

This paper reviews the internal and external functions costs for modelling strategic freight. It studies the time cost and operating cost, besides five external costs components, namely external cost of congestion, external cost of accidents, costs of air pollution, cost of greenhouse effect and external cost of infrastructure; from them the total marginal cost function, is derived. It is found that it is possible to estimate, empirically, the parameters of the freight transport functions in an interregional network of Colombia, including transport modes road, rail and river, and with them to consider the marginal costs of a strategic network of freight transportation.

Key words: transport modelling, freight transportation, transportation external costs.

* Docente - Investigador, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte GIDPOT. Correo electrónico: luis.marquez@uptc.edu.co

I. Introducción

Normalmente los costos totales del transporte son separados en costos internos y costos externos. Los primeros, también llamados costos privados o costos directos, incluyen los costos que los usuarios perciben directamente, como ocurre con los costos de operación y el costo del tiempo. Los costos externos, también denominados costos sociales o costos indirectos, se refieren a aquellos que no son asumidos de manera directa por los usuarios, tales como: costos de los accidentes, costos de polución, costos de la congestión impuesta a otros usuarios y, en ciertos casos, costos del uso de la infraestructura [1].

En términos generales, el costo total (CT), que caracteriza cada uno de los arcos de transporte en una red estratégica de transporte de carga puede expresarse como sigue:

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

Donde CP_t se refiere al costo privado asociado con el valor del tiempo consumido, CP_{opr} corresponde al costo interno de operación y CE representa los costos de las externalidades consideradas.

Los dos ítems del costo interno son tratados en este artículo, más cinco componentes del costo externo: costo externo de la congestión, costo externo de los accidentes, costos de la polución del aire, costo del cambio climático y costo externo de la infraestructura; a partir de estos se deriva el costo marginal total, CMT .

Otros costos, como el del ruido y el de la afectación del paisaje, que podrían representar cerca del 10% de los costos externos [2,3], no han sido incluidos, puesto que se encuentran fuera del alcance establecido.

II. 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, con base en la función de

desempeño de los arcos, la cual es simplemente una descripción matemática de la relación entre el tiempo y el flujo del arco. Aunque diferentes formulaciones han sido sugeridas [4-7], la función BPR, de la *Bureau of Public Roads*, es una de las más usadas para actualizar los costos sobre la red de transporte.

De acuerdo con la función 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_0 ; el volumen Q , expresado en VEQ sobre el arco por unidad de tiempo; la capacidad del arco C , dada en las mismas unidades en que se expresa el volumen; el valor del tiempo VOT , en unidades monetarias por unidad de tiempo, y los parámetros de calibración α y β , que usualmente han sido fijados en 0,15 y 4,0 respectivamente [8].

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

Este costo es internalizado por los usuarios; por lo tanto, el costo medio del tiempo de desplazamiento CMP_t puede expresarse, para cierto nivel de flujo Q , así:

$$CMP_t = VOT \cdot \frac{L}{V_0} \left[1 + \alpha \left(\frac{Q}{C} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

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 [9], 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 [10]. En este caso, como la relación flujo–demora es del tipo BPR, el cálculo del costo marginal de la congestión CME_{cong} sobre cada arco se hace tal como se muestra enseguida, manteniendo la misma especificación de las variables ya referidas. Este término es la externalidad o costo por congestión, es decir, el costo adicional causado a cada usuario por un VEQ adicional en el sistema.

$$CME_{cong} = \alpha \cdot \beta \cdot VOT \cdot \frac{L}{V_0} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^\beta \quad (4)$$

III. Costo interno de operación

Los costos internos de operación, normalmente, están relacionados con el costo del combustible, el pago de peajes –que es usado de forma habitual como un mecanismo de internalización– y demás costos percibidos por los individuos, los cuales deben expresarse con fines de modelación en unidades monetarias por unidad de distancia [2].

El costo privado de operación CP_{opr} en cada modo de transporte depende en gran medida de la longitud de cada arco, aunque adicionalmente, en el modo de transporte carretero e incluso en el ferroviario, el costo privado de operación cambia con las condiciones topográficas del arco y con la intensidad de utilización de los arcos. De hecho, esquemas un poco más refinados especifican los costos de operación en función del volumen Q que demanda cada arco, mediante la utilización de modelos de consumo de combustible que varían con la velocidad [1], [11] y que deben ser calibrados a partir de observaciones sistemáticas para distintas condiciones del sistema.

Sin embargo, desde 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.

$$CP_{opr} = Q \cdot f(L; m) \quad (5)$$

Y en consecuencia, el costo medio de operación CMP_{opr} se calcula así:

$$CMP_{opr} = f(L; m) \quad (6)$$

IV. 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 la referencia 12, que aunque no es tan complejo como el modelo de la referencia 13, permite una mejor especificación que las demás formulaciones estudiadas [1], [2], [14], [15], [16].

En la referencia 12 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 expone enseguida.

$$CT_{acc} = A(a + b + c) \quad (7)$$

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; como se entiende que A es una función del volumen de tránsito Q se encuentra que,

$$CMT_{acc} = \frac{\partial A}{\partial Q} (a + b + c) \quad (8)$$

Y a partir de esta se obtiene el costo marginal externo CME_{acc} descontando el costo privado CMP_{acc} , que es internalizado por el usuario.

$$CME_{acc} = CM_{acc} - CMP_{acc} \quad (9)$$

Aunque podría utilizarse una función mucho más compleja, si se introduce r como el riesgo de accidente y $1-\epsilon$ como la parte del costo total del accidente que recae sobre los demás usuarios, se tiene que:

$$r = \frac{A}{Q} \quad (10)$$

$$CT_{acc} = Qr\theta(a+b) + Qr[(1-\theta)(a+b)+c] \quad (11)$$

Donde los dos sumandos de la ecuación representan, en su orden, el costo interno y externo; así, al derivar cada uno de ellos en función del volumen se encuentra:

$$CMP_{acc} = r\theta(a+b) \quad (12)$$

$$CME_{acc} = r(1-\theta)(a+b) + rc \quad (13)$$

En este caso, a diferencia de las consideraciones ya estudiadas [12], se ha planteado que la elasticidad-riesgo del accidente es igual a cero, es decir, que el incremento en el número de accidentes por cada arco es directamente proporcional al incremento del flujo.

V. Costos ambientales

Los efectos ambientales producidos por el transporte se clasifican en: polución del aire, cambio climático, ruido, impactos sobre la naturaleza y el paisaje, deterioro del agua y el suelo, efectos asociados con la producción de electricidad y otros efectos, como la intrusión visual en las ciudades [17]. Este trabajo de investigación únicamente estudió los costos de los dos primeros efectos ambientales señalados: el costo de la polución del aire, que tiene efecto local, y el costo del cambio climático, que tiene efecto global.

Pese a que el cálculo de los costos producidos por la polución involucra tres componentes (salud, vegetación y daños materiales) [18], en el presente trabajo de investigación se utiliza un costo generalizado, puesto que no interesa acometer ese nivel de detalle. La referencia 19 estudió varios enfoques de modelación de tráfico para estimar la cantidad de emisiones, y encontró que en aplicaciones de gran escala (nacional o regional) es apropiado el uso de modelos como el *Mobile*, aunque también son considerados modelos un poco más sencillos como el *Modem* [20], que emplea la técnica de los factores de emisión [21], al establecer un valor representativo de la cantidad de sustancia contaminante que se libera a la atmósfera con relación a la actividad asociada que la produce.

Al seguir la línea del método de los factores de emisión se plantea, de manera general, el modelo por utilizar para estimar los costos de la polución del aire CE_i para cada una de las emisiones contaminantes i .

$$CE_i = Q(\beta_i \cdot FE_i) \cdot L \quad (14)$$

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 y L representa la longitud de cada arco.

El factor de emisión está relacionado con el consumo de combustible y puede ser estimado usando una ecuación cuadrática en función de la velocidad [1], [11], 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. En un modelo regional, en cambio, las variaciones de la velocidad en función de los flujos vehiculares son pequeñas [22], y se encuentra que los cambios en las tasas de consumo de combustible son más sensibles al efecto de la pendiente, con incrementos que pueden llegar hasta del 100% al pasar de terreno plano a montañoso [23]. En ese orden de ideas, se considera más apropiado utilizar un factor de emisión empírico en función del tipo de arco, en lugar de subordinar las emisiones contaminantes a las variaciones de velocidad generadas por el modelo. El costo marginal se deriva entonces de la función de costo total así:

$$CME_i = \beta_i \cdot FE_i \cdot L \quad (15)$$

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 (SO_2), conservando la misma forma funcional y cambiando los Factores de Emisión (FE) y parámetros de costo para cada sustancia contaminante.

Los costos del cambio climático tienen un gran nivel de complejidad, debido a que su impacto es global y

los patrones de riesgo son difíciles de anticipar [10], 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. Conforme a lo anterior, la estimación de los costos del cambio climático puede hacerse como se muestra enseguida.

$$CE_{CO_2} = Q(\beta_{CO_2} \cdot FE_{CO_2}) \cdot L \quad (16)$$

$$CME_{CO_2} = \beta_{CO_2} \cdot FE_{CO_2} \cdot L \quad (17)$$

Donde Q representa el flujo vehicular; FE_{CO_2} el factor de emisión de CO₂ por tipo de arco, y β_{CO_2} incluye el costo monetario de las emisiones de dióxido de carbono.

VI. Costo de 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 con intervalos de tiempo muy grandes, y utilizar observaciones de solo unos pocos años es insuficiente para establecer la forma en que los costos varían con respecto al tráfico, lo que se traduce en una gran dificultad para determinar los costos marginales del uso de la infraestructura [24].

Sin embargo, es común que los costos del uso de la infraestructura sean equiparados a los costos medios de mantenimiento [1], por esa razón 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.

$$CE_{inf r} = f(L; N) \quad (18)$$

Donde L representa la longitud del arco y N el número de carriles. 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 siguiente relación [1]:

$$CME_{inf r} = f(L; N) \cdot \frac{t}{T} \quad (19)$$

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

VII. Valores de referencia

La cuantificación de los costos para el transporte de carga es un problema que ha sido abordado por varios investigadores. De acuerdo con la referencia 25, los costos internos comparativos de cada uno de los modos de transporte que se abordan en este trabajo de investigación, expresados en centavos de dólar por tonelada-milla, son: fluvial, 0,97; ferroviario, 2,53, y carretero, 5,35; es decir, con base en los cálculos hechos por Litman [25], el costo interno del transporte ferroviario casi triplica los costos del transporte acuático, mientras que el costo interno del transporte por carretera es 5,5 veces mayor que los costos de transporte fluvial.

Según la referencia 26, los costos externos del transporte de carga, expresados en centavos de dólar canadiense por t-km para 1994, presentan un promedio de 2,15 para camiones interurbanos y 0,51 para un sistema de transporte por tren; en este caso, el costo externo del camión medio es 4,2 veces mayor que el costo externo de un tren tipo; no obstante, de acuerdo con los cálculos hechos en Australia [27], la relación de costos externos entre estos dos modos de transporte es de 1,57.

Con respecto al costo externo de la accidentalidad, algunos autores proponen una ponderación de 1 a 11 para los costos por carretera y por ferrocarril [27]; en el caso chileno, incluyendo los costos de la disposición al pago, daños materiales y costos de agentes terceros, se determinó que el costo externo de accidentes viales en Chile en el año 2004 es de \$3,9 por vehículo-kilómetro [13]; de otra parte, la referencia 25 indica que el costo de la accidentalidad para el caso rural es del orden de 0,2 dólares por vehículo-milla. De manera más específica, la referencia 14 considera que la proporción del VEV expresado por los familiares y amigos con respecto al VEV del usuario es del orden del 40%; en cuanto

a los riesgos de accidente, se han encontrado valores que oscilan entre 1.12387×10^{-9} y 6.90807×10^{-9} en el modo de transporte carretero.

Los costos de la polución del aire son estimados, generalmente, multiplicando el costo unitario por la cantidad de contaminante emitido por vehículo, los mayores contaminantes son el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x); se ha encontrado que las emisiones de CO, dadas en libras por tonelada-milla, son: 0,20 en fluvial, 0,64 en ferroviario y 1,90 en el modo de transporte carretero [25]; además, expresa que las emisiones de NO_x son 0,53, 1,83 y 10,17, respectivamente; en el caso de los viajes rurales, estimó que el costo externo de la polución para un vehículo de combustible diésel es de 0,07 dólares por vehículo-milla.

De acuerdo con algunos estudios [16], los componentes del costo marginal del transporte de carga por carretera, expresados en centavos de dólar por milla, son: congestión, 3,27; accidentes, 0,47; ruido, 0,11, y pavimento, 5,6. En este caso los costos de la polución del aire están por determinar y se observa gran importancia de los costos marginales de la infraestructura. De otra parte, se reconoce que los costos del uso de la infraestructura, incluyendo los servicios de tráfico, son del orden de 0,47 dólares por vehículo-milla [25].

Si bien son válidos como referencia, se encuentra que son heterogéneos los valores usados en distintos países para caracterizar los costos internos y externos, así como las proporciones existentes entre los costos de cada modo de transporte estudiado. En el caso especial de los costos marginales, los promedios obtenidos dependen no sólo de la carga transportada, puesto que el índice se expresa por unidad de peso, sino de la longitud de los recorridos en las rutas estudiadas; de hecho, los costos marginales para cada par origen-destino (OD) pueden ser distintos entre sí.

En Colombia, el Ministerio de Transporte [28] maneja unos indicadores de costos internos de operación del transporte de carga por carretera, expresados en \$/km para el año 2004, según los cuales un camión de tipo C2 en terreno plano tiene un costo

de 884,5 \$/km. El costo expresado en \$/t-km está determinado por la relación entre el costo de operación y la distancia entre un origen y un destino determinados; para el primer trimestre de 2003 el costo representativo promedio por tonelada y kilómetro para vehículos C2 es de 251.09, para los vehículos C3 es de 218,68, y para los vehículos tractocamión CS es de 129,36.

VIII. Conclusiones

Con el presente trabajo de investigación se estudiaron y analizaron las funciones de costos internos y externos utilizadas en la modelación del transporte de carga. Se encuentra que es posible estimar de forma empírica los parámetros de las funciones aplicables al transporte de carga interregional en Colombia en los modos de transporte carretero, ferroviario y fluvial, y con esto estudiar los costos marginales sobre una red estratégica de transporte de carga.

Referencias bibliográficas

- [1] K. Ozbay, B. Bartin, O. Yanmaz-Tuzel and J. Berechman. "Alternative methods for estimating full marginal costs of highway transportation". *Transportation Research Part A* 41 (2007): 768-786.
- [2] 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.
- [3] INFRAS. *External cost of transport, Update Study*. Final Report, Zurich/Karlsruhe, October 2004.
- [4] D. Branston. "Link Capacity Functions: A Review". *Transportation Research*, 10, 223-236, 1976.
- [5] K. B. Davidson. "A flow travel time relationship for use in transportation planning". *Australian Road Research Board* 3, 183-194, 1966.
- [6] H. Spiess. "Conical Volume-Delay Functions". *Transportation Science* 24, 153-158, 1990.

- [7] National Research Council. *Transportation Research Board. 2000 Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board National Research Council, 2000.
- [8] Caliper Corporation. *Travel Demand Modeling with TransCAD 4.8*. Newton, Massachusetts. September 2005.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] L. I. Rizzi. "Diseño de instrumentos económicos para la internalización de externalidades de accidentes de tránsito". *Cuadernos de Economía*, Vol. 42 (noviembre, 2005), Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [14] M. Beuthe *et al.* "External costs of the Belgian interurban freight traffic: a network analysis of their internalisation". *Transportation Research Part D* 7 (2002) 285–301. www.elsevier.com.
- [15] Departamento Nacional de Planeación (DNP). *Documento CONPES 3085. Plan de expansión de la red nacional de carreteras*. DNP: UINFE-DITRAN, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías. Versión aprobada, 2000.
- [16] Federal Highway Administration (FHWA). *Highway cost responsibility*. 2000 [Available on line]: <<http://www.fhwa.dot.gov/policy/hcas/final/five.htm>>. [Reference: 11-11-2008]
- [17] P. Bickel *et al.* "Introducing Environmental Externalities into Transport Pricing: Measurement and Implications". *Transport Reviews*, Vol. 26, N.º 4, 389–415, July 2006 0144-1647 print/1464-5327 online/06/040389-27 © 2006 Taylor & Francis DOI: 10.1080/01441640600602039.
- [18] 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.
- [19] M. Mahmood. *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.
- [20] M. Osses. *Modelo de emisiones vehiculares MODEM*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile. Unidad de Medio Ambiente y Energía SECTRA, Santiago, Chile, 2002.
- [21] EEA. EMEP/CORINAIR *Emissions Inventory Guidebook*. 3rd edition. September 2003 update. Technical report N.º 30.
- [22] Unión Temporal Modelación del Transporte (UTMT). *Informe final de la 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"*, 2008.
- [23] G. J. Pérez. *La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia*. Documentos de trabajo sobre economía regional N.º 64, octubre 2005. Banco de la República.
- [24] H. Link and J. E. Nilsson. "Measuring the Marginal Social Cost of Transport". *Research in Transportation Economics*. Vol. 14, 2005, pp. 49-83.
- [25] T. Litman. *Transportation Cost Analysis: Techniques, Estimates and Implications*. Victoria Transport Policy Institute. June 2002.

- [26] Transport Concepts. *External Costs of Truck and Train*, Brotherhood of Maintenance of Way Employees (Ottawa), 1994.
- [27] D. Gargett, D. Mitchell and L. Martin. *Competitive Neutrality Between Road and Rail*, Bureau of Transport Economics, Australia [Available online]: www.dotrs.gov.au/programas/bte/btehome.htm, 1999.
- [28] Ministerio de Transporte. *Diagnóstico del sector transporte*. Grupo de Planeación Sectorial de la Oficina Asesora de Planeación, 2006.

Fecha de recepción: 23 de octubre de 2007
Fecha de aprobación: 30 de mayo de 2008