

OPTIMIZACIÓN DE UNA RED DE TRANSPORTE COMBINADO PARA LA EXPORTACIÓN DEL CARBÓN DEL INTERIOR DE COLOMBIA

LUIS GABRIEL MÁRQUEZ

RESUMEN

Se estudia una red de transporte combinado en Colombia, con horizonte en el año 2019, con el propósito de identificar las rutas óptimas del carbón desde los distritos de producción localizados en el interior del país hasta los puertos marítimos de exportación. La metodología utilizada se basa en la búsqueda de solución a un problema de flujo de mínimo costo que considera la red de transporte por carretera, la fluvial y ferroviaria, en un modelo que contiene 34.000 km de red representados en 1.864 arcos. El modelo considera nuevas infraestructuras ferroviarias y portuarias y sugiere que se deben transportar los carbones del interior del país por el puerto de Barranquilla mediante estrategias de integración ferroviaria-fluvial y carretera-fluvial. Se resalta la importancia del río Magdalena como infraestructura estratégica de transporte y se identifican tres centros de transferencia de carga localizados en Barrancabermeja, Bocas del Carare y Capulco, que en conjunto llegarían a manejar 18 millones de toneladas de carbón al año.

PALABRAS CLAVE: transporte de carbón; red de transporte combinado; flujo de mínimo costo; optimización de redes.

OPTIMIZATION OF A COMBINED EXPORT COAL TRANSPORT NETWORK FROM THE INTERIOR OF COLOMBIA

ABSTRACT

A combined transport network is studied with planning perspective in 2019, in order to identify optimal routes for transporting coal from centrally located sites within Colombia to export ports. Methodology based on the solution to minimum cost flow problem is used, including transport networks: road, river and railway, in a

* Ingeniero en Transporte y Vías, Magíster en Ingeniería con énfasis en Transporte, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Docente del Programa de Ingeniería en Transporte y Vías e integrante del Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte (GIDPOT), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. luis.marquez@uptc.edu.co

model composed of 34.000 km represented in 1.864 links. Both new rail and new export port infrastructure are included in the model. Model indicates centrally located coal within Colombia must be transported through the port of Barranquilla, using integration strategies, such as rail-river and road-river. The importance of the Magdalena River as strategic transport infrastructure is highlighted and three cargo transfer centers are identified near Barrancabermeja, Bocas del Carare and Capulco, which together could handle 18 million tons of coal per year.

KEY WORDS: coal transportation; combined transport network; minimum cost flow; network optimization.

OTIMIZAÇÃO DE UMA REDE DE TRANSPORTE COMBINADO PARA A EXPORTAÇÃO DO CARVÃO DO INTERIOR DA COLÔMBIA

RESUMO

Estuda-se uma rede de transporte combinado na Colômbia, com horizonte no ano 2019, com o propósito de identificar as rotas ótimas do carvão desde os distritos de produção localizados no interior do país até os portos marítimos de exportação. A metodologia utilizada baseia-se na busca de solução a um problema de fluxo de mínimo custo que considera as redes de transporte rodoviária, fluvial e ferroviária, em um modelo que contém 34.000 km de rede representados em 1.864 arcos. O modelo considera novas infraestruturas ferroviárias e portuárias e sugere que se devem transportar os carvões do interior do país pelo porto de Barranquilla mediante estratégias de integração ferroviária-fluvial e rodoviária-fluvial. Ressalta-se a importância do rio Magdalena como infraestrutura estratégica de transporte e identificam-se três centros de transferência de mercadorias localizados em Barrancabermeja, Bocas del Carare e Capulco, que em conjunto chegariam a manejar 18 milhões de toneladas de carvão ao ano.

PALAVRAS-CHAVE: transporte de carvão; rede de transporte combinado; fluxo de mínimo custo; otimização de redes.

1. INTRODUCCIÓN

Entre todos los productos mineros colombianos, el carbón es el mineral de mayor volumen de exportación y, en consecuencia, es el que demanda la mayor actividad transportadora. En relación con la producción minera nacional, durante los años 1990 a 2010, el carbón ha presentado incrementos constantes, llegando al valor más alto en el año 2008 con 73,5 millones de toneladas (UPME, 2011). Esta dinámica ha ubicado al país como el cuarto mayor exportador y el noveno productor mundial, siendo el primero en Latinoamérica.

Colombia cuenta con un potencial de recursos y reservas calculado de 16.993 millones de toneladas

(UPME, 2006), distribuidas en todo el territorio nacional, siendo las zonas carboníferas de La Guajira y Cesar las más conocidas y con mayor potencial de carbones térmicos tipo exportación, además de exhibir unos costos de producción, transporte y embarque que las hace altamente competitivas con respecto a países como Venezuela, Estados Unidos, Sudáfrica y Australia. En el interior del país sobresalen las zonas carboníferas de Norte de Santander, Cundinamarca y Boyacá, con grandes reservas de carbón metalúrgico y térmico para el consumo nacional y de exportación, pero con una infraestructura de transporte precaria (Cantillo, 2008), que no hace viable la movilización de grandes volúmenes con destino al mercado internacional.



Algunos autores afirman que Colombia cuenta con reservas probadas de carbón por un lapso de 46 años contados a partir del año 2010 (Franco, Gallo y Franco, 2010); sin embargo, el Gobierno Nacional espera que, de mantenerse la tasa de explotación actual, las reservas de carbón en Colombia aseguren la producción por más de 100 años (UPME, 2011). Cualquiera que fuese la estimación correcta, es posible colegir que será una tarea de gran importancia estudiar la forma de optimizar el transporte de carbón en Colombia, especialmente con miras a la exportación del que se produce en las regiones del interior del país, cuyo potencial no ha sido aprovechado, porque las infraestructuras existentes no ofrecen la capacidad necesaria para el transporte del mineral en grandes volúmenes.

Debido a las precarias condiciones de la infraestructura del interior del país, el Gobierno Nacional, en su interés por hacer viable el transporte de los carbones de Boyacá y Cundinamarca hacia los mercados internacionales, ha considerado seriamente la posibilidad de construir infraestructuras de transporte ferroviario, como el ferrocarril del Carare (UPME, 2007), el sistema ferroviario central (CONPES, 2008) y nuevos puertos marítimos como Puerto Brisa (Fenalcarbón, 2009) y Puerto Nuevo (INCO, 2009). Como estos proyectos de infraestructura portuaria y ferroviaria no se encuentran en servicio, analizar el efecto que tendrían sobre la exportación de carbón del interior implica la construcción de un modelo de redes de transporte y la elección de una técnica de modelación, tal como se discute en seguida.

Aunque la definición de estrategias de transporte de minerales se puede apoyar en adaptaciones del modelo clásico de planificación de transporte de cuatro etapas (Márquez, 2008; Zhou, Chen y Wong, 2009), ha sido tradicional aplicar técnicas de optimización para estudiar estrategias conjuntas de explotación y transporte de minerales y recursos energéticos (Osleeb y Ratick, 1983; Lai y Chen, 1996). En la actualidad sigue siendo importante el uso de técnicas de optimización de redes para resolver problemas de elección de modos para el transporte

de minerales a granel (Leal y D'Agosto, 2011) y se encuentran desarrollos computacionales importantes en el área de la optimización de redes, en especial en el problema de flujo de mínimo costo (Zhu *et al.*, 2011), que es la técnica elegida en la presente investigación, con base en la información disponible.

Se concibe un modelo de optimización de costos de transporte y transferencia de carga basado en una red de transporte combinado que incluye los modos de transporte disponibles en el país para la movilización de carga: carretero, ferroviario y fluvial. El modelo de optimización, diseñado con fines de estudiar la exportación del carbón en Colombia con horizonte en el año 2019, considera la infraestructura desarrollada o proyectada que incide en la competitividad del sector minero, y su alcance se relaciona con la red de transporte combinado hacia los puertos de exportación, permitiendo identificar las rutas óptimas para llevar el carbón desde el interior hacia los puertos marítimos de exportación y determinar los flujos y costos de transporte para distintas estrategias de combinación modal.

2. METODOLOGÍA

La metodología se basó en la búsqueda de solución a un problema de flujo de mínimo costo aplicado sobre una red estratégica nacional que incluye los modos de transporte carretero, ferroviario y fluvial, con el propósito de minimizar los costos de transporte para la exportación del carbón del interior del país.

Lo primero que se hizo fue codificar una red de transporte combinado, estableciendo las conexiones entre los distintos modos de transporte para garantizar la complementariedad de redes y conseguir así una solución óptima integral. Luego se procedió a indagar acerca de las previsiones de producción de carbón para cada distrito minero y de la eventual demanda en los puertos de exportación. Por fin, dadas las previsiones de demanda y la red de transporte combinado, se aplicó un modelo de optimización para determinar los flujos de transporte de mínimo costo.

2.1 Red de transporte combinado

Formalmente, la red de transporte se definió como un grafo $G(N, A)$, donde N es el conjunto de nodos y A es el conjunto de arcos de la red. En síntesis, los arcos representan la infraestructura combinada de transporte, mientras que los nodos unen arcos adyacentes y permiten caracterizar la topología de la red. Existen en la red unos nodos especiales, denominados centroides, que representan aquellos puntos donde se genera o atrae la demanda; estos centroides están conectados a la red mediante unos arcos especiales llamados conectores de centroide, que son unos arcos ficticios de acceso y egreso a la red.

El modelo de red se implementó en la versión académica 4.8 del software TransCAD (Caliper Corporation, 2005), tomando como punto de partida las redes del modelo estratégico de transporte de carga para Colombia (UTMT, 2008), integrando la oferta, localizada en los distritos mineros productores de carbón, con la demanda, ubicada en los puertos de exportación, mediante la utilización de conectores de centroide.

Los arcos de la red carretera del modelo tomado como referencia (UTMT, 2008) fueron empleados en su totalidad, mientras que en el caso del transporte fluvial únicamente se consideró la red que representa la navegación por el río Magdalena, ya que los demás ríos aptos para la navegación mayor están localizados fuera de los corredores de transporte internacional con énfasis en los puertos marítimos colombianos. La red ferroviaria sufrió las principales modificaciones en comparación con la red de referencia, puesto que a ella se adicionaron los proyectos del ferrocarril del Carare, el ferrocarril central y el ferrocarril a Puerto Brisa, con miras a la expansión del sector carbonífero en el horizonte de planificación del año 2019. Además fueron codificados 17 arcos de transferencia modal y 77 conectores de centroide para unir la red de transporte combinado con los puntos que concentran la oferta y demanda de transporte. En síntesis, el modelo de

red quedó formado por 1.864 arcos que en total representan cerca de 34.000 kilómetros, tal como se exhibe en la tabla 1.

Tabla 1. Conformación de la red de transporte combinado

Modo de transporte	Arcos	Longitud (km)
Ferrovionario	173	3.292
Fluvial	72	2.265
Carretero	1.525	27.559
Conector	77	869
Intercambio	17	n/a
Total	1.864	33.985

La figura 1 contiene la representación gráfica parcial del modelo de red de transporte combinado que se empleó en el estudio y muestra aspectos relativos a la localización de distritos mineros productores de carbón y puertos de exportación sobre los litorales Atlántico y Pacífico.

Como el tiempo de viaje era la única variable de impedancia asociada a las redes de transporte que fueron tomadas como referencia (UTMT, 2008), fue necesario, en el marco de la presente investigación, estimar los costos de transporte de cada arco y expresarlos en \$/t para cada modo de transporte y arcos de transferencia.

El enfoque metodológico para la estimación de costos en la red de transporte carretero, que es la de mayor extensión en el modelo, se basó en el módulo Road Cost Knowledge System (World Bank, 2010) del modelo HDM-4 versión 2.01, estudiando los precios de mercado del año 2010 y atributos propios de la infraestructura carretera, tales como anchura de calzada, estado de la superficie de rodadura, pendiente longitudinal, altura de la vía sobre el nivel del mar, factores de ajuste por velocidad, composición de la flota vehicular y características de los periodos de tránsito. Aunque cada arco, dependiendo de sus atributos, contiene un costo

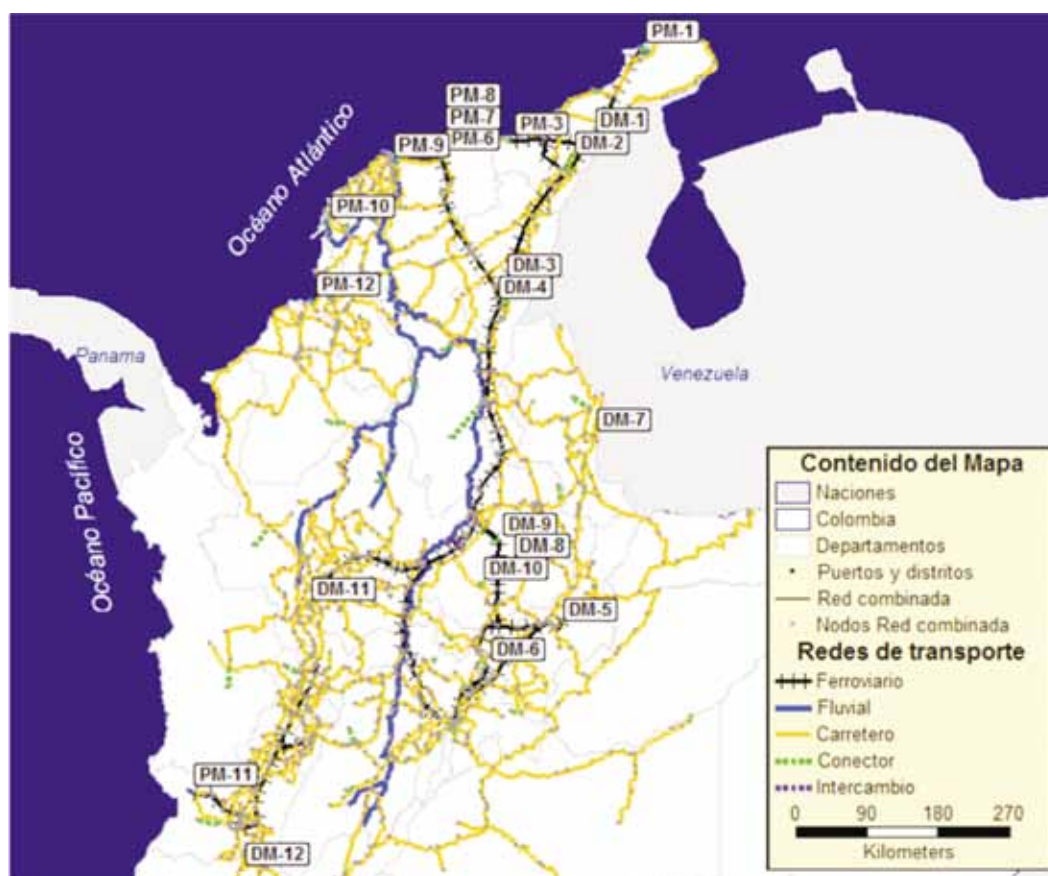


Figura 1. Red de transporte combinado

determinado, en promedio la red carretera se especificó con un costo de 114,63 \$/t-km.

La estimación de los costos de operación del modo de transporte ferroviario siguió el método del “Estudio técnico, de logística y de mercado y la estructuración económica y financiera del Ferrocarril del Carare” (Corporación para el Desarrollo del Ferrocarril del Carare, 2008), considerando el tipo de locomotora, tipo de carro, producto transportado, características de la vía, distancia de transporte, composición del flujo del tráfico y los índices de explotación del material de tracción y de arrastre. El valor promedio con el que se caracterizó la red ferroviaria fue de 52,60 \$/t-km.

Los costos de transporte del modo fluvial se estimaron aplicando el método propuesto en el “Estudio de demanda de transporte del sistema fluvial del río Magdalena” (Hidroestudios y Steer Davies Gleave, 2001), que incluyó costos de seguros, custodia de la carga, recuperación del capital, mantenimiento, uso de la vía fluvial, combustibles, lubricantes, tripulación y costos administrativos. La red tomó un valor promedio de 34,31 \$/t-km, suponiendo un convoy formado por un remolcador y 6 barcazas.

De acuerdo con las estimaciones realizadas, al tomar como referencia los costos de transporte de carbón por el modo fluvial, se tiene que el fe-

roviario es 1,53 veces más costoso, mientras que el modo carretero resulta 3,34 veces más costoso. El estudio de costos de los arcos de transferencia de carga también incluyó precios asociados al control de entrada, descargue, acopio, almacenamiento, manejo, cargue y uso de instalaciones, encontrando un valor promedio de 8.992 \$/t, suponiendo condiciones óptimas de transferencia de carga en cuanto a tecnología y equipos que se usan para las maniobras en los centros de transferencia.

Finalmente, el análisis de capacidad de las redes disponibles para el transporte de carbón se hizo con base en los estudios ya descritos para cada modo de transporte y se descontó la capacidad utilizada por el transporte de otros productos, incluyendo los camiones vacíos, con base en las proyecciones de flujos del modelo de la UTMT (2008). En el caso de los arcos de transferencia de carga, que por ahora no son más que arcos ficticios para estudiar la complementariedad entre modos de transporte, se supuso una capacidad ilimitada, de tal manera que no existieran restricciones en el modelo distintas a las limitantes de capacidad propias de cada arco de transporte; esto se considera correcto, puesto que los flujos sobre esos arcos de transferencia de carga resultantes del proceso de optimización permitirían dimensionar los requisitos de infraestructura en los centros de transferencia de carga.

2.2 Oferta y demanda de carbón

Con el fin de obtener el cargamento total de la red, además de la producción de los carbones del interior del país, el análisis de oferta y demanda incluyó la producción de carbón de los distritos mineros de La Jagua, Cerrejón Norte, Cerrejón Sur y La Loma que, si bien cuentan con infraestructuras de transporte exclusivas, hacen parte integral de la formulación del problema de optimización.

El vector de producción de carbón fue estimado con base en el estudio “Estimación de la producción minera colombiana por distritos basada en proyecciones de PIB minero latinoamericano

2008-2019” (Ministerio de Minas y Energía, 2008), tal como se aprecia en la tabla 2, que además incluye la identificación de los distritos mineros que serán objeto de modelación, por encontrarse en el área de influencia de las nuevas infraestructuras de transporte ferroviario.

Los distritos de producción DM-11 (Amagá) y DM-12 (Cauca) no fueron incluidos en la modelación, ya que, como se observa en la figura 1, están localizados por fuera del área de influencia directa del presente estudio, además de su poca importancia en el contexto de la producción nacional de carbón y porque su producción tiene una clara disposición a ser exportada por el puerto de Buenaventura.

Tabla 2. Producción de carbón en los distritos mineros

Código	Nombre	Distrito por modelar	Oferta (millones de t/año)
DM-1	Cerrejón Norte	Sí	40
DM-2	Cerrejón Sur	Sí	2
DM-3	La Loma	Sí	30
DM-4	La Jagua	Sí	51,5
DM-5	Sogamoso	Sí	5,3
DM-6	La Isla	Sí	4,2
DM-7	Norte de Santander	Sí	5,4
DM-8	La Aragua	Sí	2
DM-9	Centenario	Sí	2
DM-10	Santander	Sí	1
DM-11	Amagá	No	0,6
DM-12	Cauca	No	0,1

En total se obtuvo una proyección al año 2015 de 144,1 millones de t/año, que deben ser llevadas al exterior a través de los puertos de exportación. Siguiendo las tendencias de exportación en los puertos existentes (UPME, 2006), los estimativos hechos para las nuevas infraestructuras portuarias (Fenalcarbón,



2009) y las restricciones del modelo, se obtuvo la tabla 3, que contiene la demanda balanceada con fines de optimización.

Tabla 3. Demanda de carbón en los puertos marítimos

Código	Nombre	Demanda (millones de t/año)
PM-1	Puerto Bolívar	40
PM-3	Proyecto Puerto Brisa	6
PM-6	Puerto Drummond	40
PM-7	Proyecto Puerto Nuevo	24
PM-8	Sociedad Portuaria Río Córdoba	7
PM-9	Sociedad Portuaria Regional de Barranquilla	17
PM-10	Cartagena	5
PM-11	Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura	3
PM-12	Golfo de Morrosquillo	2

2.3 Modelo de optimización

Con la red de transporte combinado ya caracterizada y con los datos de oferta y demanda estimados, se procedió a aplicar la herramienta de modelación para obtener las rutas óptimas de transporte combinado y determinar los flujos y costos de transporte en cada una de las estrategias examinadas. La formulación del problema de optimización se presenta a continuación:

$$\text{Min}_{\{X_{ij}\}} : \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} \cdot X_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{\{i:(i,j) \in A\}} X_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} X_{ji} = B_i \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$L_{ij} \leq X_{ij} \leq U_{ij} \quad \forall (i,j) \in A \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} B_i = 0 \quad (4)$$

Donde,

A: Conjunto de arcos del modelo de red

N: Conjunto de nodos del modelo de red

B_i : Oferta o demanda de cada nodo i

L_{ij} : Flujo mínimo de cada arco ij , 0 en el problema

U_{ij} : Capacidad de cada arco ij

X_{ij} : Flujo de transporte sobre cada arco, por determinar. Para el problema representa el conjunto de variables de decisión, que según lo descrito está formado por 1.864 arcos

c_{ij} : Costo de cada arco ij , expresado en \$/t

Es importante aclarar que los vectores de oferta y demanda no consideran en forma directa la presencia de camiones vacíos, que efectivamente incide en el nivel de servicio de la infraestructura y que ha sido estudiada con amplitud en el transporte de mercancías, ante todo en el modo carretero (Holguín-Veras y Thorson, 2003). En el modelo propuesto, la presencia de camiones vacíos afectó la capacidad de los arcos, ya que como se había explicado, el análisis de capacidad de los arcos restó la capacidad utilizada por el transporte de otros productos, incluyendo los camiones vacíos, con base en las proyecciones de flujos del modelo de la UTMT (2008).

3. RESULTADOS

El modelo permitió identificar las rutas óptimas en cada estrategia de transporte combinado para llevar el carbón desde los distritos mineros del interior del país hacia los puertos marítimos de exportación, encontrando los costos de transporte que se muestran en la tabla 4.

Al optimizar los costos de la red de transporte combinado mediante la aplicación del modelo, se encontró que el carbón del interior del país debería exportarse por el puerto de Barranquilla, mediante la integración de los modos de transporte ferroviario y fluvial, a excepción de los carbones producidos en los distritos mineros de Santander y Norte de Santander

Tabla 4. Matriz de costos mínimos para cada estrategia de transporte combinado (\$/t)

Distrito/Puerto	PM-1 Puerto Bolívar	PM-3 Puerto Brisa	PM-6 Drummond	PM-7 Puerto Nuevo	PM-8 Río Córdoba	PM-9 Barranquilla	PM-10 Cartagena	PM-11 Buenaventura	PM-12 Morrosquillo
DM-5 Sogamoso	63.798	54.817	53.975	54.202	54.202	48.615	49.626	86.782	92.158
DM-6 La Isla	62.434	53.453	52.611	52.838	52.838	47.251	48.261	75.701	90.794
DM-7 N. Santander	79.500	70.519	69.677	69.904	69.904	58.273	59.283	123.495	86.060
DM-8 La Aragua	50.563	41.581	40.739	40.967	40.967	35.379	36.390	83.394	75.655
DM-9 Centenario	48.890	39.909	39.066	39.294	39.294	33.707	34.717	83.192	75.453
DM-10 Santander	66.071	57.090	56.248	56.475	56.475	39.320	40.331	82.041	74.302

que utilizan la red carretera y la fluvial. Los costos de transporte para la exportación del carbón del interior del país por los puertos marítimos de Puerto Nuevo y Río Córdoba, ubicados en el extremo noroccidental del municipio de Ciénaga, son idénticos para el nivel de detalle con el que se codificó la red de transporte, puesto que se encuentran conectados por los mismos arcos de transporte, lo cual se considera razonable.

La figura 2 muestra las rutas mínimas encontradas y resalta además la localización de los sitios de transferencia de carga identificados que, según el modelo formulado, deberían situarse en Barrancabermeja, para integrar las nuevas infraestructuras del ferrocarril con el río Magdalena, y en Capulco y Bocas del Carare, como centros de transferencia de carga del modo de transporte carretero al fluvial.

Adicionalmente, el modelo se usó para obtener los flujos totales sobre la red de transporte combinado, tal como se ve en la figura 3, donde al margen de los grandes flujos localizados en el norte del país, se nota la importancia del río Magdalena y de las nuevas infraestructuras ferroviarias.

Cuando se hizo la modelación del sistema sin incluir el ferrocarril del Carare y el ferrocarril Central, se encontró que la solución del problema de optimización no es factible, ya que la capacidad remanente de la red carretera, que comunica el centro con el norte del país, no es suficiente para movilizar la cantidad de carbón prevista en los análisis de oferta y demanda.

A partir de los flujos obtenidos, expresados convenientemente en t-km, se obtuvo la participación agregada de cada modo de transporte, encontrando que al modo de transporte ferroviario le corresponde el 61 % de la carga total movilizada, mientras que los modos de transporte fluvial y carretero participan respectivamente con el 26 % y el 13 %. Con respecto a la complementariedad entre modos de transporte se encontró que el 12,5 % de la carga total sería objeto de transferencia, resultado que es consistente con los flujos obtenidos en el modelo.



Figura 2. Rutas de mínimo costo desde el interior y centros de transferencia de carga

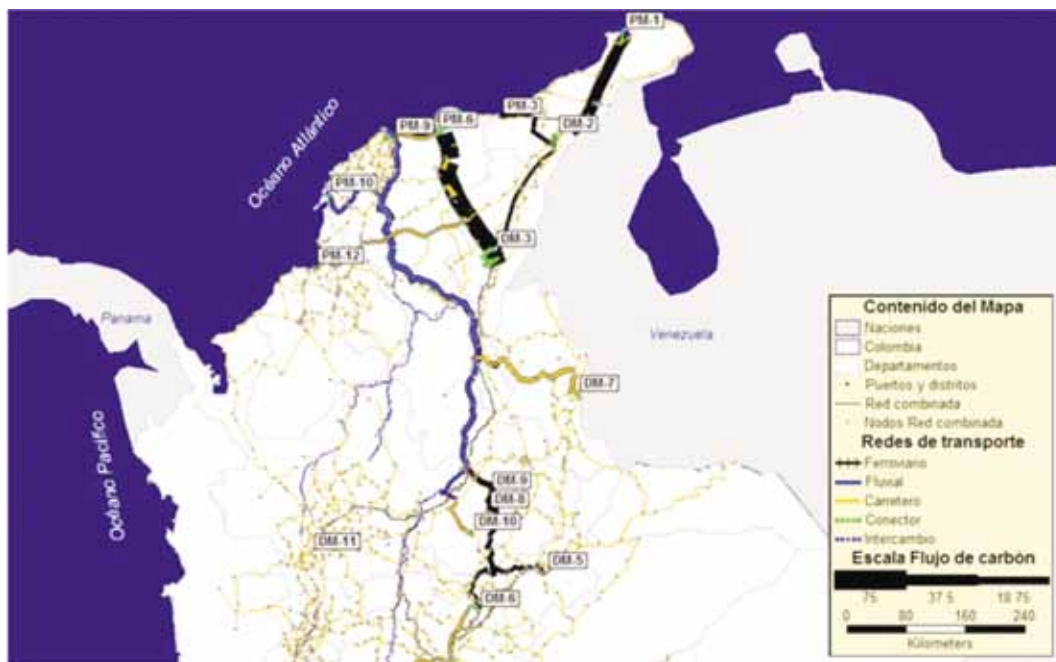


Figura 3. Flujos modelados de carbón sobre la red de transporte combinado

Los resultados encontrados resaltan de nuevo la importancia del modo de transporte fluvial, con una participación esperada del 26 % sobre el flujo total de exportación representado por el transporte de carbones producidos en el interior del país.

4. CONCLUSIONES

Se optimizó una red de transporte combinado para la exportación del carbón colombiano del interior, se identificaron las rutas óptimas para transportar el carbón desde los distritos mineros hasta los puertos de exportación y se determinaron los flujos y costos de transporte para distintas estrategias de combinación modal.

El análisis de costos para cada modo de transporte dio en promedio los siguientes valores: carretero, 114,63 \$/t-km; ferroviario, 52,60 \$/t-km, y fluvial, 34,31 \$/t-km. Al tomar como referencia los costos de transporte de carbón por el modo fluvial, se concluye que el ferroviario es 1,53 veces más costoso, mientras que el modo carretero resulta 3,34 veces más costoso.

Se concluye que los carbones de Boyacá y Cundinamarca deben ser transportados por las nuevas infraestructuras ferroviarias modeladas hasta unos centros de transferencia de carga situados en Barrancabermeja y Bocas del Carare, donde se inicia una etapa de transporte fluvial hasta el puerto de Barranquilla. La producción de carbón de Santander y Norte de Santander debe integrar los modos de transporte carretero y fluvial, en centros de transferencia de carga localizados en Bocas del Carare y Capulco.

El modelo de optimización, más que la competencia entre los modos de transporte, destaca el alcance de la complementariedad que debe existir entre las infraestructuras de los modos de transporte considerados, en especial las combinaciones ferroviario-fluvial y carretero-fluvial. Se resalta la importancia del río Magdalena como infraestructura estratégica para el transporte de carbón del interior del país.

El modelo permitió identificar una oportunidad de inversión en la implementación de los centros de transferencia de carga, que podrían llegar a manejar hasta el 12,5 % de la producción total de carbón en el país, equivalente a 18 millones de t/año.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a INCOPLAN S.A. por permitir su participación en el proyecto "Infraestructura de transporte multimodal y de logísticas integradas para el desarrollo de la industria minera en Colombia, con énfasis en puertos", del cual se deriva este trabajo.

REFERENCIAS

- Caliper Corporation. *Travel demand modeling with TransCAD 4.8*. Newton, MA: Caliper, 2005. 593 p.
- Cantillo, Víctor. *Monografía del carbón*. Barranquilla: Unión Temporal Modelación de Transporte UPTC-Unalmed-Uninorte, 2008. 51 p.
- Colombia. Consejo Nacional de Política Económica y Social, CONPES. *Documento CONPES 3512 Importancia estratégica del proyecto de concesión Sistema Ferroviario Central*. [Documento en línea], 2008: [consultado el 25 de octubre de 2010] Disponible en: <<http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3512.pdf>>
- Colombia. Instituto Nacional de Concesiones, INCO. *Autopistas como vías para la competitividad*. En: 2° Foro sobre la Infraestructura Requerida para la Competitividad del Carbón Colombiano, Paipa. [Documento en línea], 2009: [consultado el 3 de diciembre de 2010] Disponible en: <<http://www.fenalcarbon.org.co/memorias/inco.pdf>>
- Colombia. Ministerio de Minas y Energía. *Estimación de la producción minera colombiana por distritos basada en proyecciones de PIB minero latinoamericano 2008-2019*. Bogotá: Sistema de Información Minero Colombiano, 2008. 80 p.
- Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. *Mercado nacional e internacional del carbón colombiano*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2006. 27 p.
- Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. *Gestión pública para propiciar la actividad*



- minera, *Plan Nacional de Desarrollo Minero 2007-2010*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2007. 16 p.
- Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. *Boletín estadístico de minas y energía 1990-2010*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, 2011. 66 p.
- Corporación para el Desarrollo del Ferrocarril del Carare. *Estudio técnico, de logística y de mercado y la estructuración económica y financiera del Ferrocarril del Carare*. Bogotá, 2008. 35 p.
- Federación Nacional de Productores de Carbón, Fenalcarbón. *Puerto Brisa*. En: 2° Foro sobre la Infraestructura Requerida para la Competitividad del Carbón Colombiano, Paipa. [Documento en línea], 2009: [consultado el 3 de diciembre de 2010] Disponible en: <http://www.fenalcarbon.org.co/memorias/puerto_brisa.pdf>
- Franco, Giovanni; Gallo, Adrián Felipe y Franco, Esteban (2010). "El carbón colombiano y el modelo de Hoteling". *Revista EIA*, No. 14 (diciembre), pp. 67-74.
- Hidroestudios S.A. y Steer Davies Gleave. *Estudio de demanda de transporte del sistema fluvial del río Magdalena*. Bogotá, 2001.
- Holguín-Veras, José and Thorson, Ellen (2003). "Modeling commercial vehicle empty trips with a first order trip chain model". *Transportation Research Part B*, vol. 37, No. 2 (February), pp. 129-148.
- Lai, Jeng-Wen and Chen, Chia-Yon (1996). "A cost minimization model for coal import strategy". *Energy Policy*, vol. 24, No. 12 (December), pp. 1111-1117.
- Leal, Ilton Curty Jr. and D'Agosto, Márcio de Almeida (2011). "Modal choice evaluation of transport alternatives for exporting bio-ethanol from Brazil". *Transportation Research Part D*, vol. 16, No. 3 (May), pp. 201-207.
- Márquez, Luis. *Modelo de oferta de transporte para Colombia: Calibración y asignación*. Tunja: Unión Temporal Modelación de Transporte UPTC-Unalmed-Uninorte, 2008. 95 p.
- Osleeb, Jeffrey P. and Ratick, Samuel J. (1983). "A mixed integer and multiple objective programming model to analyze coal handling in New England". *European Journal of Operational Research*, vol. 12, No. 3 (March), pp. 302-323.
- 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"*. Bogotá, 2008. 225 p.
- World Bank. *Road Cost Knowledge System ROCKS*. [Documento en línea], 2010: [consultado el 18 de agosto de 2010] Disponible en: http://www.worldbank.org/transport/roads/rd_tools/rocks_main.htm.
- Zhou, Zhong; Chen, Anthony and Wong, S. C. (2009). "Alternative formulations of a combined trip generation, trip distribution, modal split, and trip assignment model". *European Journal of Operational Research*, vol. 198, No. 1 (October), pp. 129-138.
- Zhu, Xiaoyan; Yuan, Qi; Garcia-Diaz, Alberto and Dong, Liang (2011). "Minimal-cost network flow problems with variable lower bounds on arc flows". *Computers & Operations Research*, vol. 38, No. 8 (August), pp. 1210-1218.