

# Modelos para analizar el desarrollo del transporte urbano del Valle de Aburrá con consideraciones económicas, energéticas y ambientales

Recibido 30 abril de 2007, aprobado 15 de mayo de 2007.

## Juan M. Alzate

Ingeniero Civil, M.Eng. Asistente Investigador de Proyectos Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. Bogotá D. C., Colombia.  
jualzate@uniandes.edu.co

## Ángela Cadena

Ingeniera Eléctrica, M.Sc. Ph.D., en Ciencias Económicas y Sociales. Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad de Los Andes. Directora Unidad de Planeación Minero Energética. Bogotá D.C., Colombia.  
acadena@uniandes.edu.co

## Claudia C. Rave

Ingeniera Civil, M.Eng. Estudiante de Doctorado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia.

## Ricardo A. Smith

Ingeniero Civil, M.Sc, Ph.D en Ingeniería Civil. Director Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Profesor Asociado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Medellín, Colombia.

**RESUMEN** Mediante una metodología basada en un modelo de optimización multiperiodo de mínimo costo y un modelo para la estimación de demandas de movilidad, se evalúan diferentes escenarios de movilidad y políticas regulatorias de carácter energético y ambiental para el transporte urbano del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Se espera que la metodología y herramientas desarrolladas apoyen y orienten el proceso de toma de decisiones sobre el transporte urbano local hacia la disminución de la emisión de contaminantes a la atmósfera. La metodología considera alta desagregación geográfica de la información para apoyar el proceso de planificación del territorio.

## PALABRAS CLAVE

MARKAL, TransCAD, optimización, transporte urbano, planificación local.



---

## Models to Analyze Urban Transportation Development of the Aburrá Valley from Economic, Energetic and Environmental Perspectives

**ABSTRACT** Through a methodology based on a minimum cost multi-period optimization model and a previous model for mobility demand estimation, there are assessed different mobility demand scenarios next to energy and environmental regulatory policies for the urban transportation of the Aburrá Valley. It is expected the developed methodology and tools to support and guide decision processes over urban transportation sector at a local scale pointing to diminish pollutant emissions to atmosphere. This methodology considers high geographic disaggregation level of the information to support territorial urban planning.

### KEYWORDS

MARKAL, TransCAD, optimization, urban transportation, local planning.

## INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá enfrenta actualmente grandes problemas asociados a la movilidad de pasajeros y de carga. Algunas entidades encargadas de planificar su desarrollo encuentran necesario evaluar políticas y definir medidas regulatorias que permitan contar con un sistema de transporte que responda a las demandas derivadas del crecimiento económico y la localización de la población, al tiempo que reduce los impactos ambientales y los efectos negativos sobre la salud humana, ocasionados por la alta utilización de combustibles fósiles en este sector.

Para apoyar esta necesidad de las entidades responsables, se propone desarrollar una estructura de modelamiento que permita representar adecuadamente el sector transporte local. El conjunto de modelos se apoya en herramientas de optimización tanto de modos y rutas como de costos, con el fin de evaluar diferentes escenarios de evolución de la demanda del transporte local y la introducción de diferentes combustibles y tecnologías tanto en el sistema Metroplús como en el parque automotor local. Se busca encontrar opciones tecnológicas de mínimo costo y de menor impacto ambiental en términos de emisiones de contaminantes a la atmósfera, haciendo uso de los recursos energéticos disponibles para la región; lo cual, en ocasiones, representa objetivos en conflicto.

## EL TRANSPORTE EN EL VALLE DE ABURRÁ

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), se encuentra a 1.480 m.s.n.m al interior del departamento de Antioquia, Colombia (06°15'6" N, 75°34'E). En ella se alojan aproximadamente 3.3 millones de habitantes [1], distribuidos en diez municipios. El 95% de la población reside dentro de la delimitación urbana y el 5% restante en las zonas rurales.

El transporte local cuenta con 2.900 km de vías pavimentadas [2] para atender la demanda de transporte de pasajeros (privados y públicos): autos, motos, taxis, microbuses y buses, también cuenta con volquetas y camiones para el transporte de carga. Adicionalmen-

te, cuenta con un sistema de transporte masivo de pasajeros tipo Metro que ofrece servicio en dos líneas y con un sistema de transporte de pasajeros por cable, Sistema Metrocable, que funciona actualmente en una única línea.

Varios diagnósticos del sector transporte en el Valle de Aburrá [2],[3],[4], identifican diferentes problemáticas asociadas con la subutilización del sistema Metro, el creciente grado de motorización, los altos niveles de contaminación ambiental y problemas de calidad del aire derivados del incremento del consumo de diesel con alto contenido de azufre, los elevados tiempos de viaje (congestión, bajas velocidades de operación) y la baja calidad del servicio. Estas situaciones producen un deterioro de la calidad de vida y de la salud de los habitantes e ineficiencias económicas por el consumo excesivo de combustibles.

Como respuesta surgió el Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM), organización que planea dar al AMVA una opción de integración de todos los modos de transporte de tal manera que se incremente la eficiencia en este servicio. El SITM está conformado por: el Metro de Medellín, el Sistema de Transporte Público Colectivo tradicional y Metroplús S.A.

Metroplús S.A. pretende impulsar el desarrollo del AMVA a través de la generación de un sistema ágil, cómodo y seguro de buses rápidos, que se integre con los servicios y tarifas del Metro y Metrocable [5]. Tiene como objetivo expandir en el AMVA un servicio de transporte público que estimule y privilegie el uso del transporte público sobre el transporte individual motorizado, incrementando la eficiencia del sistema en términos económicos y de movilidad. Contempla la ejecución de diferentes corredores viales.

## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y ESTRUCTURA DE MODELAMIENTO

Para apoyar el proceso de toma de decisiones sobre un sistema de transporte con integración modal eficiente y la utilización de combustibles y tecnologías más limpias, se desarrolla una estructura de mode-

lamiento que permite estimar impactos económicos, energéticos y ambientales de los posibles proyectos a ser ejecutados en un horizonte de planificación de mediano plazo.

La estructura propuesta consiste en una cascada de modelos: inicialmente un modelo de transporte, TransCAD<sup>1</sup>, para la estimación de demandas de movilidad distinguida por modos: autos, motos, buses, busetas, etc., en cada tramo vial considerado en la región de estudio. Estas estimaciones se hacen considerando un alto grado de desagregación geográfica y están sujetas a un escenario de ocupación del territorio, definido por la información de las matrices Origen/Destino de los años 2000 y 2005 existentes a nivel metropolitano. En la Figura 1 se presenta la imagen del dominio de estudio y los tramos viales de interés.

Con las demandas de movilidad estimadas con el modelo TransCAD, para un horizonte de planificación 2002 – 2020, de acuerdo a variables socioeconómicas que reflejan el crecimiento del transporte urbano local, se alimenta un segundo modelo, de optimización (basado en programación lineal), MARKAL estándar<sup>2</sup>. Este modelo permite identificar el conjunto de tecnologías y combustibles óptimos, que minimiza el costos del sistema (inversión, operación y mantenimiento) para satisfacer dichas demandas, sujeto a restricciones de disponibilidad de energéticos y límites de emisión de contaminantes a la atmósfera. Se consideran diferentes alternativas tecnológicas para el Sistema Metroplús (flota de buses GNV, diesel, euro-diesel, entre otras), y para el transporte urbano

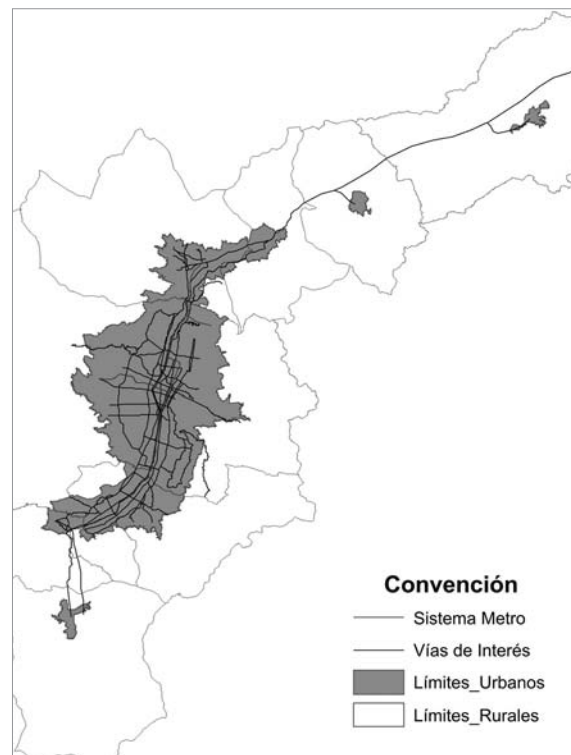


Figura 1. Dominio de estudio. Tramos viales de interés.

público y privado (GNV, biocombustibles). Se representan una a una las vías representativas del dominio de estudio.

Finalmente, se despliegan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios de modelamiento, en un Sistema de Información Geográfica<sup>3</sup>, que facilita la consulta de resultados ambientales, económicos y energéticos de cada escenario propuesto y por ende el proceso de planificación del sector transporte local y del territorio.

1 Modelo de transporte de cuatro pasos (4S), ver [6],[7].

2 MARKet ALlocation por sus siglas en inglés. Este modelo (o familia de modelos) ha sido desarrollada en el marco del Programa ETSAP de la Agencia Internacional de Energía. Para mayores detalles acerca de este modelo MARKAL, se refiere al lector a las siguientes referencias [8],[9],[10],[11],[12],[13],[14],[15].

3 Interfase gráfica desarrollada en lenguaje de programación de código abierto MapWindow - GIS por el Grupo de Análisis y Modelamiento Energía-Ambiente-Economía de la Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia, con la especial participación de I.S. Juan David Giraldo.

## ESCENARIOS

Se estudian dos escenarios de demanda: el primero, BASE, que representa una evolución inercial de las demandas de movilidad de la región y, el segundo escenario, Plan Maestro de Movilidad (PMM), que favorece la utilización de medios de transporte público colectivo y la integración modal.

Un primer modelo evalúa 5 alternativas tecnológicas para la operación de la flota de buses rápidos del sistema Metroplús, (1) buses impulsados con gas natural vehicular, (2) impulsados con diesel local, (3) impulsados con Euro-diesel III importado desde el golfo de México, (4) una flota de buses mixta en proporciones 50/50 gas natural y diesel local, y (5) buses híbridos de diesel local, bajo los dos escenarios de demanda.

Tomando como combustible para Metroplús el GNV, se construye un segundo modelo que evalúa 4 opciones energéticas para el parque automotor en general, vehículos tanto públicos como privados: (1) evolución inercial del consumo de combustibles, (2) masificación del consumo de GNV, (3) introducción de etanol de caña al 10%, y (4) introducción de biodiesel de aceite de palma al 10%, para los dos escenarios de demanda.

Los resultados obtenidos indican la mejor alternativa tecnológica para el Sistema Metroplús en términos energéticos, económicos y ambientales, y sugieren medidas regulatorias para el transporte urbano que apuntan a un desarrollo sostenible.

## RESULTADOS

Los análisis realizados indican que la alternativa tecnológica que implica los menores costos para el sistema Metroplús corresponde a una flota de buses impulsada con GNV, para los dos escenarios de demanda. Ésta corresponde a la alternativa que menores emisiones de Material Particulado (MP), Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) y Óxidos de Nitrógeno (NOX) implica. En la Figura 2 se presenta una comparación económico-ambiental de las alternativas consideradas. En el eje de las abscisas el costo total

del sistema, en el eje de las ordenadas, las emisiones totales a la atmósfera. La mejor alternativa corresponde a aquella que se ubique en la esquina inferior (menores emisiones), izquierda (menores costos).

Con relación al modelo del parque automotor en general, se observa que el escenario PMM logra un beneficio económico considerable frente al escenario de demanda tendencial, o BASE, como se puede ver en la Figura 3. En la misma Figura, puede observarse que para los dos escenarios de demanda la alternativa energética más económica corresponde a la masificación del consumo de GNV por parte del parque automotor del AMVA. En su orden, esta alternativa es seguida por la introducción de biodiesel de aceite de palma al 10%, la introducción de etanol de caña al 10%. La situación más costosa corresponde a un consumo de combustibles en el horizonte 2002-2020, como el actual. En términos ambientales, comparando las emisiones totales a la atmósfera de Material Particulado y Óxidos de Nitrógeno, para cualquiera de los escenarios de demanda, BASE o PMM, como se observa en la Figura 4, la mejor alternativa a mediano plazo, en términos ambientales (menores emisiones a la atmósfera) también corresponde a la masificación del consumo de GNV por parte del parque automotor local.

También se observa que bajo el escenario PMM se obtiene una reducción súbita en la emisión de contaminantes a la atmósfera debido a la re-estructuración del transporte local a partir del año 2008, año a partir del cual comienza a operar el sistema Metroplús.

Los resultados presentados corresponden a una representación agregada del dominio de estudio. En la Figura 5, se muestra una comparación de emisiones totales a la atmósfera de Compuestos Orgánicos Volátiles bajo los dos escenarios de demanda, en un tramo vial particular, para lo cual se hace uso de la herramienta para la visualización de los reportes de resultados en forma desagregada geográficamente. Estos reportes pueden hacerse también en términos económicos y energéticos (consumo de combustible).

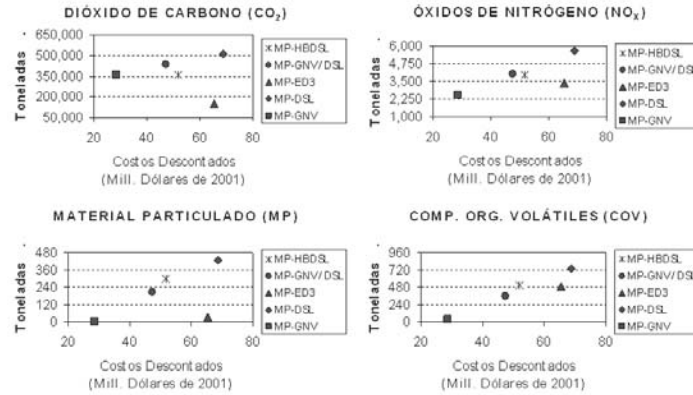


Figura 2. Comparación económico-ambiental de alternativas tecnológicas para la operación del Sistema Metroplús en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

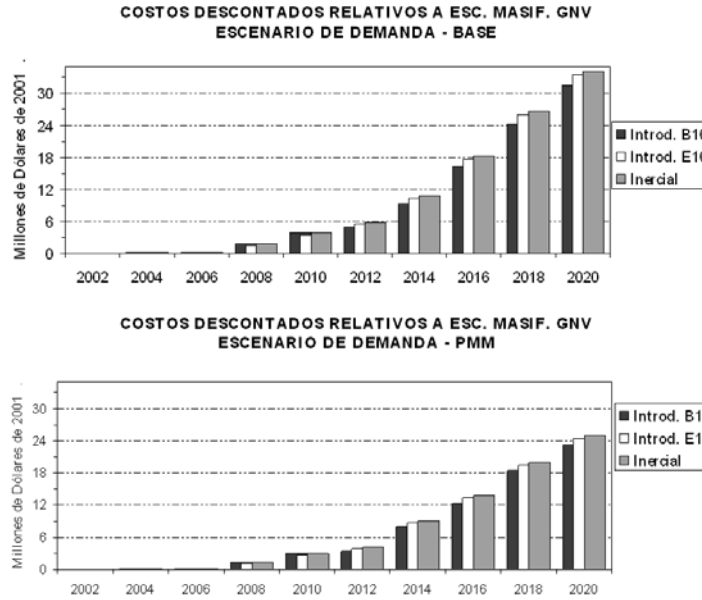


Figura 3. Comparación económica de escenarios energéticos para el parque automotor del AMVA relativa a escenario de masificación de consumo de GNV para escenarios de demanda BASE y PMM.

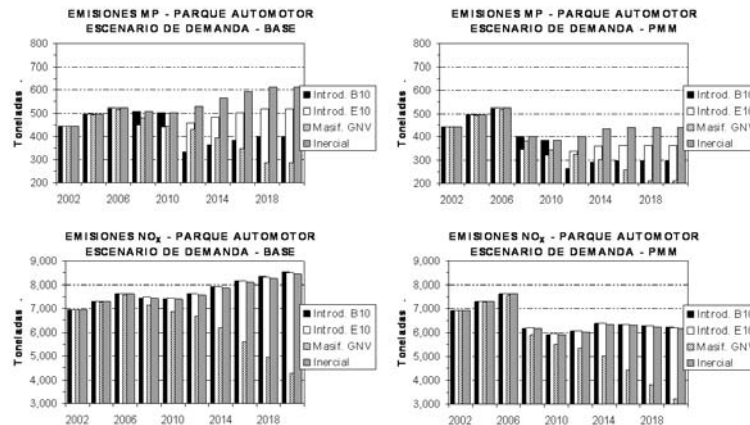


Figura 4. Comparación de emisiones a la atmósfera de MP y NO<sub>x</sub> bajo escenarios BASE y PMM de alternativas energéticas para el parque automotor del AMVA.

## CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación ponen en evidencia las ventajas económicas, energéticas y ambientales asociadas a la integración modal del Sector Transporte al interior del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Los resultados también indican que la mejor opción tecnológica es la utilización de vehículos de GNV, tanto en el sistema de Metroplús como en el parque automotor local. Sus beneficios económicos y ambientales sobrepasan por encima de otros combustibles y alternativas tecnológicas.

Las ganancias en eficiencia se logran tanto por una mayor utilización de medios de transporte colectivos (sistemas Metro, Metrocable, Metroplús y rutas de transporte colectivo público; siendo el Sistema Metro el eje estructurante del Sector Transporte local) y por la racionalización del transporte privado individual (motos, autos y taxis), como por la introducción de un combustible más limpio.

El Sistema Metroplús implicará un beneficio económico, energético y ambiental para el área de estudio; sin embargo, la mayor contribución a estos objetivos se obtiene por la correcta selección de las alternativas tecnológicas disponibles para la satisfacción de la demanda de movilidad de este nuevo sistema de trans-

porte. De esta manera, se garantiza una disminución en la demanda de movilidad motorizada a nivel local, lo cual implica un menor consumo de combustible y, por ende, una menor emisión de contaminantes a la atmósfera que impacta la salud de los habitantes del área de estudio. De acuerdo a los escenarios de demanda evaluados en este trabajo, la economía en combustible de un escenario que favorece la integración modal es de aproximadamente el 9% anual, respecto a un escenario inercial de desarrollo. En términos ambientales, la disminución en las emisiones varía según el contaminante. Para el caso de material particulado, las emisiones de un escenario en el que se favorece la integración modal disminuyen desde un 26% (2008) hasta un 40% (2020), comparativamente respecto a un escenario en la que no se presente dicha integración.

Este trabajo pone en evidencia la importancia de contar con herramientas para la toma de decisiones en los procesos de planificación del transporte urbano local y de ordenamiento del territorio. La utilización conjunta de diferentes modelos, el nivel de desagregación de la información y el despliegue geográfico de la estructura de modelamiento desarrollada, para el caso de estudio, es un trabajo pionero a nivel nacional.

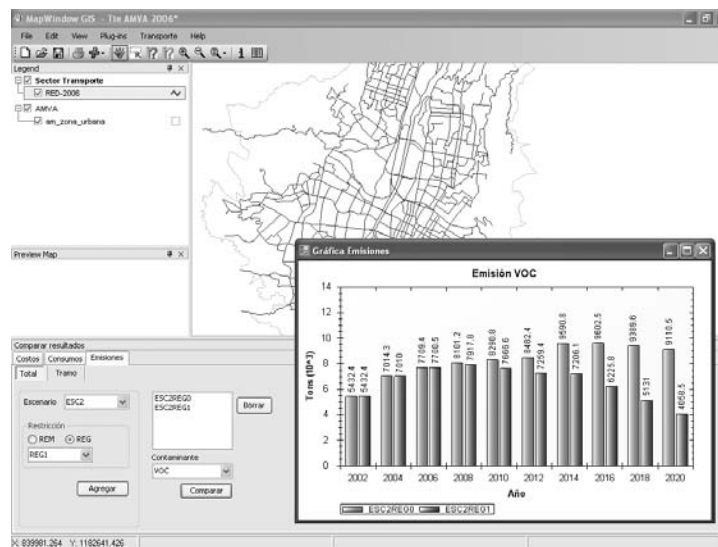


Figura 5. Herramienta para visualización de resultados distribuidos geográficamente.

## REFERENCIAS

- [1] **COSENIT S.A. Corporación de Soluciones Energéticas Integrales. Asesoría COSENIT - Ministerio de Transporte.**  
*Análisis para determinar la viabilidad técnica y económica del uso del gas natural vehicular como combustible para el transporte masivo a implementarse en Colombia., Marzo de 2006.* Bogotá D.C., Colombia.
- [2] **Área Metropolitana del Valle de Aburrá.**  
*Diagnóstico del Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá, 2005 - 2020.* Informe para Revisión, Agosto, 2005.
- [3] **EDU y Transmilenio S.A.**  
Convenio Interadministrativo No. 001 de 2003, Diciembre 2003.
- [4] **EDU y Transmilenio S.A.**  
Convenio Interadministrativo No. 002 de 2004.
- [5] **Metroplús S.A.**  
Página web visitada en marzo de 2006: <http://www.metroplus.gov.co/>.
- [6] **Caliper Corporation.**  
TRANSCAD  
Página Web: <http://www.caliper.com/tcovu.htm> Visitada en Agosto de 2005. Newton Massachussets, Estados Unidos de Norte América.
- [7] **Caliper Corporation.**  
*TRANSCAD Brochure.* Newton Massachussets, Estados Unidos de Norte América.
- [8] **ABARE.**  
The Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics. *User Manual of ANSWER MARKAL, An Energy Policy Optimization Tool.* Versión 3.5.4, 2001.
- [9] **J.M. Alzate.**  
*Evaluación integrada energía-ambiente-economía de la canasta energética y tecnológica del sector transporte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.* Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Tesis de Maestría. Diciembre de 2006.
- [10] **O. Bahn, A. Cadena, and S. Kypreos.**  
“Joint Implementation of CO2 Emission Reduction Measures between Switzerland and Colombia”. *Special Issue of International Journal of Environment and Pollution*, Vol. 12, Nos. 2/3, 1999. pp. 308-322.
- [11] **ETSAP.**  
*Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP).* Página Web: <http://www.etsap.org/index.asp>. Última visita en Diciembre de 2005.
- [12] **G. Goldstein et al.**  
*Markal an Energy-Environment-Economic Model for Sustainable Development*, 2003
- [13] **G. Goldstein et al.**  
*Energy/Economy/Environment Interaction using the MARKAL family of models.* San Antonio: International Resources Group, Ltd. 2000.
- [14] **G. Goldstein, A. Kanudia, and R. Loulou.**  
*MARKAL an Energy-Environment-Economic Model for Sustainable Development*, 2003.
- [15] **N. Van Beek**  
*Classification of Energy Models.* Eindhoven: Tilburg University and Eindhoven University of Technology, 1999.