

Análisis de accesibilidad aplicado a la distribución de gas natural comprimido

Accessibility analysis applied to the Distribution of Compressed Natural Gas

Diego A. Escobar García (1)*, Francisco J. Orozco García (2)*

(1) PhD. daescobarga@unal.edu.co.

(2) PhD. fgarciaor@unal.edu.co

* Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Civil. Manizales, Colombia.

Recibido 2 de mayo de 2011, aprobado 18 de noviembre de 2012.

Palabras claves

Accesibilidad, gas ciudad, transporte.

Key words

Accessibility, city gas, transport.

Resumen

A continuación se presenta la aplicación de una propuesta metodológica de estudio de accesibilidad territorial para el suministro de Gas Natural Comprimido (GNC) en una región específica del departamento de Caldas, Colombia. Se tiene en cuenta las proyecciones de consumo del producto y las diferentes variables de tipo geográfico e infraestructuras de transporte que permitan una eficiente logística de entrega a las poblaciones objeto, y su relación con los posibles puntos de distribución. El principal objetivo es establecer el mejor punto de distribución de GNC para proveer a dos corredores viales del departamento. Se realiza un análisis multicriterio de las variables.

Abstract

A methodological proposal and a comparison of results of the accessibility conditions of the Compressed Natural Gas (GNC) supply in a region of Caldas (Colombia) were done in this research. The analysis took into consideration the forecast of GNC consumption and the different geographic variables and also the transport infrastructure that allowed efficient logistics in the delivery of GNC to target populations and their relation to the possible distribution points. The main objective of this research is to establish the best GNC distribution supply point for two road corridors of Caldas. A multi-criteria analysis of the variables was done.

INTRODUCCIÓN

Como lo plantea Izquierdo et al. [1], un análisis de accesibilidad permite explicar las posibilidades de interacción entre los distintos puntos geográficos de un territorio como una medida de la facilidad o dificultad de comunicación entre actividades o asentamientos humanos, usando diferentes modos de transporte [2, 3]. La accesibilidad permite establecer el aporte que las infraestructuras y modos de transporte realizan para la generación de un viaje o para llegar a cierto lugar [4]. Lo anterior, hace que la accesibilidad sea considerada como un importante factor de competitividad y así [5] las comunidades más accesibles son las que, a lo largo del tiempo, han referido un mayor éxito económico. Actualmente, los estudios de accesibilidad son una variable de mucho peso en la evaluación de proyectos de infraestructura [6]. Por otra parte, existen análisis de accesibilidad que permiten estudiar

fenómenos relacionados con la demografía [7], la cohesión social [8] y factores de desarrollo económico [9, 10], por citar algunos ejemplos.

La necesidad de satisfacer la demanda de gas natural en una región del departamento de Caldas (Colombia), motivó la realización de un estudio orientado al diseño del sistema logístico correspondiente, en el que se plantea la pregunta: ¿Dónde instalar una estación de compresión de gas para que sea óptima su localización en el contexto de la infraestructura de transporte? y que a partir de dicho sitio, se pueda distribuir el gas natural en camiones especializados.

El estudio de accesibilidad al territorio plantea el análisis de tres posibles orígenes de distribución (La Virginia, Chinchiná y Manizales), en los cuales se dispone de suministro de gas por ductos para realizar la instalación de la planta de compresión. Se plantea el desarrollo de una metodología que permite

diagnosticar y comparar de forma integral las condiciones de distribución de GNC a dos corredores principales. El primero, Aranzazu, Salamina, Pácora, Aguadas, y el segundo, Viterbo, Anserma, Riosucio y Supía, teniendo en cuenta las proyecciones de consumo del producto y diferentes variables de tipo geográfico e infraestructuras del transporte.

El modelo descrito pone a prueba la influencia de una serie de parámetros que intervienen en los cálculos de tiempo de viaje y costos, comparando las matrices de costos de transporte obtenidas con datos oficiales del INVÍAS (Instituto Nacional de Vías) [11]; las matrices de costos arrojadas por la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) [12] y los resultados obtenidos por diferentes rutas de conexión, teniendo como principales productos, los tiempos promedio de viaje y el costo medio de distribución a partir de los diferentes orígenes.

METODOLOGÍA

En este estudio, se analiza la accesibilidad media global que ofrece la red vial de la región de estudio del departamento de Caldas y Risaralda, y se analizan las accesibilidades integrales desde las poblaciones de Manizales, Chinchiná y la Virginia. La accesibilidad media global se analiza a partir del valor de tiempo promedio de viaje (T_{vi}), el cual mide el tiempo promedio de viaje desde el nodo i hasta los demás nodos de la red. Este indicador tiende a favorecer los puntos ubicados hacia el centro de una red, ya que por su ubicación geográfica, los tiempos de viaje desde dichos nodos a los demás son menores.

Para el cálculo de dicho indicador, se utiliza un algoritmo del SIG que permite calcular la menor distancia entre un nodo específico y los demás nodos de la red, conformando una matriz unimodal de distancias. A través de esta matriz y conociendo la velocidad de operación promedio de cada arco, se elabora la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, la cual minimiza el tiempo de viaje entre todos los nodos de la red. Una vez determinada la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, se obtiene el vector de tiempo promedio de viaje (T_{vi}), cuyas entradas se calculan a través de la ecuación 1:

$$\bar{T}_{vi} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{vi}}{(n-1)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (1)$$

En donde:

n = Número de modos de la red

m = $n - 1$

\bar{T}_{vi} = Tiempo de viaje mínimopromedio entre el nodo i y los demás nodos de la red

$\sum_{j=1}^m t_{vi}$ = Sumatoria del tiempo de viaje mínimo entre el nodo i y los demás nodos de la red

Posteriormente, el vector de tiempo promedio de viaje ($n \times 1$), se relaciona con las coordenadas geográficas (longitud y latitud) de cada uno de los nodos, para crear la matriz de orden ($n \times 3$), por medio de la cual se elaboraran las isócronas de tiempo promedio de viaje respectivas para el área de análisis. Ahora bien, para el cálculo de las accesibilidades integrales desde las poblaciones de Manizales, Chinchiná y la Virginia se obtienen los tiempos promedios mínimos de viaje y los costos promedio mínimos entre cada uno de los nodos de la red analizada y el nodo de referencia la población en particular. De esta forma se obtiene el vector de tiempos medios de viaje entre un nodo específico y el resto de nodos que conforman la red, el cual será el insumo con el cual se alimentará el software geoestadístico, que permita graficar las curvas isócronas de accesibilidad integral.

Para obtener las curvas isócronas de tiempo, se utiliza un software geoestadístico, el cual permite obtener un resultado gráfico a partir del análisis de las matrices de tiempos de viaje, obtenidas anteriormente. Cabe anotar que, sobre los valores obtenidos en las matrices, se realizó un tratamiento estadístico, con el fin de establecer cuál sería el mejor modelo de predicción de curvas a aplicarse en cada caso. Esto permitió obtener pronósticos de la variable tiempo medio de viaje en diferentes puntos del territorio de una manera más confiable.

Antes de definir cuál método de interpolación se debe usar, es necesario verificar algunos supuestos estadísticos que las variables han de cumplir. El primer supuesto es verificar la normalidad de los datos, para lo cual se ha aplicado la prueba No Paramétrica de Kolmogorov – Smirnof; si el vector de tiempo resulta ser no normal, se realiza una transformación de los vectores por medio del Algoritmo Box-Cox. El segundo supuesto es verificar la existencia o no de estacionariedad; para ello se debe realizar gráficos de dispersión entre el vector de tiempo medio de viaje que se esté analizando y la posición geográfica (longitud y latitud, respectivamente), con el fin de establecer cuál es la tendencia que deberá ser removida del modelo de interpolación. El tercer supuesto estadístico considera que la varianza debe ser finita. La variabilidad espacial está relacionada con el cambio de los datos respecto a la distancia y orientación de los mismos. La medida de la varianza, en geoestadística, es la semivarianza, la cual está definida por la ecuación 2:

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n} \quad (2)$$

En dónde:

$Z(x)$ = Valor de la variable en un sitio x

$Z(x+h)$ = Valor muestral separado del anterior por una distancia h

n = Número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia

Esta función muestra las propiedades de dependencia espacial del proceso y se calcula para varias distancias h . A partir de los resultados de esta función se calcula un semivariograma, el cual es la representación gráfica de la semivarianza de los datos respecto a las distancias entre pares de observaciones. A pesar que no se cumpla la normalidad del vector, luego de aplicarse la transformación Box – Cox, es posible establecer el uso de un método de interpolación estadístico, por ejemplo, el método Kriging, si el vector posee Homocedasticidad, igualdad en la varianza, es posible aplicar el método.

Luego del análisis estadístico, se determina el método de interpolación a usar, y con el fin de asegurar un resultado estadísticamente confiable, se realiza la validación cruzada de los datos; en este proceso, se comparan los valores observados con los valores estimados por el modelo de interpolación seleccionado, teniendo en cuenta que con una regresión lineal es posible establecer la adecuada o inadecuada precisión del modelo usado para la predicción de los datos. Se definió la aplicación del método de curvatura mínima como modelo de predicción de los tiempos medios de viaje y costos de transporte para el área estudiada. Este método es de tipo determinístico y permite obtener unos resultados gráficos bastante aproximados a lo que sucedería en el terreno. La elección de este modelo obedeció a que los resultados del análisis estadístico demostraron la imposibilidad de aplicar un método de interpolación estadístico como el Kriging, dados los valores de los datos.

Finalmente, se calculan las matrices de costo de transporte entre las posibles poblaciones de distribución (La Virginia, Chinchiná y Manizales) y las poblaciones a servir a lo largo de los corredores viales definidos, en las cuales se aplica el camino mínimo de conexión entre nodos, minimizando la variable en cuestión, para cada caso y para cada tipo de vehículo estudiado. Las matrices de costos así obtenidas, a partir de datos del INVÍAS, del Plan Vial de Caldas [13] y de la aplicación del SIG (Sistema de Información Geográfica), se comparan con la matriz de costos generada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG.

Por medio de un SIG, el cual es alimentado con la base de datos de la red vial del sector en estudio (Ver Figura 1), es posible realizar el análisis de caminos mínimos según la minimización de tres variables: la longitud, el tiempo de viaje promedio y el costo en vehículo pesado y en articulado, respectivamente. El análisis de la accesibilidad integral que ofrece la red vial de la región occidente del departamento de Caldas, desde los tres posibles orígenes de distribución del producto (La Virginia, Manizales y Chinchiná, puntos 1, 2 y 3 de la Figura 1), se realiza a partir del análisis de las características operativas, geométricas y topográficas de cada uno de los arcos de un corredor vial, siendo la velocidad de operación una de las características principales.

La variable velocidad se obtuvo, en primera instancia, de los datos de velocidad encontrados en la Cartilla de Volúmenes de Tránsito del Instituto Nacional de Vías de Colombia

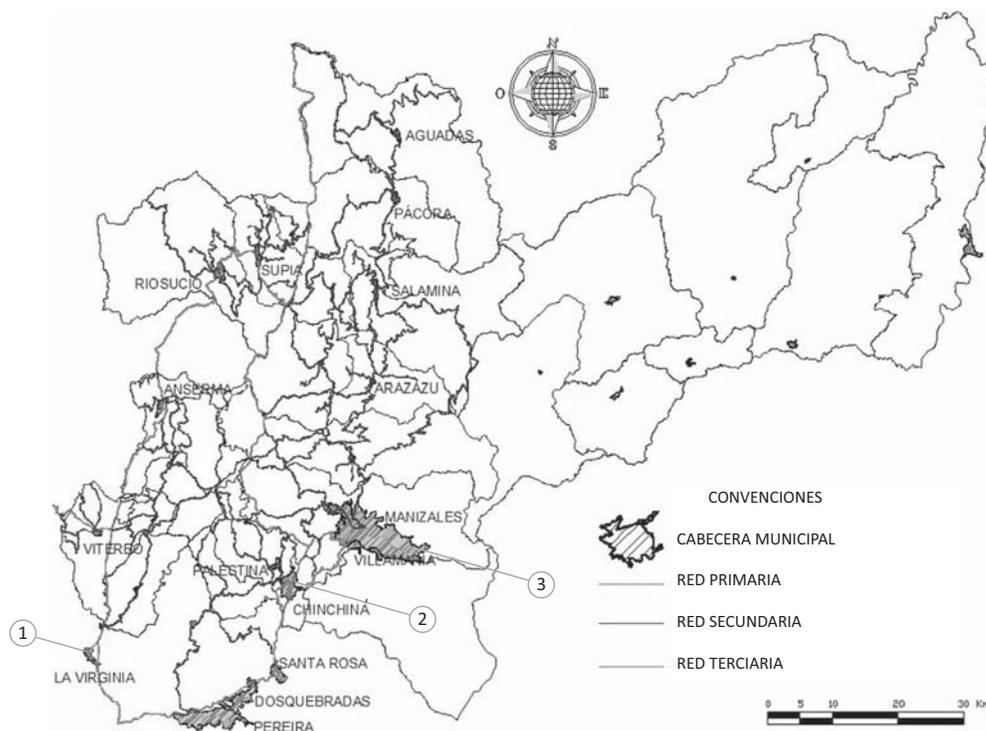


Figura 1. Red vial analizada y posibles puntos de distribución de GNC.

– INVÍAS [14], en donde, de acuerdo con el tipo de terreno, se establecen los valores de velocidad de operación y se complementaron con medidas de campo por el método del vehículo flotante.

Para el cálculo de la accesibilidad media integral desde las poblaciones de La Virginia, Chinchiná y Manizales, se obtienen los tiempos promedios mínimos de viaje y los costos promedio mínimos entre cada uno de los nodos de la red analizada y el nodo que referencia la población en particular, conformando una matriz unimodal de distancias. De esta forma se genera el vector de tiempos medios de viaje entre un nodo específico y el resto de nodos que conforman la red, el cual será el insumo con el que se alimentará el software geostadístico que permite graficar las curvas isócronas de accesibilidad integral. A los valores obtenidos en las matrices se les realiza un adecuado tratamiento estadístico, con el fin de establecer cuál es el método de interpolación de valores más apropiado, lo cual permite obtener pronósticos de la variable tiempo de viaje en diferentes puntos del territorio de una manera más confiable.

ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD

ANÁLISIS GEOGRÁFICO RESPECTO AL TIEMPO DE VIAJE ENTRE POSIBLES ORÍGENES DE DISTRIBUCIÓN

Desde cada uno de los posibles orígenes de distribución, se obtuvieron curvas isócronas de accesibilidad integral según la variable tiempo de viaje y según el tipo de vehículo, lo cual permitió realizar una comparación entre matrices de viaje y obtener las curvas gradiente de accesibilidad integral entre cada posible origen. Se encuentra entonces que, según la variable tiempo medio de viaje en vehículo articulado o pesado, es óptimo distribuir desde Chinchiná, ya que se cubre una mayor área del territorio a servir con menores gradientes de tiempo, al ser comparado con los orígenes La Virginia y Manizales. Es de aclarar que la categoría de la vía, el estado de la superficie de rodadura, y el tipo de terreno por el cual se desarrolla toda la infraestructura vial analizada, son variables muy influyentes en los resultados obtenidos.

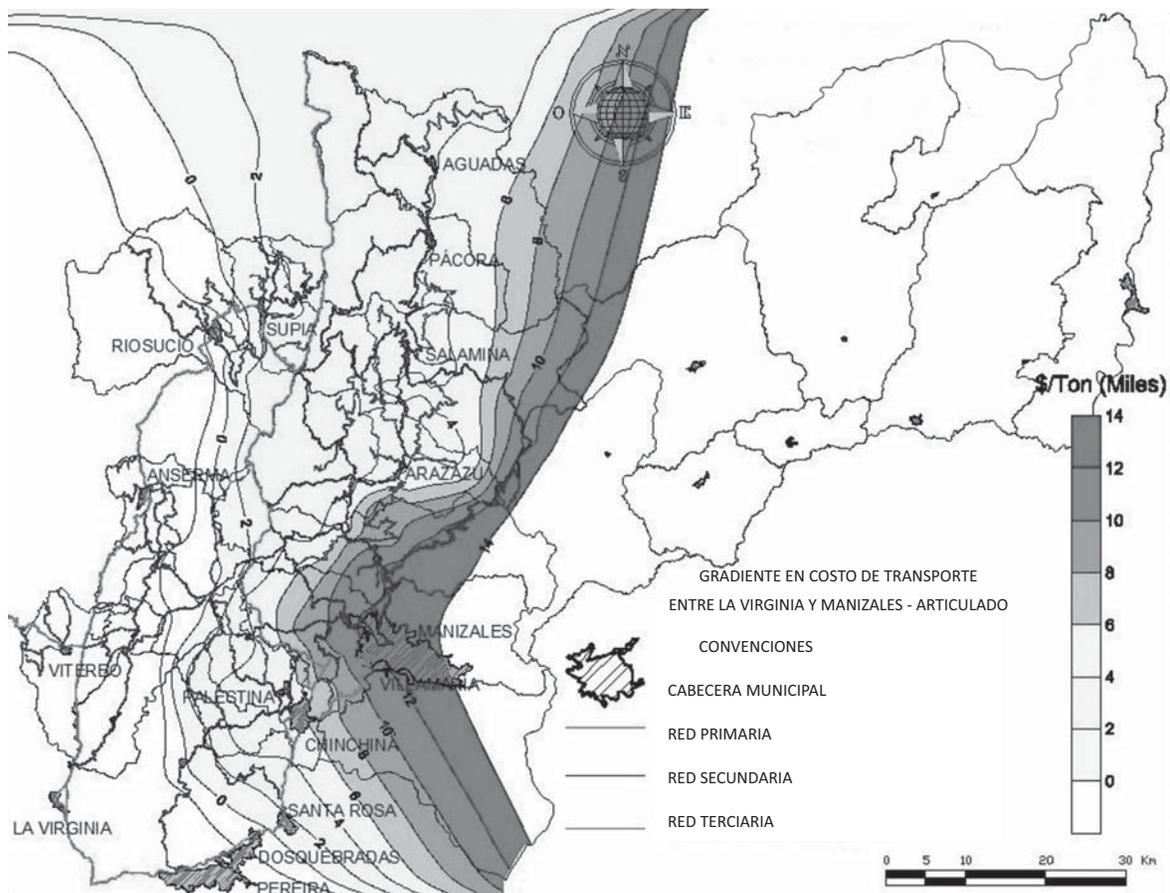


Figura 2. Gradiente en \$/Ton en vehículo articulado entre La Virginia y Manizales

ANÁLISIS GEOGRÁFICO RESPECTO A COSTOS EN \$/TON ENTRE POSIBLES ORÍGENES DE DISTRIBUCIÓN

Para cada uno de los posibles orígenes de distribución, se obtuvieron curvas según la variable costo del transporte y tipo de vehículo, lo cual permitió realizar una comparación entre matrices de costo y obtener las curvas gradiente en \$/Ton entre cada par de orígenes (ver ejemplo Figura 2). Se puede apreciar en las curvas gradientes en \$/Ton, para vehículo pesado entre La Virginia y Chinchiná, que al comparar estos resultados con los obtenidos para el mismo par de orígenes de distribución, pero en vehículo articulado, existe una mayor variación en \$/Ton para el corredor norte, que para el corredor occidente.

Por medio de este análisis se puede observar que el sitio más estratégico respecto a costos de transporte para la distribución corresponde al municipio de Chinchiná, tanto para vehículos articulados como para vehículos pesados.

ANÁLISIS DE MATRICES DE COSTO (\$/TON) ENTRE POSIBLES ORÍGENES

Los análisis de accesibilidad por tiempo y distancia presentan alternativas a considerar cuando el tipo de contratación con terceros se hace por dichas variables, es decir, que si el cobro del transporte se contrata por distancia recorrida, el parámetro a utilizar es la distancia. Por lo tanto, el análisis por costos de transporte en \$/Ton, puede representar un valor muy significativo a ser considerado de acuerdo con la estructura de pago vigente, lo que puede contrastar con los valores de los costos reales a los que se ve enfrentado el transportador. A continuación se presentan los dos métodos para análisis de costos.

MÉTODO DE LA MATRIZ DE COSTOS DE TRANSPORTE DE CREG

El documento “Compresión y Transporte de Gas Natural Comprimido” [12], expone los antecedentes del proceso de comercialización de gas, los proyectos en el país, algunos aspectos técnicos relacionados con su manejo y la competitividad. A partir de este documento, se realiza una estimación de la función de costo medio de transporte para diferentes escenarios, según el tipo de carretera, tipo de vehículo y tipo de capacidad de carga para obtener finalmente una matriz de costos de transporte entre cada par de origen – destino. Es importante precisar que dichos costos referidos por la CREG se calcularon para cada condición de operación de las carreteras, mediante la utilización de la rutina VOC (Vehicle Operating Costs) del modelo HDM III.

Con lo anterior se obtiene la matriz de costo para cada par origen – destino, en \$/m³ (ver Figura 3). Para todos los casos, en las poblaciones Aranzazu, Salamina, Pácora y Aguadas (corredor norte) se consideró el transporte en camión pesado por las restricciones geométricas que impiden la operación en

estas vías. Así mismo, para las poblaciones de Viterbo, Anserma, Riosucio y Supía (corredor occidente) se consideró el uso de camión articulado por ser más económico y porque la infraestructura vial permite la operación de estos vehículos.

MÉTODO DE LA MATRIZ DE COSTOS DE TRANSPORTE SEGÚN INVÍAS – SIG

Consistió en procesar los diferentes datos recopilados de múltiples fuentes, especialmente, los datos del INVÍAS, con respecto a las principales características de operación vehicular. Lo anterior corresponde a información oficial y fundamentalmente incluye la red de carreteras georeferenciada de la zona de influencia del proyecto, el inventario vial, el reporte de emergencias viales sobre la red vial, los costos de operación y las velocidades de operación, entre otros. También se utilizaron los datos suministrados por Gas Natural del Centro S.A. E.S.P. (actualmente EFIGAS S.A.), en cuanto a la capacidad de los vehículos y se mantienen los mismos lineamientos del análisis anterior. El SIG permite hacer una estimación de las diferentes tipos de carretera, tipo de vehículo, tipo de superficie, estado, días de emergencia (cierre vial), peajes, mejor ruta, para obtener finalmente una matriz de costos de transporte entre cada par de origen – destino (ver Figura 4).

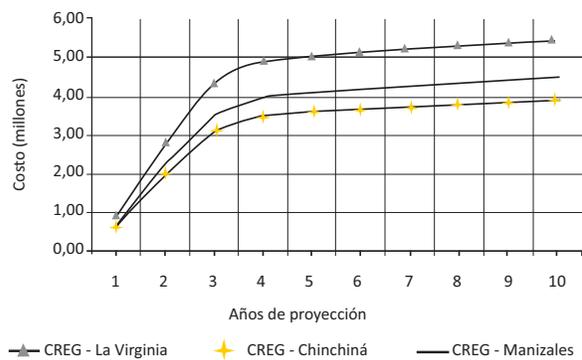


Figura 3. Costo total anual de todas las poblaciones según los diferentes orígenes. Matriz CREG

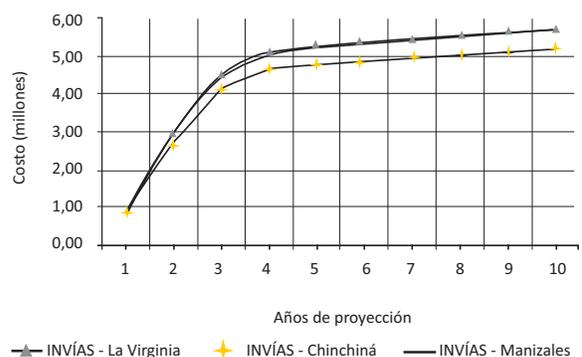


Figura 4. Costos anuales despatchando desde los diferentes orígenes. Considerando peajes, costos, Matriz INVÍAS.

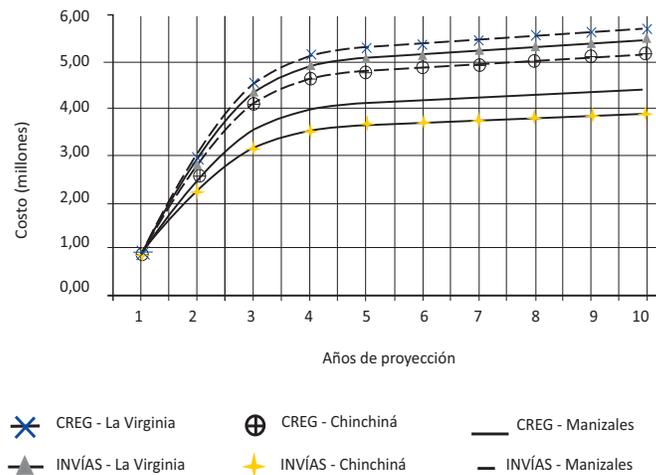


Figura 5. Comparación de costos Matriz CREG y Matriz INVÍAS

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, conjugando las variables analizadas en términos de tiempo de viaje y costo (\$/ton) se presentan dos alternativas, donde la primera consiste en definir dos puntos de distribución, uno ubicado en el municipio de Manizales que se encargue del abastecimiento hacia el corredor norte mediante vehículos pesados y otro punto de distribución localizado en la ciudad de La Virginia encargado del abastecimiento hacia el corredor occidente por medio vehículos articulados. La segunda alternativa, consiste en establecer una única estación de distribución en el municipio de Chinchiná, que se encargue del suministro del producto hacia los dos corredores analizados (corredor norte y corredor occidente), dadas sus condiciones de localización geográfica en la zona, así como sus características de infraestructura y conectividad.

Se concluye que el municipio de Chinchiná es el lugar más estratégico para la instalación de una planta de distribución, en razón a la variable de tiempo de viaje y \$/Ton, considerando la cobertura del territorio de ambas variables, para la distribución de Gas Natural Comprimido.

En términos generales, las zonas más cercanas a los sitios de distribución pueden ser abastecidas mediante la programación de camiones pesados, en razón a que el gradiente de costos entre ambos tipos de vehículos es menor para distancias relativamente cortas. Las grandes diferencias que presentan los resultados encontrados al realizar el análisis de costos de transporte por ambas metodologías se presentan en la Figura 5, éstas pueden deberse a diferentes factores, entre los que se pueden considerar los siguientes:

- La matriz del CREG se actualiza con el IPC, sin embargo, éste no es igual al incremento en la canasta del transporte, siendo generalmente esta última mayor que el IPC.
- La infraestructura vial no es estática en el tiempo, siendo común que sea mayor el deterioro en el tiempo que la mejora de sus condiciones físicas, lo que guarda relación directa con los costos de operación vehicular.
- En los últimos años han aparecido nuevas concesiones viales en el país que traen consigo la instalación de nuevos peajes, impactando también la estructura de costos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Izquierdo. *Transportes. Un enfoque Integral*. Madrid: Servicio de publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. 1994, pp. 428
- [2] J. Morris, P. Dumble and M. Wigan. Accessibility indicators in transport planning. *Transportation Research*. Vol. 13A Nov, 1978, pp. 91 - 109
- [3] X. Zhu and S. Liu. "Analysis of the impact of the MRT system on accesibility in Singapore using an integrated GIS tool". *Journal of Transport Geography*, Vol. 4 No. 12 June, 2004, pp. 89 - 101
- [4] "Accessibility Measures: Review and Applications. Evaluation of Accessibility Impacts of Land-use Transport Scenarios, and Related Social and Economic Impacts." K. Geurs and J. Ritsema Van Eck. National Institute of Public Health and the Environment.

- Available in: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/408505006.pdf>
- [5] D. Biehl. "The role of infrastructure in regional development." In: *Infrastructure and Regional Development*. R.W Vickerman (ed) London: Pion, 1991, pp. 9 - 35
- [6] J. Gutierrez, A. Condeco-Melhorado, & J. Martín. Using Accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*. Vol.,18, No. 1, January, 2010, pp. 141-152.
- [7] O. Kotavaara, H. Antikainen and J. Rusanen. "Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970–2007". *Journal of Transport Geography*. Vol., 19, No. 44, July 2011, pp. 926-935.
- [8] E. López, J. Gutiérrez and G. Gómez. "Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investment: an accessibility approach". *European Planning Studies*. Vol.,16 No. 2, February 2008, pp. 277–301.
- [9] R. Vickerman, K. Spiekermann and M. Wegener. "Accessibility and economic development in Europe". *Regional Studies*. Vol., 33 No.1, 1999, pp. 1-15.
- [10] D. MacKinnon, G. Pirie and M Gather. "Transport and economic development". In: *Transport Geographies: Mobilities, Flows and Spaces*. R. Knowles. J. Shaw, & I. Docherty, (Eds). Oxford: Blackwell Publishers, 2008, pp. 10 - 28
- [11] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. Cartilla de Volúmenes de Tránsito. Bogotá: Oficina Asesora de Planeación. 2006.
- [12] Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG. "Compresión y Transporte de Gas Natural Comprimido - GNC: Propuesta Regulatoria para Consulta". Bogotá: CREG - 048. 2004.
- [13] Gobernación de Caldas. "Plan Vial de Caldas 2008 - 2017". Manizales, 2009.
- [14] "Volúmenes de Tránsito 2007 – Territorial Caldas". Instituto Nacional de Vías - INVÍAS. Fecha de Consulta 08/15/09. Disponible: www.invias.gov.co