

# **Aplicación de una propuesta metodológica de Estudio de Accesibilidad Territorial para la distribución de gas natural comprimido y análisis de sus costos de transporte**

ESCOBAR, Diego\_A.; GARCÍA, Francisco\_J.; VÁSQUEZ, Luis\_Ricardo. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Civil.  
daescobarga@bt.unal.edu.co    ffgarciaor@bt.unal.edu.co    lrvasquezv@unal.edu.co

## **RESUMEN**

En el desarrollo del presente estudio se realizó un diagnóstico y una comparación de las condiciones de accesibilidad para el suministro de Gas Natural Comprimido (GNC) en una región específica del Departamento de Caldas (Colombia), teniendo en cuenta las proyecciones de consumo del producto y las diferentes variables de tipo geográfico e infraestructuras de transporte que permitan una eficiente logística en la 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 presta especial atención a las variables distancia, tiempo de viaje, menor camino de conexión entre las poblaciones y los posibles centros de distribución. Se realiza un análisis multicriterio de las variables asociadas con la red, incluyendo estado de la vía, tipo de vía, vulnerabilidad respecto a urgencias manifiestas sobre la vía y consumo ponderado de gas natural.

Se proponen los posibles puntos de distribución del producto y se muestra cómo la metodología de obtención de costos de transporte de GNC, establecida por el Gobierno Central, se encuentra desactualizada y difiere de resultados obtenidos a partir de información primaria.

**Palabras claves:** Accessibility, Transport, Compressed Natural Gas, Logistics.

## **ABSTRACT**

A comprehensive analysis and a comparison of results of the accessibility conditions of the Compressed Natural Gas (GNC) supply in a specific region of Caldas (Colombia) were done in the course of 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. Special attention is given to variables such as distance, travel time, shortest road connection between towns and the possible distribution points. A multi-criteria analysis of the variables associated with the network was done, which included road condition, road type, vulnerability regarding road emergencies, and weighted consumption of natural gas.

As result, the possible GNC distribution points were selected. It was shown that the methodology set by the central government and used to obtain GNC transportation costs is out-of-date, thus the results differ from the ones obtained using field information.

**Keywords:** Accessibility, Transport, Compressed Natural Gas, Logistics

# 1. METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS

Por medio de un Sistema de Información Geográfico (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 (Ver Figura 2), 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.

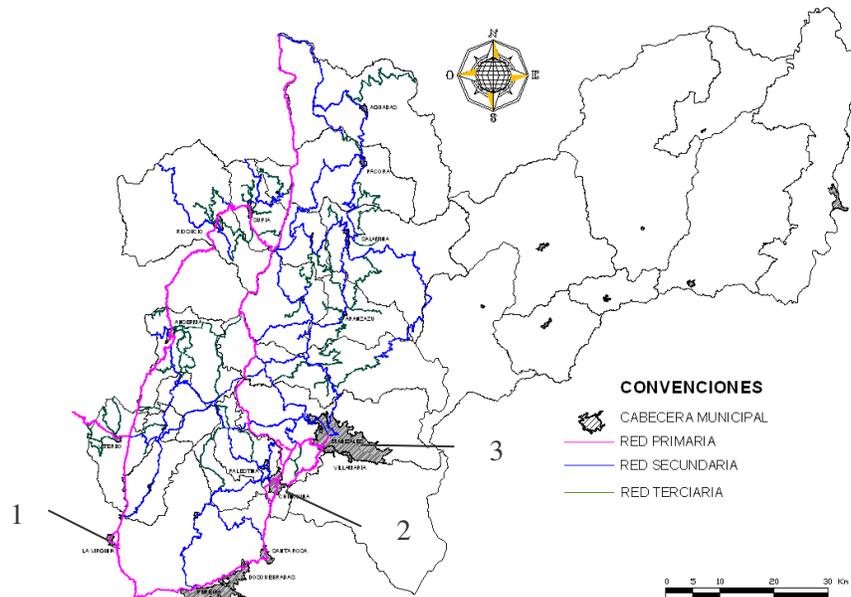


Figura 1. Red Vial analizada y posibles puntos de distribución de GNC.



Figura 2. Vehículos de transporte analizados, pesado (3 ejes) y articulado (5 ejes).

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 – INVÍAS – [INVÍAS (2006)], en donde, de acuerdo con el tipo de terreno, se establecen los valores de velocidad de operación. Para esto se consideró la siguiente hipótesis: la velocidad de operación en estado de superficie Regular y en estado Malo se toma como el 75% y el 50% del valor de velocidad establecido por la mencionada Agencia Vial para cada uno de los tipos de terreno (Plano, Ondulado y Montañoso), respectivamente (Ver Tabla 1).

Para el cálculo de la Accesibilidad Media Integral desde las poblaciones de La Virginia, Chinchiná y Manizales, se obtienen los tiempos promedio 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 geoestadístico 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.

**Tabla 1. Velocidades establecidas para el análisis según el tipo de vehículo, el tipo de superficie de rodadura y el estado de ésta.**

VEHICULO PESADO (Km./h.)				VEHÍCULO ARTICULADO (Km./h.)			
CAMINO EN GRAVA	B	R	M	CAMINO EN GRAVA	B	R	M
P	41.00	30.75	20.5	P	36.00	27.00	18.00
O	36.00	27.00	18.00	O	33.00	24.75	16.50
M	25.00	18.75	12.50	M	25.00	18.75	12.50

PAVIMENTO	B	R	M	PAVIMENTO	B	R	M
P	48.00	36.00	24.00	P	63.00	47.25	31.50
O	36.00	27.00	18.00	O	47.00	35.25	23.50
M	24.00	18.00	12.00	M	29.00	21.75	14.50

P (Plano), O (Ondulado), M (Montañoso).  
 B (Bueno), R (Regular), M (Malo)

Antes de definir cual 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 este 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 (1):

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n} \quad (1)$$

En donde;

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, como por ejemplo el método Kriging, si el vector posee Homocedasticidad, igualdad en la varianza, es posible aplicar el método.

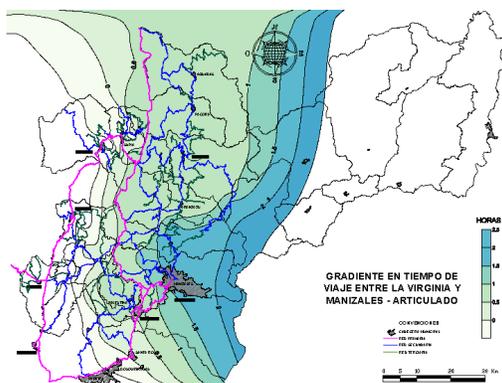
Luego del análisis estadístico, se determina el método de interpolación a usar, y con el fin de asegurar un resultado estadísticamente confiable, se realiza la validación cruzada de los datos; en este proceso, se comparan los valores observados con los valores estimados por el modelo de interpolación 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, dicho 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 INVIAS, del Plan Vial de Caldas (Gobernación de Caldas, 2009) y de la aplicación del SIG, se comparan con la matriz de costos generada por la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG.

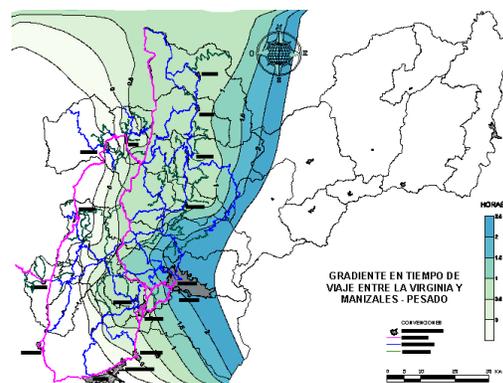
## 2. ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD

### 2.1 ANÁLISIS GEOGRÁFICO RESPECTO AL TIEMPO DE VIAJE ENTRE POSIBLES ORÍGENES DE DISTRIBUCIÓN.

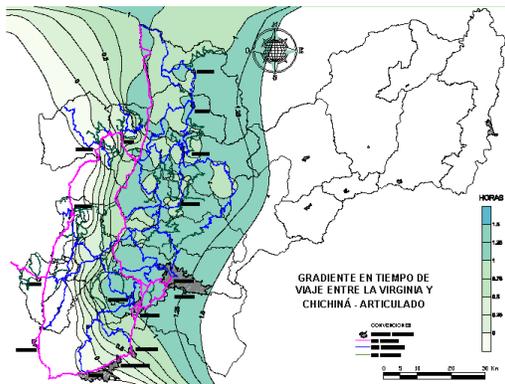
Desde cada uno de los posibles orígenes de distribución, se obtuvieron curvas isócronas de Accesibilidad Integral según la variable tiempo de viaje y según el tipo de vehículo, lo cual permitió realizar una comparación entre matrices de viaje y obtener las curvas gradiente de accesibilidad integral entre cada posible origen (Ver Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, y Figura 8). El impacto de transportar en vehículo articulado o en vehículo pesado es mayor a lo largo del Corredor Norte si se comparan los orígenes anteriormente mencionados; mientras que para el Corredor Occidente, el impacto de transportar en vehículo articulado o pesado es prácticamente nulo analizado desde la variable de tiempo medio de viaje.



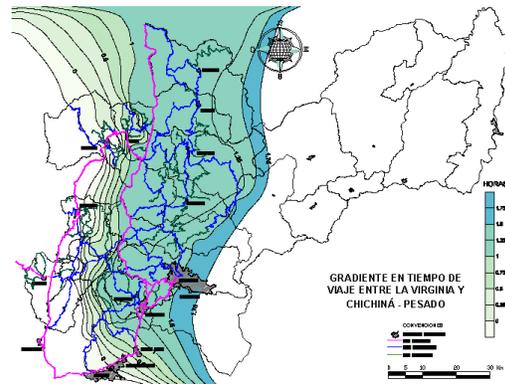
**Figura 3. Gradiente en Tiempos Medios de Viaje en vehículo articulado entre La Virginia y Manizales**



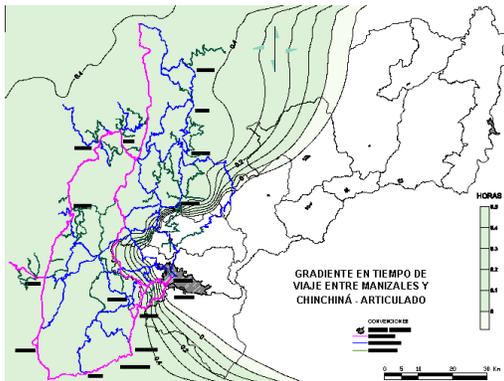
**Figura 4. Gradiente en Tiempos Medios de Viaje en vehículo pesado entre La Virginia y Manizales**



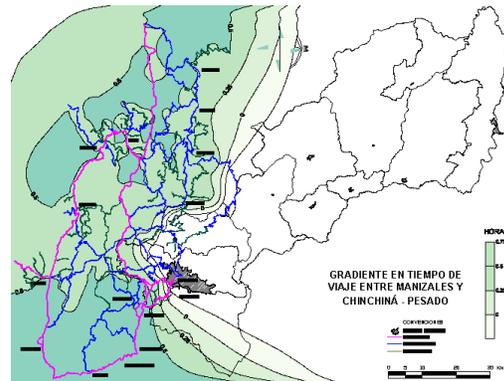
**Figura 5. Gradiente en Tiempos Medios de Viaje en vehículo articulado entre La Virginia y Chinchiná**



**Figura 6. Gradiente en Tiempos Medios de Viaje en vehículo pesado entre La Virginia y Chinchiná**



**Figura 7. Gradiente en Tiempos Medios de Viaje en vehículo articulado entre Manizales y Chinchiná**

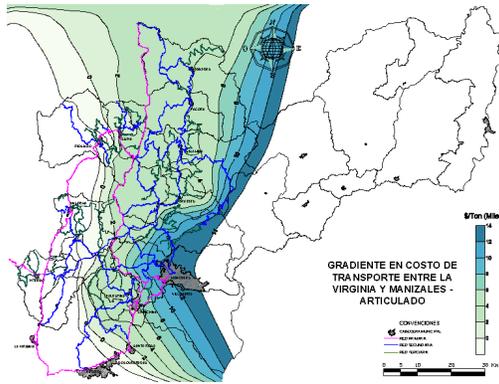


**Figura 8. Gradiente en Tiempos Medios de Viaje en vehículo pesado entre Manizales y Chinchiná**

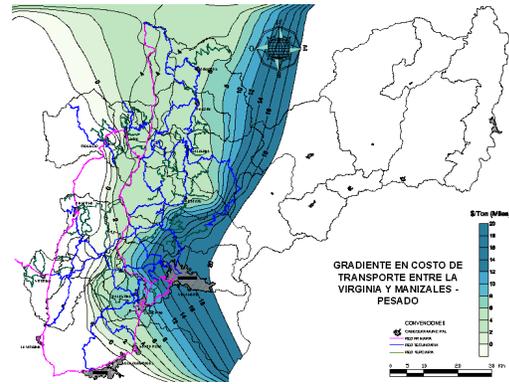
Se encuentra entonces que, según la variable tiempo medio de viaje en vehículo articulado o pesado, es óptimo distribuir desde Chinchiná, ya que se cubre una mayor área del territorio a servir con menores gradientes de tiempo, al ser comparado con los orígenes La Virginia y Manizales. Es de aclarar que 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.

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

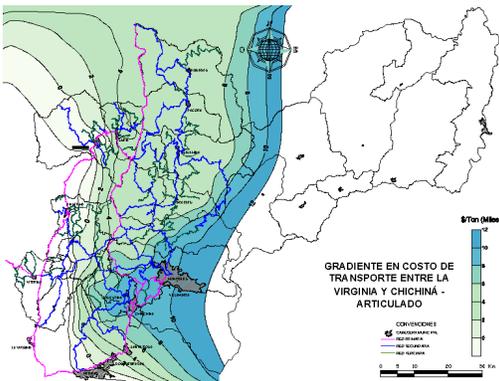
Para cada uno de los posibles orígenes de distribución, se obtuvieron curvas según la variable costo del transporte y tipo de vehículo, lo cual permitió realizar una comparación entre matrices de costo y obtener las curvas gradiente en \$/Ton entre cada par de orígenes (Ver Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, y Figura 14). 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, así mismo si se confrontan estos resultados con los obtenidos al comparar La Virginia con Manizales, se observa que para dicho caso las poblaciones que presentaban mayor diferencial son Neira y Manizales, lo cual no sucede en la comparación La Virginia – Chinchiná, ya que para esta, la variación se presenta en todas las poblaciones del Corredor Norte.



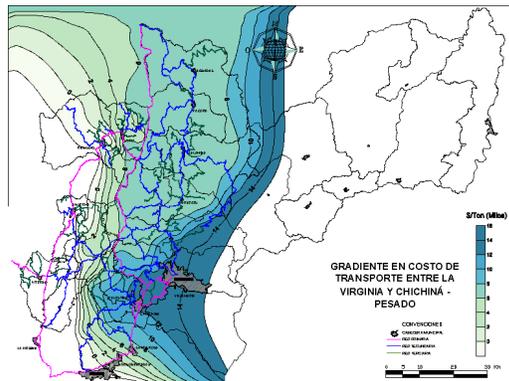
**Figura 9. Gradiente en \$/Ton en vehículo articulado entre La Virginia y Manizales**



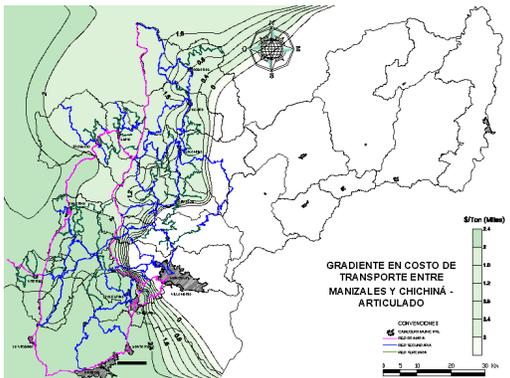
**Figura 10. Gradiente en \$/Ton en vehículo pesado entre La Virginia y Manizales**



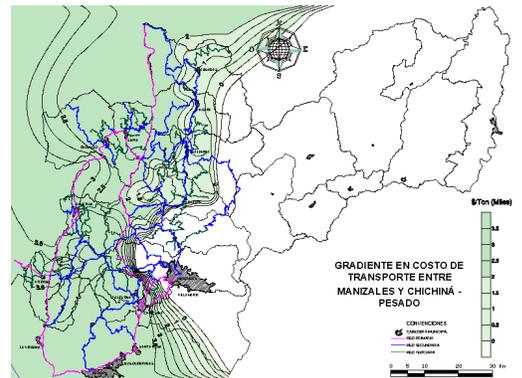
**Figura 11. Gradiente en \$/Ton en vehículo articulado entre La Virginia y Chinchiná**



**Figura 12. Gradiente en \$/Ton en vehículo pesado entre La Virginia y Chinchiná**



**Figura 13. Gradiente en \$/Ton en vehículo articulado entre Manizales y Chinchiná**



**Figura 14. Gradiente en \$/Ton en vehículo articulado entre Manizales y Chinchiná**

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, en consideración a su localización geográfica en la zona en estudio y teniendo en cuenta las condiciones físicas, geométricas, geomorfológicas y de emergencias que presenta la red de infraestructuras, la cual permite conectar una mayor superficie territorio con menores diferencias de costos.

### 2.3 ANÁLISIS DE RUTAS ÓPTIMAS DESDE LOS POSIBLES ORÍGENES DE DISTRIBUCIÓN.

Desde La Virginia, las rutas óptimas para el Corredor Occidente son las mismas, tanto para transporte en vehículo articulado como pesado en el análisis de las tres variables (Ver Figura 15); mientras que para el Corredor Norte, las rutas óptimas son diferentes según la variable seleccionada, encontrando que para la distribución según las variables longitud y tiempo de viaje, existen dos rutas para llegar a las poblaciones objeto, y para la distribución según el costo existiría una sola ruta óptima para todo el corredor.

La variable longitud nos muestra que existen cuatro rutas óptimas desde Manizales para distribuir al Corredor Occidente, mientras para el Corredor Norte existe una sola ruta óptima (Ver Figura 16); así mismo, respecto a la variable tiempo de viaje existen tres rutas óptimas para distribuir hacia el Corredor Occidente, tanto para vehículo articulado como pesado, mientras que existen dos rutas óptimas para la distribución al Corredor Norte, encontrando diferencia entre la ruta de distribución si es en vehículo articulado o pesado. Con respecto a las variables de costos, tenemos que existen tres rutas óptimas de distribución para el Corredor Occidente y una sola ruta óptima de distribución para el corredor Norte.

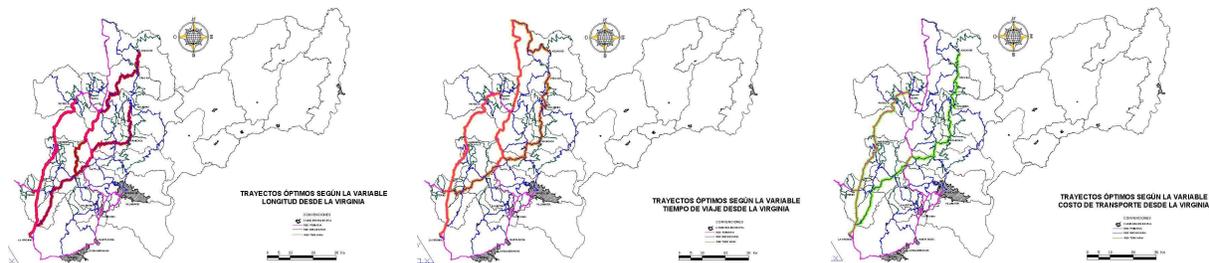


Figura 15. Rutas óptimas de distribución desde La Virginia según variables de longitud, tiempo de viaje y costo

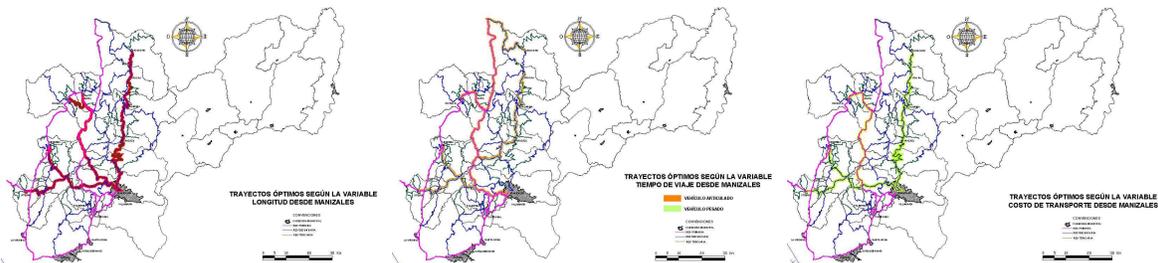
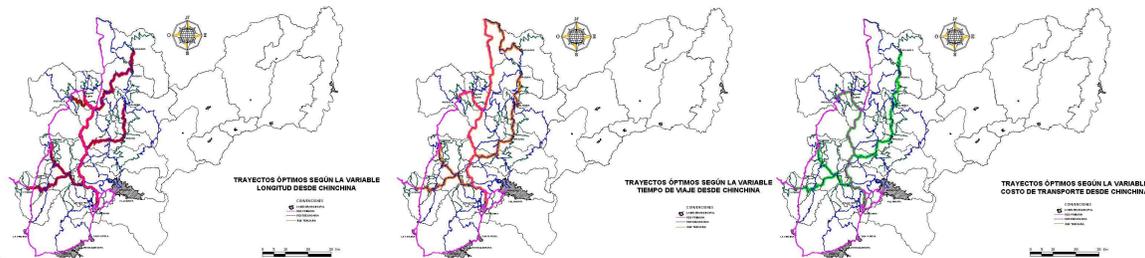


Figura 16. Rutas óptimas de distribución desde Manizales según variables de longitud, tiempo de viaje y costo

Con respecto a la variable longitud, existen cuatro rutas óptimas desde Chinchiná para distribuir al Corredor Occidente (Ver Figura 17), mientras para el Corredor Norte existen dos rutas optima; así mismo, respecto a la variable tiempo de viaje existen tres rutas óptimas para distribuir hacia el Corredor Occidente, mientras que existen dos rutas óptimas para la distribución al Corredor Norte, tanto para vehículo articulado como pesado; por su parte, analizando la variable costos, tenemos que existen tres rutas óptimas de distribución para el Corredor Occidente y una sola ruta óptima de distribución para el corredor Norte.



**Figura 17. Rutas óptimas de distribución desde Chinchiná según variables de longitud, tiempo de viaje y costo**

### 3. 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 cuando la existencia de una estructura de pago vigente, 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 la Comisión de Regulación de Energía y Gas de Colombia – CREG.
- Método de costos de transportes obtenidos mediante análisis de datos INVÍAS – SIG.

#### 3.1 MÉTODO DE LA MATRIZ DE COSTOS DE TRANSPORTE DE CREG

El documento “Compresión y Transporte de Gas Natural Comprimido” (CREG, 2004) expone los antecedentes del proceso de comercialización de gas, los proyectos en el país, algunos aspectos técnicos relacionados con su manejo y la competitividad; con esto 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. Ahora bien, con el fin de expresarla en volumen ( $m^3$ ), tienen en cuenta lo siguiente:

- Se considera que el camión rígido puede transportar hasta 5 módulos de almacenamiento de  $300 m^3$ , los cuales llevan  $1500 m^3$ .
- El camión articulado transporta hasta 18 módulos de  $300 m^3$ , los cuales llevan  $5400 m^3$ .
- Cada módulo de almacenamiento pesa, lleno de gas, 2 toneladas.
- Cada módulo de almacenamiento tiene un peso en condiciones vacías de 1,6 toneladas.
- Se reconoce el costo de transporte desde la estación de compresión hasta la estación de descompresión con los módulos llenos y el regreso del camión con los módulos vacíos para ser nuevamente llenados.
- La actualización de la matriz se hará con el Índice de Precios al Consumidor (IPC) de acuerdo con lo establecido en el estudio de Duarte Guterman & Cía. Ltda. [CREG, (2004)].

Con lo anterior se obtiene la matriz de costo para cada par origen – destino, en  $\$/m^3$  (Ver Figura 18). 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 por que la infraestructura vial permite la operación de estos vehículos.

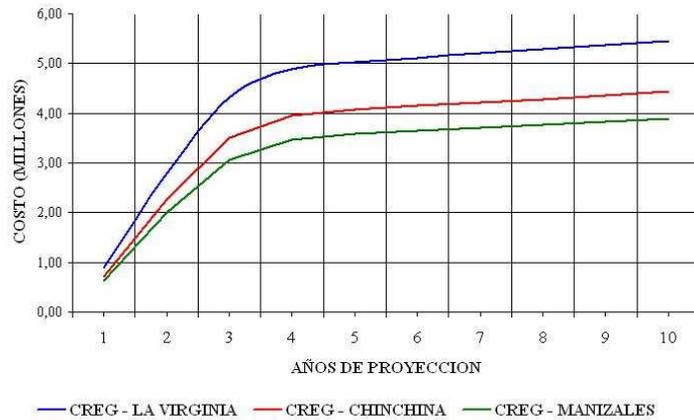


Figura 18. Costo total anual de todas las poblaciones según los diferentes orígenes. Matriz CREG.

### 3.2 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 Sistema de Información Geográfica permite hacer una estimación de las diferentes tipos de carretera, tipo de vehículo, tipo de superficie, estado de la misma, días de emergencia, mejor ruta, para obtener finalmente una matriz de costos de transporte entre cada par de origen – destino. Para lo obtención de los costos de transporte (Ver Figura 19) se tiene en cuenta lo siguiente:

- Se incluye el costo del regreso del vehículo con los contenedores vacíos.
- Se incluye un costo adicional del 2,5%, al considerarse el transporte de una mercancía peligrosa (Ver Decreto 1609 de 2002 del Ministerio del transporte. República de Colombia).
- Se incluye el costo de los peajes.

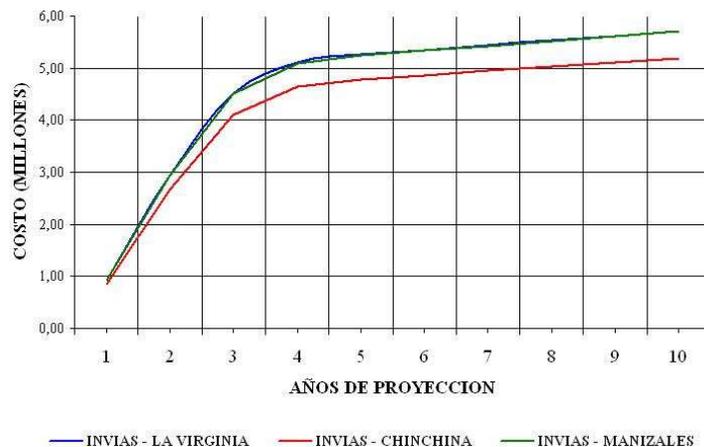


Figura 19. Costos anuales despachando desde los diferentes orígenes. Considerando peajes Costos Matriz INVÍAS.

## 4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, podemos concluir que conjugando las variables analizadas en términos de tiempo de viaje y costo (\$/ton) se presentan dos alternativas: La primera, es la de definir dos puntos de distribución: el primero ubicado en el municipio de Manizales que se encargue del abastecimiento hacia el corredor Norte mediante vehículos pesados y un punto de distribución localizado en la ciudad de La Virginia encargado del abastecimiento hacia el corredor Occidente por medio vehículos articulados. La segunda, 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 – GNC. 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 20, estas 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.

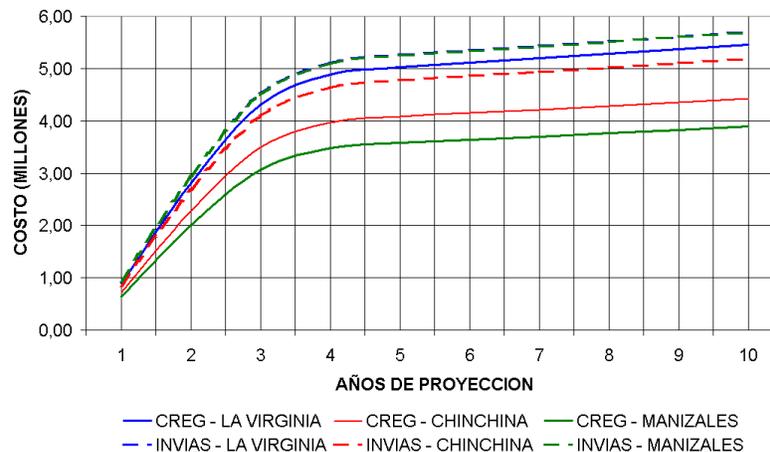


Figura 20. Comparación de costos Matriz CREG y Matriz INVÍAS

## REFERENCIAS

- Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG. (2004). “Compresión y Transporte de Gas Natural Comprimido – GNC: Propuesta Regulatoria para Consulta”. CREG – 048.
- Gobernación de Caldas. (2009). “Plan Vial de Caldas 2008 – 2017”. Manizales, Febrero de 2009
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. (2006). *Cartilla de Volúmenes de Tránsito*. Oficina Asesora de Planeación.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. (2007) – Documentos Técnicos. Volúmenes de Tránsito 2007 – Territorial Caldas, <http://www.invias.gov.co>, 08/15/09.