

# Metodología de decisión para determinar la mejor estrategia de operación de un sistema de poliductos en Ecopetrol

## Mario Castillo

Matemático, M.Sc. en Administración y en Análisis y Probabilidad. Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.  
*mcastill@uniandes.edu.co*

## Álvaro Mendoza

Ingeniero Industrial, M.Sc. en Ingeniería Industrial. Instructor, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá D.C., Colombia.  
*a-mendoz@uniandes.edu.co*

## PALABRAS CLAVE

Sistema de poliductos, hurto de combustible, análisis de decisiones, análisis de riesgo, simulación de Montecarlo, proceso analítico jerárquico.

## KEYWORDS

Pipeline system, decision analysis, risk analysis, Montecarlo simulation, analytic hierarchy process.

**RESUMEN** La Empresa Colombiana de Petróleos ECOPE-TROL S.A. ha finalizado la construcción de un poliducto nuevo y debe seleccionar la mejor alternativa para la operación durante los próximos 20 años del sistema de poliductos que permite el transporte y suministro del combustible a la capital del país. Este trabajo presenta una Metodología de Análisis de Decisiones soportada en modelos de simulación, análisis de riesgo y Proceso Analítico Jerárquico, la cual tiene en cuenta criterios cuantitativos y cualitativos para seleccionar la mejor alternativa.

**ABSTRACT** The Colombian Petroleum Company ECOPE-TROL has finished the construction of a new pipeline. The company must select the best alternative to operate the pipeline system that transports and provides fuel to the capital of the country for the next 20 years. This article presents a structured decision analysis methodology that considers quantitative and qualitative decision criteria to select the best alternative. The alternative is supported in simulation and risk analysis models, and in Analytic Hierarchy Process (AHP).

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta la aplicación de una metodología de decisión desarrollada para ayudar a la Vicepresidencia de Transporte de ECOPETROL a tomar una decisión acerca de la mejor alternativa para la operación del sistema de poliductos, que permite el transporte y suministro del combustible a Bogotá y sus áreas de influencia durante los próximos años. Éste es un problema de decisión complejo debido a su impacto económico, al gran número de alternativas a considerar y al alto nivel de incertidumbre generado por la presencia de variables como la demanda y el hurto de combustible.

Para solucionar el problema se utilizó una metodología general de análisis de decisiones, diseñada por Mario Castillo. Con la ayuda de esta metodología, se estructuró el problema, definiendo los principales aspectos, actores y variables, así como los criterios de decisión y las alternativas de solución del mismo, tal como se muestra en la sección 2. Una vez estructurado el problema, se diseñó una metodología de análisis específica para solucionarlo, la cual se describe en la sección 3. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos y en la sección 5 se sintetizan las principales conclusiones y recomendaciones del trabajo.

## ESTRUCTURACIÓN DEL PROBLEMA

En la estructuración del problema se identificaron sus aspectos principales, los actores que intervienen o se ven afectados por el mismo, las variables más relevantes para el análisis de la decisión, los criterios para evaluar y seleccionar las alternativas y, por último, el conjunto de alternativas que se considerarían en el análisis.

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con estimaciones realizadas por ECOPE-TROL en el año 1995, la capacidad del sistema de transporte de combustible Salgar – Mansilla, utilizada para suministrar combustible a Bogotá, estaría copada para el año 1997, ocasionando problemas para

satisfacer los incrementos de demanda de Bogotá y su área de influencia. Adicionalmente, se consideraba estratégicamente importante contar con una ruta de transporte alterna que mejorara la confiabilidad del sistema. Por estas dos razones principales, en el año 1995 se aprobó el proyecto de construcción de un nuevo poliducto, que en adelante llamaremos Poliducto de Oriente, con una inversión del orden de US \$150 millones.

En el año 2003, el poliducto nuevo estaba terminado y la demanda de Bogotá y su área de influencia era bastante inferior a la estimada, y podía ser atendida con el sistema antiguo, razón por la cual no era fácilmente justificable su entrada en operación. En este contexto, ECOPETROL debía tomar una decisión acerca de la mejor alternativa para la operación del sistema de poliductos que permiten el transporte y suministro del combustible a Bogotá y sus áreas de influencia durante los próximos años.

La decisión debía ser tomada teniendo en cuenta que el problema involucraba varios aspectos, tales como el económico, el comercial, el técnico, la imagen institucional y la regulación, y diferentes actores tales como ECOPETROL, el Ministerio de Minas, el sindicato de la empresa (USO), el Gobierno y los grupos al margen de la ley. Los diferentes aspectos identificados y la interacción de los actores involucrados en el problema de decisión generan un alto número de variables relevantes para el problema, tales como costos operativos y de mantenimiento, costos laborales, inversiones adicionales, demanda y hurto de combustibles, entre otras.

## CRITERIOS DE DECISIÓN

Algunos de los aspectos identificados en el problema generaban las diferentes variables relevantes, mientras que otros estaban relacionados con los criterios de decisión. Para evaluar las diferentes alternativas para solucionar el problema de decisión descrito, el grupo decisor, integrado por ingenieros de ECOPE-TROL expertos en los diferentes aspectos del problema, y por el Vicepresidente de Transporte y otros

altos directivos, con la ayuda de los asesores, definió los siguientes criterios de decisión bajo los cuales se evaluarían las diferentes alternativas:

- **Confiabilidad:** corresponde al nivel de confiabilidad con el que se lograría abastecer la demanda de combustibles de Bogotá y su área de influencia al implementar las diferentes alternativas. Este nivel de confiabilidad depende tanto del número de sistemas de poliductos que estén operando simultáneamente como de la capacidad de estos sistemas, medida en miles de barriles diarios.
- **Desempeño Económico:** se refiere a los resultados económicos de las diferentes alternativas, medidos por el Valor Presente Neto (VPN) del Costo Total. Es importante anotar que para estimar este Costo Total no se tuvieron en cuenta aquellos costos que eran iguales para todas las alternativas.
- **Imagen Institucional:** se refiere a la imagen que proyectaría la empresa ante la opinión pública al optar por cada una de las alternativas de solución identificadas.

#### ALTERNATIVAS DE DECISIÓN

El grupo decisor identificó las diferentes alternativas y las dividió en tres grandes grupos: las que utilizan sólo el sistema Salgar - Mansilla, el cual cuenta con una línea de 8" y una línea de 10" para transportar gasolina y Gas (GLP), las que utilizan sólo el Poliducto de Oriente y, finalmente, las que utilizan ambos en forma conjunta. En cada uno de estos grupos se consideraron diferentes usos posibles de las líneas que conforman el sistema Salgar - Mansilla, así como la posibilidad de modificar o eliminar algunas estaciones existentes a lo largo del mismo. De esta manera, combinando los diferentes estados de las variables de decisión para cada uno de los grupos se obtuvo un conjunto inicial de 42 alternativas, el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

La estructuración del problema que se presentó en esta sección fue de gran utilidad para organizar la discusión con los decisores y para identificar con precisión las alternativas que se buscaba evaluar, y los criterios que se utilizarían.

#### METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA MEJOR OPERACIÓN DEL SISTEMA DE POLIDUCTOS

Se diseñó una metodología de 5 pasos, la cual se muestra en la Figura 2, para la selección y evaluación final de las alternativas para la operación del sistema de poliductos.

En cada una de las etapas hubo una interacción permanente con la Vicepresidencia de Transporte y el grupo de trabajo de ECOPETROL, de tal manera que los diferentes avances que se iban produciendo en el análisis del problema iban siendo validados por la empresa.

#### ANÁLISIS DE RESULTADOS

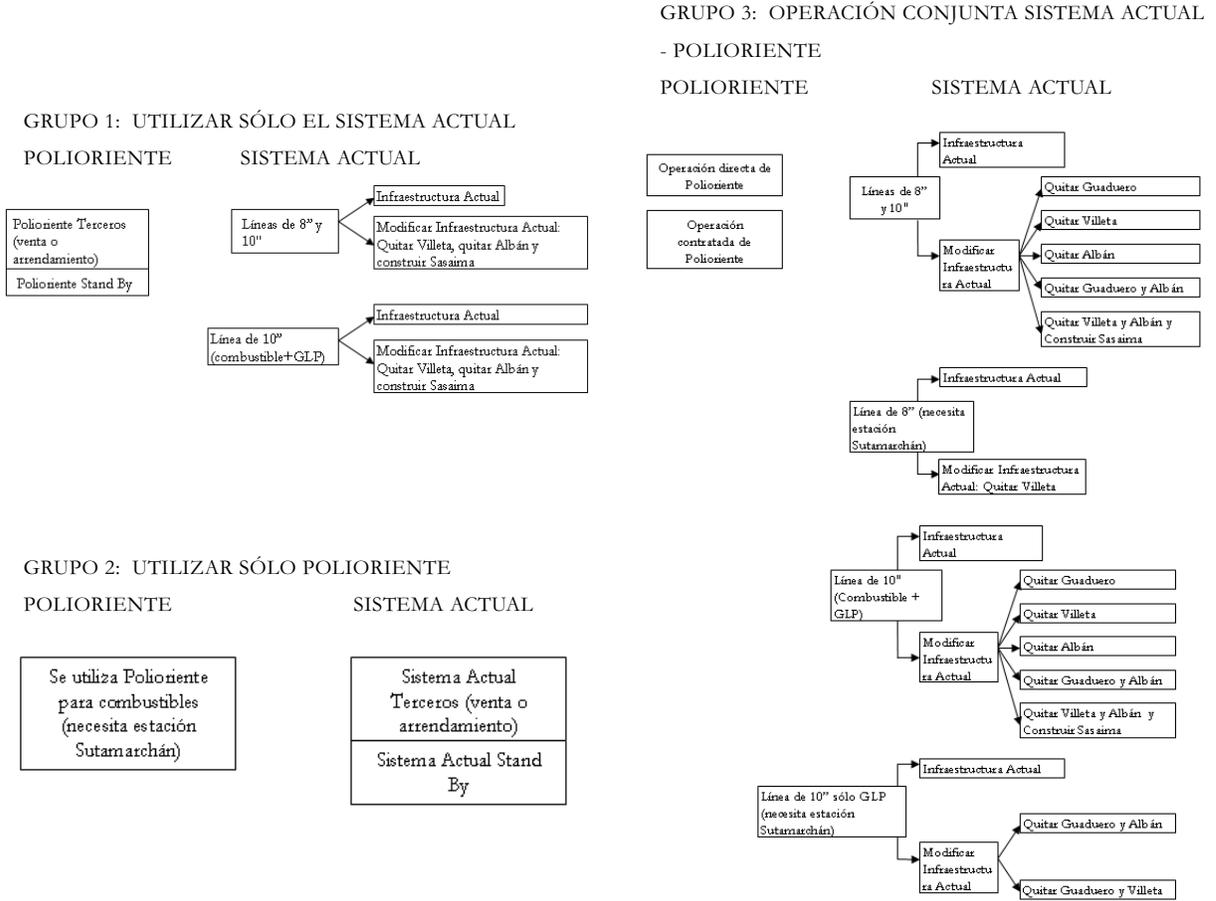
Al aplicar la metodología presentada anteriormente para determinar la mejor alternativa se obtuvieron los siguientes resultados:

##### Etapas 1: Eliminación Inicial de Alternativas

En esta primera etapa, en forma conjunta con el grupo decisor, se realizó una primera depuración de alternativas eliminando aquellas que no cumplían de manera evidente con alguna de las restricciones de tipo técnico o económico. El número de alternativas se redujo de 42 a 26.

##### Etapas 2: Agrupación de alternativas y selección de la mejor al interior de su grupo

Algunas de las alternativas correspondían a variantes de una alternativa principal. En esta etapa se dejaron sólo aquellas variantes que tuvieron el mejor comportamiento con base en los criterios de decisión acordados con el grupo de ingenieros. El grupo de alternativas se redujo de 26 a 6, las cuales llamamos A1, A2, A3, A4, A5 y A6. Las alternativas A1 y A2, operan el sistema Salgar - Mansilla con algunas variantes, y mantienen el Poliducto de Oriente en stand by hasta que la demanda haga necesaria su operación. Mientras tanto, las demás alternativas consideran la operación del Poliducto de Oriente desde el principio conjuntamente con el Sistema Salgar - Mansilla, este último con diferentes variantes.



**GRUPO 2: UTILIZAR SÓLO POLIORIENTE POLIORIENTE**

**POLIORIENTE**

Se utiliza Polioyente para combustibles (necesita estación Sutarnachán)

**SISTEMA ACTUAL**

Sistema Actual Terceros (venta o arrendamiento)

Sistema Actual Stand By

**SISTEMA ACTUAL**

Línea de 10" (Combustible + GLP)

- Infraestructura Actual
- Modificar Infraestructura Actual:
  - Quitar Guaduzero
  - Quitar Villeta
  - Quitar Albán
  - Quitar Guaduzero y Albán
  - Quitar Villeta y Albán y Construir Sasaina

Línea de 10" sólo GLP (necesita estación Sutarnachán)

- Infraestructura Actual
- Modificar Infraestructura Actual:
  - Quitar Guaduzero y Albán
  - Quitar Guaduzero y Villeta

Figura 1: Conjunto inicial de alternativas de decisión



Figura 2: Metodología de análisis de las alternativas

Etapa 3: Evaluación económica inicial de las alternativas – modelo determinístico

En esta etapa se construyó un modelo determinístico en Excel para calcular el VPN de las 6 alternativas finales bajo diferentes escenarios de la demanda y el hurto de combustibles.

Para la demanda se definieron diferentes escenarios acerca de su comportamiento durante los siguientes 20 años, de los cuales algunos consideraban un crecimiento constante durante todo el período, otro correspondía al pronóstico de la empresa y otros fueron generados asumiendo que la demanda seguiría un Movimiento Browniano<sup>1</sup> durante los siguientes años, teniendo en cuenta que los datos históricos cumplían todos los supuestos necesarios para utilizar este tipo de modelo. En el caso del hurto de combustible también se definieron varios escenarios: uno, asumiendo un nivel de hurto nulo, otro asumiendo un nivel de hurto (medido en barriles diarios) constante durante los 20 años del horizonte de análisis, y el otro suponiendo un nivel inicial de hurto que iría disminuyendo de acuerdo con las metas establecidas por ECOPETROL.

Después de calcular el VPN de las diferentes alternativas se pudo concluir que el comportamiento futuro de la demanda no es un asunto crítico puesto que el poliducto ya está construido y ECOPETROL puede comenzar a operarlo cuando la demanda lo requiera. A diferencia de lo que sucede con la demanda, el comportamiento futuro del nivel de hurto sí es una variable crítica que tiene un impacto notable en el comportamiento económico de las diferentes alternativas.

Etapa 4: Evaluación económica y análisis de riesgo de las alternativas – modelo probabilístico

Partiendo del modelo determinístico construido en la etapa anterior, se incorporó al análisis el comportamiento aleatorio de las variables demanda de combustible y niveles de hurto de combustible, que eran las dos principales fuentes de incertidumbre del problema. Se estructuró un modelo probabilístico con base en el cual se realizó la evaluación económica de las di-

ferentes alternativas y la caracterización y evaluación del riesgo asociado a cada una de ellas.

Se tomaron como base algunos de los escenarios definidos en la etapa anterior y se definieron variables aleatorias normales y triangulares correlacionadas para representar las variaciones anuales tanto de la demanda como del hurto. De esta manera, se definieron cinco escenarios para analizar el VPN del Costo y el riesgo asociado.

En la Figura 3 se observa que, mientras que los diferentes comportamientos aleatorios de la demanda no tienen un efecto significativo sobre el valor esperado del VPN del costo de las diferentes alternativas, el comportamiento aleatorio del hurto de combustible sí lo tiene. Esto se puede observar al comparar, por ejemplo, los escenarios 1 y 2, en los cuales se asume que no hay hurto y la demanda pasa de un escenario de crecimiento aleatorio constante a un escenario de crecimiento aleatorio de acuerdo con el pronóstico de ECOPETROL. A pesar de esto, el VPN del costo se comporta de manera muy parecida en los dos escenarios. Por otra parte, si se compara el escenario 2 con los escenarios 3, 4 o 5, los cuales tienen la misma demanda pero diferentes comportamientos del hurto, se observa que el valor esperado del VPN del costo cambia significativamente pasando para la alternativa 4, por ejemplo, de un VPN de \$315 mil millones en el escenario 2 a un VPN de \$572 mil millones en los escenarios 3 y 4.

Para la valoración del riesgo asociado al VPN del Costo de cada una de las alternativas se utilizó el

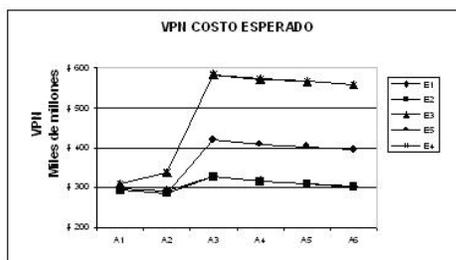


Figura 3: VPN del costo esperado bajo diferentes escenarios<sup>1</sup>

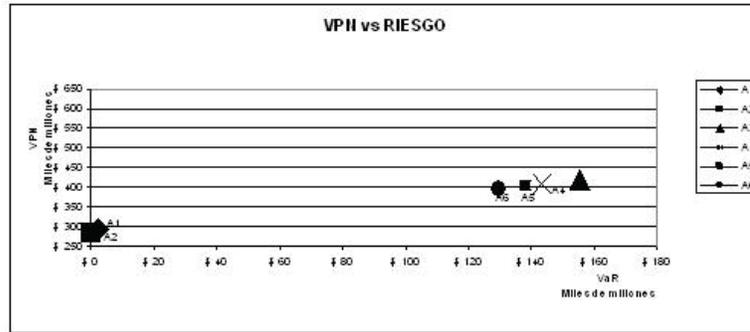


Figura 4: VPN y VaR de las diferentes alternativas

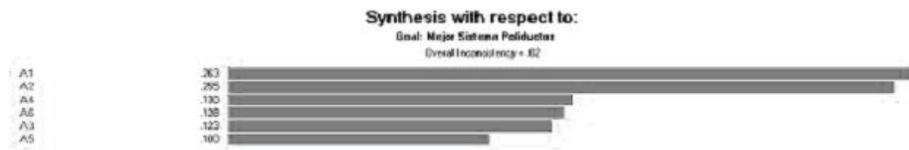


Figura 5: Calificación Global de las Alternativas

concepto de Value at Risk (VaR), definido como la máxima pérdida que se puede obtener con respecto a un costo objetivo con cierto nivel de confiabilidad. En la Figura 4 se comparan las diferentes alternativas bajo el escenario 5 (E5), el cual fue considerado por ECOPETROL como el más probable, teniendo en cuenta tanto el VPN del costo como el riesgo. Se puede observar que las alternativas se pueden dividir en dos grupos diferentes: las alternativas 1 y 2, las cuales tienen un menor costo y menor riesgo, y las alternativas 3, 4, 5 y 6, las cuales son más costosas y presentan mayor riesgo. Esta diferencia, tal como se dijo anteriormente, se debe principalmente a los niveles de hurto de combustible.

Etapa 5: Evaluación y selección final de las alternativas

Para la selección final de la mejor alternativa, se construyó un Proceso Analítico Jerárquico en el cual se tuvo en cuenta tanto el desempeño económico, medido de acuerdo con los resultados de la etapa anterior, como los otros dos criterios de decisión: confiabilidad e imagen institucional. Las matrices de compara-

ción por pares que sirvieron como datos de entrada al modelo fueron elaboradas conjuntamente por los integrantes del grupo decisor de ECOPETROL.

En la Figura 5 se observa claramente la diferencia en la calificación final para las alternativas 1 y 2 marcadamente más favorables que las calificaciones de las alternativas restantes. En síntesis, se puede concluir que teniendo en cuenta los criterios de evaluación acordados con ECOPETROL, las alternativas que globalmente tienen un mejor desempeño son las alternativas 1 y 2.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta la metodología desarrollada para seleccionar la mejor estrategia de operación del sistema de poliductos y los resultados arrojados, podemos concluir lo siguiente:

- El comportamiento futuro de la demanda resultó no ser una variable crítica en el análisis de decisión porque no mostró un impacto significativo sobre el VPN

1 Ver Luenberger [5] para mayor información acerca de este modelo.

2 E1: No hurto y crecimiento constante anual aleatorio de la demanda (VA Triangular). E2: No hurto y demanda de ECOPETROL + variaciones aleatorias (Normales) con correlación. E3: Hurto anual aleatorio y demanda de ECOPE-TROL + variaciones aleatorias (Normales) con correlación. E4: Hurto anual aleatorio correlacionado y demanda de ECOPETROL + variaciones aleatorias (Normales) con correlación. E5: Hurto anual aleatorio disminuyendo con las metas y demanda de ECOPETROL + variaciones aleatorias (Normales) con correlación.

de los costos. Por el contrario, el comportamiento futuro del nivel de hurto es una variable crítica que tiene un impacto notable en el comportamiento económico de las alternativas de operación del Poliducto. Si se siguen las alternativas que implican la operación del Poliducto de Oriente, en los cuatro primeros años la pérdida estimada con base en los compromisos con el Gobierno podría ser del orden de \$70 mil millones.

- Con base en la metodología y los modelos que se utilizaron para la calificación de las alternativas, la alternativa que resultó con mejor calificación teniendo en cuenta los aspectos cuantitativos y cualitativos fue la alternativa A1, que implica que el Poliducto de Oriente entre en operación cuando la capacidad del sistema actual sea insuficiente para atender la demanda.

- A no ser porque la demanda lo exija, se debe condicionar la entrada en operación del Poliducto de Oriente a que se pueda ejercer un control efectivo del nivel de hurto de combustible que lo lleve a un nivel tolerable de acuerdo con los compromisos con el Gobierno.

- ECOPETROL acogió las recomendaciones que se obtuvieron con base en el análisis de decisiones que se llevó a cabo entre el grupo de ingenieros de ECOPETROL y los asesores de la Universidad de los Andes, y actualmente la empresa está interesada en realizar un nuevo análisis del problema con ayuda de la Universidad, teniendo en cuenta que se han presentado cambios importantes en algunos aspectos tales como la reducción de los niveles de hurto de combustible en el país, el uso de alcohol carburante para oxigenar las gasolinas y la posibilidad de distribuir combustibles en Mansilla como un nuevo negocio, entre otros.

El trabajo presentado en este artículo muestra la relevancia de la aplicación formal de metodologías y modelos de análisis de decisiones en la evaluación de decisiones de alto impacto en empresa públicas y privadas, y los importantes ahorros que este tipo de análisis pueden representar para una empresa. Igualmente, es

importante destacar que la aplicación se haya realizado en una empresa Latinoamericana lo cual muestra que este tipo de modelos no sólo son aplicables a grandes empresas de economías desarrolladas.

#### REFERENCIAS

- [1] **M. Castillo.**  
Toma de Decisiones en las Empresas: Entre el Arte y la Técnica (próximo a publicarse), 2004.
- [2] **M. Castillo, G. Duque y F. Beltrán.**  
“Incentives: Mechanisms for the Consistency of the Colombian Educational System”, *Kybernetes*, Vol. 31, No. 9/10, pp.1282 – 1288. 2002.
- [3] **R.T. Clemen,**  
Making Hard Decisions: An Introduction to Decision Analysis. Duxbury Press, 1996.
- [4] **J. Evans y D. Olson.**  
Introduction to Simulation and Risk Analysis, Prentice Hall, 1998.
- [5] **D.G. Luenberger.**  
Investment Science., Oxford University Press, 1998.
- [6] **T. Saaty.**  
Fundamental of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process, University of Pittsburgh, 1994.
- [7] **D. von Winterfeldt y W. Edwards.**  
Decision Analysis and Behavioral Research. Cambridge University Press, 1986.
- [8] **J.M. Yeh, B. Kreng y C. Lin.**  
“A Consensus Approach for Synthesizing the Elements of Comparison Matrix in the Analytic Hierarchy Process”, *International Journal of Systems Science*, Vol. 32, No. 11, pp. 1353-1363, 2001.