

---

## **PREFACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UN PASTODUCTO COMO SISTEMA DE TRANSPORTE ENTRE LA MINA SANDRA-K Y LA PLANTA DE BENEFICIO MARIA DAMA EN LA EMPRESA FRONTINO GOLD MINES**

---

*Manuel Corrales O. y Jorge Martín Molina E.*  
*Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín*  
*mdcorral@unal.edu.co, jmmolina@unal.edu.co*

Recibido para evaluación: 06 de Diciembre de 2005 / Aceptación: 13 de Mayo de 2006 / Recibida versión final: 29 de Mayo de 2006

### **RESUMEN**

Este artículo muestra la prefactibilidad técnica y económica del uso de un Pastoducto para el transporte de mineral aurífero desde la bocamina de la mina Sandra-K hasta la planta de beneficio María Dama, de la empresa Frontino Gold Mines (FGM) en Segovia y Remedios, en el departamento de Antioquia, Colombia.

Considerando aspectos teóricos, los ejemplos de pastoductos en el mundo y en Colombia y las necesidades de la FGM., se diseñó el sistema para 300 t/día en 14 horas de bombeo. Cuatro concentraciones de pulpa fueron propuestas, estimando un diámetro de 4 pulgadas como el más oicionado. Se plantearon tres alternativas de trazado, considerando una de ellas como la más viable, la cual presenta pérdidas por fricción en promedio de 32.17 m y altura de bomba de 150 m. El sistema incluye circuito de trituración, preparación de pulpa, y dos bombas centrifugas en serie tipo Goulds.

Posteriormente se estimaron los costos de inversión, instalación, mantenimiento y operación llevados a 10 años, con el objetivo de encontrar un costo unitario total por tonelada, el cual arrojó un valor de \$4.102. Se deja así abierta la posibilidad de comparar este sistema con otros medios de transporte como vías, bandas transportadoras, trenes y tomar así la mejor decisión.

**PALABRAS CLAVES:** Estudios de Prefactibilidad, Transporte por Tuberia, Modo de Transportate, Pastoducto, Mina Sandra-K.

### **ABSTRACT**

This article emphasizes in the Preliminary Feasibility study to use the pipeline to transport gold ore from Sandra-K mine until Maria Dama beneficiation plant operated by Frontino Gold Mines (FGM). The mine is located in Segovia and Remedios towns, in Antioquia Province, Colombia.

Theoretical concepts, pipelines in the world and Colombia and FGM's needs were incorporated to the design. The system has 300 metric ton a day capacity for 14 hours pumping. Four pulp density were proposed and a diameter of 4 inches was selected. Three alternatives for the construction of pipeline were considered, finding one of them as the best. This alternative has a friction loss of 32.17 m and needs 150 m pumping head. The system also includes crushing and pulp conditioner circuit with two centrifuges series pumps Gould type.

In order to assess a total unit cost per ton, investment, installation, maintenance and operation cost were estimated for a 10 years period. The assessed cost was C\$4.102 (US\$ 1 equivalent to C\$2300). This alternative is easy to operate and environmental friendly. This alternative should compare with other technologies as trucks, belt conveyor, and train, and so on to define the best option.

**KEY WORDS:** Viability Study, Transportation by Pipeline, Mode of Transportation, Slurry Pipeline, "Sandra-K" Mine.

## 1. INTRODUCCIÓN

El sistema hidráulico o pastoducto reporta su primera aplicación en California en 1850 donde se utilizaron elevadores hidráulicos del tipo Ventura, en los cuales la presión del agua obliga a las gravas y arenas a introducirse a un conducto y ascender hasta una altura de 17 m donde se encontraban ubicados los canalones para el lavado del oro. Hoy en día existen pastoductos que alcanzan más de 1000 km y son ampliamente usados en la industria minera y petrolera (Saldarriaga, 1998).

Este trabajo surge del interés de investigar por parte de la empresa minera Frontino Gold Mines (FGM) y la Universidad Nacional de Colombia por estudiar otras alternativas de transporte que reduzcan los costos de producción y disminuir el impacto generado por el actual sistema de transporte por camiones.

El objetivo de este trabajo es evaluar preliminarmente técnica y económicamente la alternativa del pastoducto como sistema de transporte de 300 t/día de mineral entre la bocamina de la mina Sandra-K a la planta de beneficio María Dama, las cuales actualmente se encuentran separadas 7 km por carretera.

## 2. UTILIZACIÓN DEL SISTEMA PASTODUCTO

El transporte de sólidos por tubería en la industria de explotación minera es una técnica comúnmente usada para transportar grandes cantidades de materia prima a distancias excesivas y variedad de topografías.

Aunque el concepto de transporte de sólidos mediante suspensiones por tubería era conocido al final del Siglo XIX, fue solamente en 1957 que se convirtió en una realidad práctica. La primera tubería interurbana que se estableció fue en el estado de Arizona, USA, para transportar 0,4 MTPA (millones de toneladas por año) de gilsonita sobre una distancia de 115 kilómetros (BHRA, 1982). Actualmente son muchos los países que se suman cada vez a la implementación de este tipo de sistema para el transporte de materias primas. En la Tabla 1 se muestran algunos de los sistemas pastoducto instalados en el mundo.

**Tabla 1.**  
Algunos pastoductos instalados en el mundo

Material	Sistema (País)	Longitud (km)	Diámetro (pulg)	Capacidad (MTPA)
Carbón	Black Mesa (USA)	439	18	5.0
Concentrados de hierro	Samarco (BRASIL)	396	20	6.2
Concentrados de cobre	Minera Escondida (CHILE)	170	9	2.5
Caliza	Kensworth Beds (INGLATERRA)	92.2	10	1.7
Caolín	Georgia (USA)	38	10	-
Fosfatos	Valep (BRASIL)	120	9	2.0
Limos con Oro	GMCL (SUDAFRICA)	15	9	-
Arena	Tatabanya (HUNGRIA)	8	8	2.5
Gilsonita	Booanza, Utah (USA)	115	6	0.4

Fuente: Wasp, et al, 1979; Cox, 1993

En Colombia se usan comúnmente los pastoductos para el transporte de caliza en algunas cementeras como Nare, El Cairo y Valle, y recientemente (2001) para relleno hidráulico en Mineros Nacionales. La Tabla 2 muestra algunos parámetros técnicos de esos pastoductos.

**Tabla 2.**  
Características de los pastoductos en Colombia.

Características	Cementos Nare	Cementos El Cairo	Cementos Valle	Mineros Nacionales
Longitud (Km)	16	3.8	9.4	1.8
Diámetro (pulg.)	5-6	8	8-10	4
Bombeo(T/año)	204.000	980.000	1'000.000	168.000
Tipo de bomba	Pistones	Centrífuga	Pistones	Centrífuga
Estaciones de Bombeo	1	1	1	3
Concentración % en peso de sólidos	48-56	50	50-55	45-55
Tamaño promedio de partícula	Malla 50	Malla 50	Malla 50	Malla 200

Fuente: Porras, 1992; y ajuste de los autores.

### 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SISTEMA PASTODUCTO

Cada sistema de transporte presenta puntos a favor y en contra. En la Tabla 3 los autores sintetizan las mayores ventajas y desventajas de un pastoducto.

**Tabla 3.**  
Ventajas y desventajas del sistema.

Ventajas	Desventajas
Funciona con grandes economías de escala, es decir, a mayor rendimiento en la cantidad transportada, menor costo unitario de transporte	El tope máximo al volumen de transporte esta dado por las variables involucradas en el diseño tales como velocidad, presión, gravedad específica entre otras
Tiene una buena flexibilidad en el alineamiento y la topografía	Es necesaria la dotación de equipos para acondicionar previamente el material a las exigencias de transporte
Mantenimiento y mano de obra mínimos	Inversión inicial alta
Las operaciones son ambientalmente amistosas, confiables y continuas presentando ausencia total de contaminación	Se hace indispensable un abundante suministro de líquido en el extremo de bombeo del sistema

Fuente: Fontanilla, 1980; Macias, 2000; Subramanya, 1995, y creación de los autores.

### 4. COMPONENTES DE UN SISTEMA PASTODUCTO

Un pastoducto tiene tres componentes básicos: la pasta o la pulpa con sus características hidráulicas, los equipos de bombeo y la tubería con sus accesorios. Ellos son descritos brevemente a continuación.

#### 4.1. La pasta y sus características hidrodinámicas

El flujo de una pasta (mezcla de sólido-líquido) por una tubería difiere del flujo de un líquido homogéneo. Con los líquidos es posible determinar a priori, en un rango aproximado, el carácter del flujo, laminar, de transición o turbulento, a partir del conocimiento de las propiedades físicas y del sistema de tubería. En el flujo de una pasta sus propiedades

están determinadas por las partículas sólidas que hay presentes y por las condiciones particulares del bombeo (Wasp, et al., 1978), lo cual se hace mediante pruebas de laboratorio y en campo. La caracterización reológica de la pasta del problema en cuestión, dado el carácter preliminar del trabajo, está por fuera del alcance y se hizo con base en la bibliografía disponible y con base en la experiencia de operación de pastoductos similares en Colombia.

#### **4.2. Equipo de bombeo**

En los últimos veinte años la tecnología de bombas ha tenido un avance considerable (Saldarriaga, 1998). Ellas soportan rangos amplios de granulometría gruesa, hasta 10 mm y de densidades de pasta hasta con 60% de sólidos. Existe una interdependencia entre la pasta y el equipo de bombeo de la misma. Por ejemplo, los materiales de la flotación y la lixiviación con fina molienda, debido a la liberación del oro desde su mena, son óptimos para la conformación de pastas. Contrariamente, la preparación de la pasta, para un futuro proceso, se debe realizar con el mínimo equipo de trituración, conminución y espesamiento disponible, y acomodar el tamaño de partículas a los máximos requeridos por las bombas. Este último es el caso de nuestro problema, donde debe efectuarse una trituración mínima del material, que permita ser bombeado, dado que los procesos finales se encuentran previamente instalados a 7 km de distancia.

#### **4.3. Tubería y accesorios**

Este equipo debe obtenerse en virtud del uso al que estará sometido. Se pueden conseguir en los diámetros generalmente requeridos para el pastoducto, desde los diseños más simples hasta los más especializados según sea la aplicación que se requiera.

El diseño de una tubería debe también incluir los medios para facilitar el mantenimiento regular y ocasional. Algunas de las operaciones que no incluyen transporte, pero sí mantenimiento de la línea son:

- Lavado y dragado de la tubería en cortes eléctricos rutinarios o de emergencia.
- Reemplazamiento de tramos o puntos desgastados y acceso a las zonas de taponamiento
- Rotación de la tubería cierto ángulo cuando se trabaja con pastas abrasivas.

### **5. CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO**

Para las consideraciones generales de diseño se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Alternativas de trazados y selección cualitativa de una
- Determinación de velocidad y pérdidas por fricción en función del diámetro
- Selección de tubería, bombas y modo de operación
- Selección del tamaño máximo (en este caso) de partículas y concentración de sólidos
- Estimación de costos de inversión y de operación, mano de obra, repuestos y energía
- Requerimientos operacionales

### **6. CÁLCULOS INGENIERILES REFERENTES AL PASTODUCTO EN LA FGM**

La FGM desde hace décadas se ha dedicado a la explotación del recurso aurífero vetiforme en las inmediaciones de Segovia-Remedios en el departamento de Antioquia (Toro, 1995). A continuación se presentan los cálculos más relevantes del diseño del pastoducto para transportar mineral.

### 6.1. Alternativas de trazados para el sistema pastoducto

En la Figura 1 se muestran tres posibles trazados del pastoducto. Se seleccionó un trazado 1 ya que presentaba muchas ventajas ante los otros dos. Con relación al trazado 2 el trazado 1 es más corto y las pérdidas por fricción son menores, como se explicará más adelante en este capítulo. Con el trazado 3, a pesar de ser más corto que el 1, es una alternativa a largo plazo y además de eso consiste en hacer un apique con el cual estaríamos incurriendo en una inversión mayor que la del trazado 1.

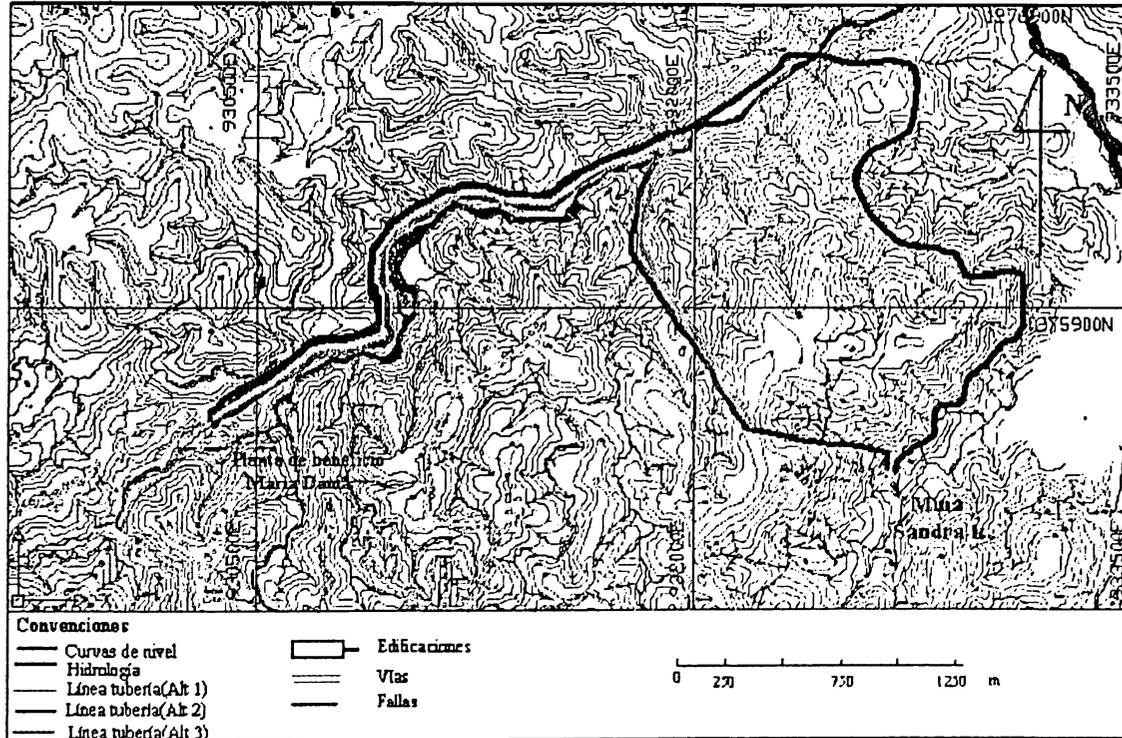


Figura 1.  
Alternativas de trazados.

### 6.2. Caudales y Diámetros

La planta de beneficio María Dama necesitará de la mina Sandra-K aproximadamente 300 t/día (proyección). Consideraremos para nuestro caso de estudio 14 h/día de bombeo de pasta y 2 h/día de bombeo de agua encontrando lo siguientes cálculos:

Para hallar la densidad de la pasta a una concentración del 50%, considerando la densidad específica promedio del mineral aurífero (Mena): 2,7 t/m<sup>3</sup>, y asumiendo una tonelada de pasta, se tiene que

-Peso de la Pasta: 1 t, mena al 50% en peso: 0,50 t y agua al 50% en peso: 0,50 t

$$\text{-Volumen del material aurífero} = \frac{\text{Peso}}{\text{Densidad específica}} = \frac{0,50t}{2,7t/m^3} = 0,185m^3$$

$$\text{-Volumen del agua} = \frac{\text{Peso}}{\text{Densidad específica}} = \frac{0,50t}{1t/m^3} = 0,50m^3$$

$$\text{-Densidad Específica de la Pasta} = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} = \frac{1,0t}{0,685m^3} = 1,46 \frac{t}{m^3}$$

que en unidades inglesas ( $62.4lb/pe^3$  equivale a  $1 t/m^3$ ) sería:  $1,46 * (62,4 \frac{lb}{pe^3}) = 91,10 \frac{lb}{pe^3}$

$$\text{- El flujo másico de mineral sería: } \frac{300 t / día}{14 h / día} = 21,42 t / h$$

- El flujo másico de la Pasta: La tasa de sólidos/h, al 50% del peso total de la pasta se representa como:

$$\text{Flujo másico de la pasta} = \frac{21,42ton / h}{0,50} = 42,84 t / h$$

$$\text{- El flujo de agua es: (flujo de la pasta) - (flujo de mineral) = } 42,84 - 21,42 = 21,42 t/h$$

$$\text{- Caudal de entrega de la Pasta} = \frac{\text{Flujo de la pasta}}{\text{Gravedad específica de la pasta}} = 29,34m^3 / h$$

que convertido a unidades inglesas equivale a = 129,1gpm (galones por minuto)

-Diámetro de entrega de la Pasta: Para ello se calcula primero el área del ducto. Se asumen valor de 1.2m/seg como la velocidad de flujo, que es la recomendada (Wasp, 1978) cuando se está trabajando con materiales (minerales) con densidad alrededor de 2.7, como minerales auríferos o caliza en el sistema hidráulico o pastoducto.

$$\text{Area} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Velocidad}} = \frac{29,17m^3/h}{1,2m/seg} = 0,0068m^2$$

equivalente a 10,56 pulg.<sup>2</sup> que con una sección circular se tendría un diámetro de 3.6 pulgadas.

El anterior ejercicio puede realizarse con varias concentraciones de sólidos en la pasta y los parámetros resultantes como gravedad específica, caudal y diámetro se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.**  
Densidad, caudal y diámetros calculados de tuberías variando las concentraciones

Variables	Porcentaje por peso de sólidos (%)			
	50	55	60	65
Gravedad específica de la pasta(lb/pe <sup>3</sup> )	91,10	95,46	100,3	105,6
Caudal de la pasta(gpm)	129,10	111,90	97,67	85,6
Diámetro de entrega de la pasta (pulgadas)	3,60	3,01	2,81	2,63

De la Tabla 4 se verifica que se requeriría de menor diámetro de ductos y un menor caudal de la pasta a medida que se aumenta el porcentaje de sólidos y la gravedad específica de la pasta.

### 6.3. Estimación de pérdidas por fricción

Considerando diferentes concentraciones de sólidos y diferentes diámetros de ductos, las pérdidas por fricción se hallaron por la ecuación de Hazen y William (Ecuación 1). Los resultados se presentan en la Tabla 5.

$$hf = \left( \frac{3.5866}{C_{HW} D^{2.63}} \right)^{1.852} * L_{Total} * Q_B^{1.852} \quad (1)$$

Donde  $L_{Total} = 1.3L_{Real}$

L= longitud en metros (3800 m). Esta longitud corresponde al trazado 1 del la figura 1.

$Q_B$  = Caudal en m<sup>3</sup>/seg

$C_{HW}$  = Constante para el tubo adimensional (150)

D= diámetro en metros

**Tabla 5.**  
Estimación de pérdidas por fricción (en metros) a diferentes Diámetros y concentraciones

Diámetros en m (pulg)	Pérdidas por fricción en m con dif. concentraciones (%)			
	50	55	60	65
0,0762 (3 pulg)	184,55	141,83	110,06	86,20
0,1016 (4 pulg)	45,46	34,91	27,11	21,23
0,127 (5 pulg)	15,33	11,78	9,14	7,16

De la Tabla 5 se podría anotar que mientras la concentración por peso de sólido y el diámetro aumentan las pérdidas por fricción se reducen notablemente. Dentro de las diferentes concentraciones que se tomaron, la mejor sería al 65% de sólidos en peso.

#### 6.4. Altura de la bomba

Considerando las pérdidas por fricción y la diferencia de cotas de bombeo, por medio de la ecuación de Darcy y Weisback (ecuación 2) se pudo determinar la altura de la bomba para las tres alternativas de trazado, cuyos resultados se presentan en la Tabla 6 considerando diferentes concentraciones de sólidos.

$$HB = (Z_D - Z_A) + hf + \frac{8\alpha Q_B^2}{\pi^2 g D^5} \quad (2)$$

$Z_D$  = Altura de descarga

$Z_A$  = Altura de succión

$\alpha = 1$

**Tabla 6.**  
Variables de los distintos trazados con una concentración de 65% de sólidos en peso

VARIABLES	TRAZADO 1	TRAZADO 2	TRAZADO 3
Longitud (m)	3800	6000	3200
Estación de bombeo	1	1	1
Diámetro (pulg)	4	4	4
Caudal (l/seg)	5,39	5,39	5,39
Pérdidas por fricción (m)	21,23	33,52	17,87
Altura de la bomba (m)	121,24	133,53	32,11

### 6.5. Selección de la bomba

Para la selección de la bomba se tuvieron en cuenta varios factores como tipo de bomba, tamaño máximo de partícula que recibe ésta (1/2”), tipo de impulsor; además de la disponibilidad en el mercado colombiano, entre otras. Se utilizarán 2 bombas en serie, centrifugas marca Goulds, las cuales le adicionarán la impulsión necesaria para sobrepasar la altura estática (150 m) y luego de esto se verá favorecida en su recorrido por la gravedad.

## 7. IMPLICACIONES Y VIABILIDAD DEL SISTEMA PASTODUCTO DENTRO DEL PROCESO GENERAL DE PRODUCCIÓN

### 7.1. Evaluación técnica

Se hace con el objetivo de distribuir de manera adecuada el sistema tanto en la parte inicial (bombeo de la pasta) hasta su destino en la planta de beneficio, sabiendo que esto implica una utilización de equipos de trituración y de tanques acondicionadores de pulpa. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo propuesto para el material.

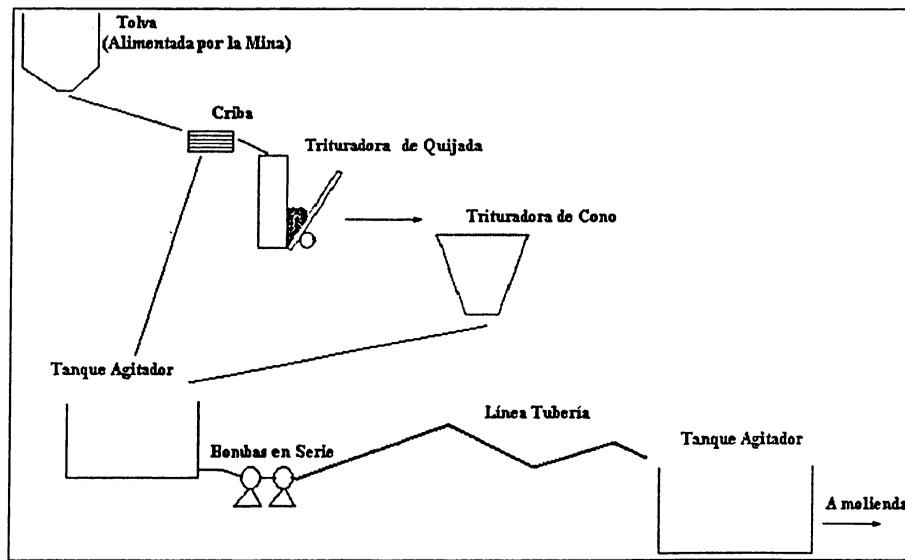


Figura 2.  
Diagrama de flujo propuesto para del material

### 7.2. Evaluación económica

Se estimaron los costos de inversión, operación, instalación y mantenimiento para el sistema pastoducto obteniendo los siguientes resultados. (1USD\$ es equivalente a C\$ 2300). La metodología de costeo utilizó como referencia el Handbook del US Bureau of Mines, los precios de mercado y como referencia los costos de otros pastoductos en Colombia.

Tabla 7.  
Evaluación económica del sistema pastoducto propuesto

Costos	Con Trituración	Sin Trituración
Inversión e Instalación	\$ 716'088.848	\$ 256'088.848
Operación y Mantenimiento	\$ 513'986.080	\$ 209'532.280
Costo total (año Cero)	\$ 1.230'074.928	\$ 465'621.128
Costo total equiv. ( 10 años)	\$ 4.430'152.052	\$ 1.814'961.447
Costo por tonelada	\$ 4.102	\$ 1.663

El costo total equivalente por 10 años, con una tasa de descuento al 10 % anual fue:

Costo Total Equivalente = \$4.430'152.052 por 10 años y con un total de toneladas de 1'080.000 en 10 años.

Costo por tonelada = \$ 4.102 (incluyendo trituración). Para comparar con otros sistemas de transporte debería descontarse al pastoducto una parte de las inversiones y operaciones relacionadas con trituración. Así quedaría un costo de \$1.663, lo cual es altamente competitivo.

## 8. CONCLUSIONES

El sistema de pastoducto representa una alternativa de transporte bastante atractiva y confiable. Aunque presenta una alta inversión se verá retribuido con una relativa fácil operación con bajos costos y una excelente relación con el medio ambiente, haciendo viable a este medio de transporte desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud a los empleados de la FGM de los departamentos de Planeación y de Minas, Ingenieros Carlos Mario Gómez, Gustavo Arboleda, Carlos Hernández, y Gabriel Álvarez, entre otros; así también como a empleados de Mineros Nacionales S.A. y algunas cementeras colombianas que permitieron el acceso a sus instalaciones y por sus valiosas discusiones. Ellos mostraron su receptividad por el tema de investigación y la participación de la Universidad Nacional de Colombia. Esperamos que estos resultados se puedan comparar con otras alternativas de transporte y tomar decisiones de largo plazo

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- BHRA Fluid Engineering, 1982. Hydrotransport 8. Johannesburgo. 515 P.
- Cox, C., 1983. Comparing the studies of a coal slurry pipeline (online). Balcksburg, Virginia. <http://www.vwrrc.vt.edu/pdf/sr17.pdf>
- Fontanilla, M., 1980. El transporte por conducto en comparación con otros medios. En Revista Ingeniería Química N° 132. España. pp 21-26.
- Macias, C. y Sejin, J., 2000. Aplicación de un sistema de relleno hidráulico como mitigación del impacto ambiental en la Mina El Silencio. Medellín. Trabajo de Grado, Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional. Sede Medellín. Facultad de Minas. 158 P.
- Porras. C., 1992. Estudio de prefactibilidad para un pastoducto en Cementos Caribe. Medellín, Trabajo de Grado, Ingeniero de Minas y Metalurgia. Universidad Nacional. Sede Medellín. Facultad de Minas. 188 P.
- Saldarriaga, J., 1998. Hidráulica de Tuberías. Bogotá: MC Graw-Hill. 564 P
- Subramanya, K., 1995. Pipeline transportation technology: An overview (online). India. Oct. <http://www.iisc.ernet.in/cursci/oct/articles32.htm>
- Toro, L., Marín, J. y Bedoya, R., 1995. Geología y génesis del distrito minero Segovia-Remedios. En Revista Boletín de Vías N° 83 V 2. Colombia. pp 149-159.
- US Bureau of Mines. Mines cost estimating Handbook. United States. Circular 9142-9143.
- Wasp, E., Ghanbi, R. y Kenny, J., 1978. Solid- Liquid flow, slurry pipeline transportation. Houston, Texas. Ed. Gulf Publishing Co. 224 P.

