

# Optimización de costos en la mitigación del riesgo con base en el concepto de Desproporción Intolerable

**Alejandro Marín, CEng, MSc, MSc.**

**Jon Hernández, MEng, MSc.**

Ocensa, Carrera 11 No 84-09 piso 10  
Bogotá D.C, Colombia

## RESUMEN

El concepto de desproporción intolerable (Gross Disproportionation), tiene como objeto servir de indicador una vez se requiere la implementación de medidas para la mitigación del riesgo. Dicho indicador, evidencia que la medida de control propuesta debe ser implementada siempre y cuando su costo, o sea la inversión de capital, no sea altamente desproporcionado comparado con los beneficios –representados por la supresión de fatalidades–, alcanzados por la medida. De este modo, una medida de mitigación del riesgo es razonablemente factible, a menos que su costo sea altamente desproporcionado en comparación con sus beneficios.

En la industria del transporte de hidrocarburos, los beneficios representan el valor en el que se evita incurrir si se materializara la amenaza; por su parte, el costo de la medida de mitigación del riesgo, el valor del costo por fatalidad evitada debe ser tenido en cuenta, que proporciona un costo global de la medida de mitigación adoptada en relación con el costo directo de construcción, con la reducción del nivel de riesgo (*i.e.* riesgo social) y con el periodo de diseño esperado para dicha medida. En este último concepto, entre más alta la reducción del nivel de riesgo o entre mayor sea la duración del período de diseño de la medida de mitigación, menor será el costo por fatalidad evitada, hecho que refleja una

efectiva medida de mitigación en términos de la reducción del riesgo y su durabilidad.

El presente documento muestra a partir de un estudio de caso, cómo la aplicación del concepto de desproporción intolerable permite seleccionar el tipo de intervención óptimo sobre el oleoducto de Ocensa, con la relación más favorable entre costo y beneficio, y la efectiva reducción del nivel de riesgo.

## INTRODUCCIÓN

El Oleoducto Central S.A Ocensa, se extiende a través de la cordillera de los Andes colombiana, desde Cupiagua en el piedemonte llanero hasta Coveñas en la costa norte del país. Lo anterior, genera que su perfil presente elevaciones que varían entre el nivel del mar y los 3000 m.s.n.m, donde los suelos montañosos propios de dicha Cordillera, presentan altos niveles de humedad y estabilidades precarias, destacándose extensos depósitos coluviales en movimiento. En la Figura 1 se muestra el perfil de elevación de Ocensa.

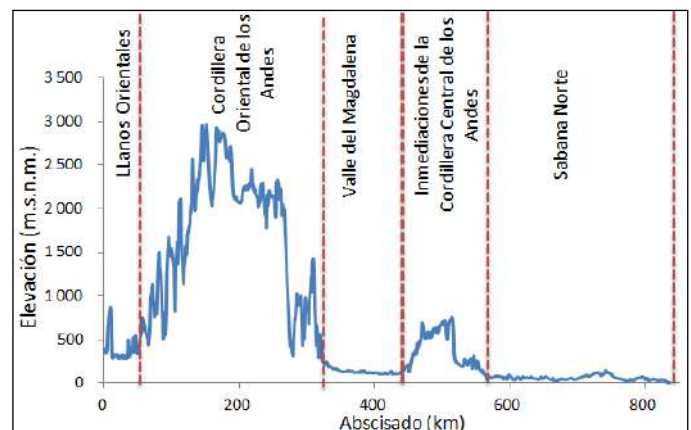


Figura 1. Perfil de elevación Ocensa.

Dentro de las amenazas identificadas sobre el ducto operado por Ocesa, la amenaza de Clima y Fuerzas Externas (*i.e.* Geoamenazas), incluye factores que ponen en riesgo la integridad del sistema, asociados a las condiciones geotécnicas, hidrológicas y tectónicas, propias de la ubicación geográfica y de la topografía sobre la que se extiende el trazado del ducto.

Los movimientos del terreno asociados a dichos factores de inestabilidad geotécnica y tectónica, tienen el potencial de inducir esfuerzos sobre la tubería y estructuras, causando su desplazamiento y consecuente deformación. Sin embargo, pese a que la amenaza de Clima y Fuerzas Externas influye mayoritariamente en la gestión del riesgo e integridad del oleoducto, deben tenerse en cuenta ocho amenazas adicionales una vez se requiere realizar una determinación realista de la probabilidad de falla, clasificadas como:

- Corrosión interna;
- Corrosión externa;
- Agrietamiento bajo esfuerzos;
- Operaciones incorrectas;
- Defectos de manufactura;
- Defectos de construcción;
- Fatiga;
- Daños asociados a terceros.

Una vez identificadas las nueve amenazas que incrementan la probabilidad de falla del ducto, es posible realizar análisis de riesgo cuantitativo de segmentos de tubería que presenten anomalías o niveles de deformación críticos, a partir de la estimación de la frecuencia de falla asociada a la amenaza predominante y al cálculo de las consecuencias.

Una vez un análisis de riesgo cuantitativo arroja un nivel de riesgo inaceptable ante los niveles de tolerabilidad, se hace necesario implementar medidas de mitigación que reduzcan dicho niveles de riesgo a uno tolerable. Para lograr que la

inversión de capital del operador al implementar estas obras de mitigación sea razonable teniendo en cuenta el nivel o delta de reducción de riesgo, usualmente se realizan análisis costo-beneficio con el fin de seleccionar la alternativa de mitigación del riesgo idónea, que represente el balance óptimo entre inversión de capital y el beneficio adquirido.

Como ejemplo práctico, se expone la aplicación de un análisis de riesgo cuantitativo aplicado sobre el oleoducto de Ocesa, donde debido a los niveles de deformación del ducto asociados al desplazamiento del terreno, se encontró la necesidad de realizar el corte y reemplazo de un segmento de tubería. Para esto, se evaluó la implementación de dos alternativas de solución, donde se elaboró un análisis costo-beneficio y se aplicó el concepto de Desproporción Intolerable, con el objeto de definir la mejor alternativa de solución en términos de inversión y reducción del riesgo.

## **METODOLOGÍA**

Para la aplicación del concepto de Desproporción Intolerable a las dos alternativas de solución planteadas una vez se realizara el corte del segmento de tubería, en primera instancia se realizó la estimación del nivel de riesgo cuantitativo. Generalmente, un análisis de riesgo cuantitativo se lleva a cabo para aquellas amenazas ante las que el operador del ducto no posee control suficiente, pese a poseer programas de integridad y monitoreo, como son las amenazas de Clima y Fuerzas Externas y Daños asociados a un Tercero; por su parte, las amenazas restantes tienen un número de controles y monitoreos que facilitan al operador mantener mínimos niveles de probabilidad de falla.

Para el caso particular de estudio, la amenaza materializada sobre el ducto se encuentra en función a la inestabilidad geotécnica (*i.e.* Clima y Fuerzas Externas), razón por la que es la frecuencia de falla asociada a esta amenaza la tomada en cuenta para el análisis. Lo anterior, no significa que factores asociados a posibles anomalías mecánicas, condiciones de operación o parámetros geométricos no hayan sido tenidos en cuenta en la determinación

de la frecuencia de falla, ya que hacen parte integral de este factor en la ecuación de riesgo.

Para la estimación de la frecuencia de falla, es práctica común recurrir a datos históricos de fallas de ductos de transporte de hidrocarburos, reportados por numerosos grupos de operadores alrededor del mundo. Sin embargo, Ocesa posee la estadística de afectación de su ducto asociada a cada amenaza reconocida, por lo que la frecuencia de falla particular para Clima y Fuerzas Externas resulta del cruce entre el número de afectaciones reportadas, la longitud del ducto, y los años de operación del mismo.

En cuanto a las consecuencias, factores asociados al volumen y densidad de producto liberado, probabilidad de ignición, radios potenciales de afectación, radiación y existencia de Áreas de Alta Consecuencia (*i.e.* HCA por sus siglas en inglés), fueron tenidas en cuenta para la estimación de este factor.

Teniendo en cuenta que las fallas de ductos para el transporte de crudo son clasificadas como de baja frecuencia y altas consecuencias, resulta más representativo evaluar los niveles de riesgo con respecto a la vulnerabilidad social más que en la individual, ya que la aceptabilidad ya sea del trazado de un nuevo ducto o el realineamiento de uno existente, o bien la planeación de un asentamiento urbanístico se viabilizarán con respecto a este criterio que abarca colectividad. Por esto, la definición de idoneidad de la alternativa a seleccionar se encuentra determinada por el nivel de riesgo social calculado.

En la realización del análisis costo-beneficio, se incluye el concepto de costo por fatalidad evitada, que representa la relación entre el costo directo de intervención y el factor resultante del delta de riesgo entre el nivel de riesgo social del

escenario inicial o sin modificación y cada alternativa, con el periodo de vida útil o de diseño de esta última, expresada de la siguiente manera:

$$\text{Costo fatalidad evitada} = \frac{\text{Costo alternativa}}{\Delta RS * \text{Periodo diseño}}$$

Como puede observarse, entre más alta la reducción del riesgo o entre mayor sea la vida útil estimada de la medida de mitigación, más bajo será el valor del costo por fatalidad evitada, lo que representa una efectiva medida de mitigación en términos de reducción del nivel de riesgo y su durabilidad.

En cuanto a la determinación del beneficio, este representa el valor en el que se evita incurrir si se materializara la amenaza, al implementar la medida de mitigación planteada. Dentro de los aspectos evaluados para determinar el valor del beneficio se resaltan los costos reconocidos por las aseguradoras una vez se presentan fatalidades asociadas a la falla de un ducto, sanciones y multas ambientales, daños a otra infraestructura, lucro cesante, deterioro de la imagen corporativa debido a reacciones negativas de la sociedad, entre otros.

Teniendo en cuenta que a la fecha no existe alguna definición regulatoria del valor financiero de la vida humana, para el establecimiento de este valor de la ecuación debe tenerse en cuenta la experticia y juicio del evaluador de riesgo, el que toma como guía el valor promedio de compensación ante un siniestro multiplicado por varios miles de millones de pesos, con el fin de tener en cuenta la incertidumbre asociada a la ocurrencia de falla de un ducto, y las reacciones negativas que esto conlleva.

Por último, se determina la alternativa de solución óptima en términos de costo-beneficio, representada por el factor de desproporción. Este concepto, permite evidenciar si el costo de mitigación propuesto (reflejado por el costo por fatalidad evitado), es sustancialmente elevado si se compara con el grado de beneficio obtenido por su implementación, lo que resulta medible en el nivel de reducción de riesgo y consecuentemente, en la reducción de fatalidades.

En estos términos, el concepto de Desproporción Intolerable es aplicado al obtener el factor de desproporción, que muestra cuántas veces el valor

del costo es al valor del beneficio. Usualmente, una vez este factor excede un valor de 10 (*i.e.* costo de la inversión para mitigar el riesgo mayor a diez veces el costo del beneficio), la implementación de dicha mitigación sería desproporcionada. La representación matemática del concepto de Desproporción Intolerable está dado por:

$$\frac{\text{Costo}}{\text{Beneficio}} \leq 10$$

Por lo anterior, es de esperarse que toda alternativa de mitigación del riesgo sea menor o igual a 10, para encontrar justificable y proporcionada su inversión con su beneficio.

## ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para la realización del Análisis de Riesgo Cuantitativo (QRA), se tuvo en cuenta los parámetros de operación del ducto representativos de la zona donde se presentaba la deformación del ducto, debido al desplazamiento del terreno dentro del que se encuentra enterrado. Estos parámetros se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Parámetros del ducto adoptados para el análisis.

Parámetro	Valor
Grado del acero	API 5L X70
Diámetro	30"
Espesor	19.05 mm

Los niveles de riesgo social se calcularon para el escenario inicial, para la alternativa 1 y para la alternativa 2 de mitigación. Las alternativas analizadas, corresponden a la reposición de la tubería existente, siendo ésta emplazada sobre el mismo alineamiento de la original; por su parte, la alternativa 2 comprende el realineamiento existente, lo que representa variar la longitud de ducto existente y la consecución de permisos prediales

adicionales. Es de resaltar que el realineamiento del ducto se plantea dentro la franja del ducto que posee un licenciamiento ambiental, por lo que no se hace necesario obtener una nueva licencia de esta índole.

La curva FN de riesgo social para el escenario inicial como para las dos alternativas propuestas se muestra en la Figura 2. Allí, la línea continua de color rojo representa el criterio de aceptabilidad de riesgo social, representado por un valor de  $1 \times 10^{-3}$  fatalidades por año. Este valor es ampliamente utilizado por operadores de ductos alrededor del mundo, como umbral de aceptación para niveles de riesgo social, donde todo nivel que sea mayor a este, resulta inaceptable. La curva punteada verde, representa el nivel de riesgo original o inicial, mientras que la curva punteada de color gris, corresponde al nivel de riesgo social calculado para la alternativa de reposición de la tubería; la curva punteada azul corresponde a la alternativa de realineamiento del ducto.

Como se puede apreciar, el nivel de riesgo del escenario original o inicial justifica la necesidad de corte y reemplazo del segmento de tubería, debido a que se encuentra por encima del criterio de aceptabilidad, mientras que ambos niveles de riesgo social calculados para las alternativas propuestas, disminuyen el nivel de riesgo social a uno ampliamente aceptable, por debajo de la envolvente de aceptabilidad.

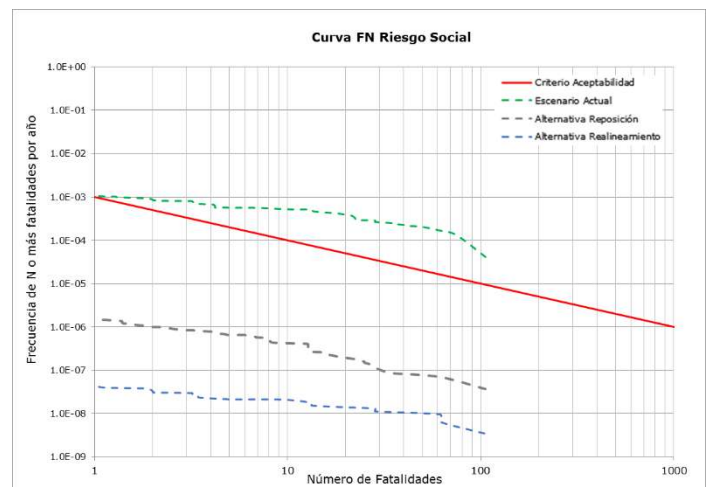


Figura 2. Curva FN de Riesgo Social para corte y reemplazo de segmento de tubería.

Teniendo en cuenta que ambas alternativas satisfacen los niveles de riesgo social exigidos por regulación, se llevó a cabo un análisis de costo-beneficio y se aplicó el concepto de Desproporción Intolerable, con el fin de determinar la solución óptima en términos de inversión y beneficio.

Para la determinación del costo por fatalidad evitada, se realizó la estimación de los costos relacionados a la construcción de cada alternativa, el delta o disminución del nivel comparado con el nivel de riesgo inicial y se estimó el periodo de diseño o vida útil de cada alternativa. Por su parte, el valor del beneficio se calculó teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente en la metodología, encontrando un valor de \$ 40 mil millones de pesos, en línea con los ingresos y factores principales de la economía colombiana.

En términos del periodo de diseño o vida útil de cada alternativa, se tuvo en cuenta la experiencia y los antecedentes de la problemática del sector objeto de estudio, por lo que realizar la reposición del segmento de tubería sobre el mismo trazado original, presenta una alta probabilidad de generar tendencia a altas deformaciones del ducto, asociado a los factores geotécnicos y a la geometría de doblado de la tubería. Por esto, a la alternativa de reposición se la ha otorgado un periodo de diseño de 20 años, similar al tiempo de vida útil del segmento de tubería original al requerir su reemplazo; la vida útil o periodo de diseño de la alternativa de realineamiento es igual a 40 años. En la Tabla 2 se resumen los valores obtenidos para el costo y el beneficio.

Tabla 2. Valores de costo y beneficio.

Esce.	Nivel de Riesgo	Costo alter. (miles de millones)	$\Delta$ RS	Costo fatalidad evitada (miles de millones)
Inicial	$2.1 \times 10^{-3}$			
Repos.	$8.9 \times 10^{-6}$	\$ 8.5	$2.06 \times 10^{-3}$	\$ 206
Realin.	$6.4 \times 10^{-7}$	\$ 10.2	$2.07 \times 10^{-3}$	\$ 123

Como puede observarse, pese a que tanto los costos directos de construcción de ambas alternativas son similares y el delta del nivel de riesgo social son bastante aproximados, los costos por fatalidad evitada entre alternativas difieren notablemente, correspondiendo para la alternativa de reposición un costo por fatalidad evitada de \$ 206 mil millones de pesos, y para la alternativa de realineamiento un costo de \$ 123 mil millones de pesos. Lo anterior, refleja la influencia del factor de periodo de diseño asignado a cada alternativa, justificado en los antecedentes anteriormente mencionados.

Consecuentemente, el factor de desproporción fue obtenido como el cociente de la relación entre el costo y el beneficio adquirido al implementar cada alternativa, como se resume en la Tabla 3.

Tabla 3. Factor de desproporción para cada alternativa evaluada.

Escenario	Nivel de Riesgo	Costo fatalidad evitada (miles de millones)	Beneficio (miles de millones)	Factor desproporción
Inicial	$2.1 \times 10^{-3}$	-	-	-
Reposición	$8.9 \times 10^{-6}$	\$ 206	\$ 40	5
Realineam.	$6.4 \times 10^{-7}$	\$ 123	\$ 40	3

Una vez aplicado el concepto de desproporción intolerable, es de notar cómo ambas alternativas satisfacen el criterio establecido por dicho concepto, representado por valores inferiores a 10, lo que indica que de realizar su implementación, el costo asociado al beneficio adquirido, no sería desproporcionado. Sin embargo, un valor inferior obtenido para la alternativa de realineamiento es el indicio o herramienta para el evaluador de riesgo, que sirve como criterio para la toma de decisiones, y justificación en cuanto a la alternativa a implementar.

## CONCLUSIONES

Tras la realización de un análisis de riesgo cuantitativo y un análisis de costo-beneficio a dos alternativas de mitigación del riesgo asociado a la amenaza de Clima y Fuerzas Externas, queda en evidencia como la alternativa comprendida por el realineamiento pese a tener un costo directo de

construcción mayor al de la alternativa correspondiente a la reposición del ducto, es más conveniente para su implementación. Lo anterior, como resultado de la adopción de los conceptos de costo por fatalidad evitada y el concepto de Desproporción Intolerable.

Al aplicar este último concepto, la alternativa de reposición obtuvo un valor de 5, hecho que indica que el costo de su implementación es cinco veces el costo en el que tendría que incurrir el operador del ducto de materializarse una rotura, en este caso, el beneficio adquirido. Pese a que este costo es de cinco veces su beneficio, a la luz del concepto de desproporción intolerable es aceptable.

Por su parte, la alternativa correspondiente al realineamiento del ducto obtuvo un valor de 3, indicador de un costo de inversión de tres veces el beneficio adquirido; de igual manera que para la alternativa de reposición, este valor se encuentra por debajo del criterio de aceptación establecido por el concepto de desproporción intolerable, pero al poseer un valor menor, es esta alternativa de realineamiento la indicada para ser implementada.

El concepto de desproporción intolerable permite, como en este caso particular, entender por qué un costo directo de inversión de capital mayor no necesariamente es más desfavorable para el operador, y cómo además en ocasiones, una alternativa de solución más económica en términos de costos directos de construcción, no corresponde a la idónea para implementar.

Finalmente, es importante tener en cuenta que con respecto a la optimización de inversión de capital al realizar actividades de mitigación y gestión del riesgo, asociado a la materialización de amenazas sobre

ductos para el transporte de hidrocarburos, es preciso realizar análisis rigurosos donde no solo sean tenidas en cuenta variables directamente obtenibles como costos de construcción, sino que se hace estrictamente necesario poseer criterio y experiencia para definir variables tales como el beneficio, que involucra temas controversiales como el costo de vida humana.

## REFERENCIAS

- ASME B31.4-2012, Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids, American Society of Mechanical Engineers, 2012;
- ASME B31.8-2010, Gas Transmission and Distribution Systems, American Society of Mechanical Engineers, 2010;
- ASME B31.8S-2010, Managing System Integrity of Gas Pipelines, American Society of Mechanical Engineers, 2010;
- CZA Z662-11, Oil and Gas pipeline systems, Canadian Standards Association, 2011;
- IGEM/TD/2, Application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of high pressure Natural Gas pipelines, Communication 1737, Institution of Gas Engineers & Managers, 2008.
- PD 8010-1:2004, Code of practice for pipelines, The British Standards Institution, 2004;
- PD 8010-3:2009+A1:2013, Steel pipelines on land-Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables, 2009-2013;

### Alejandro Marín

Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia, MSc en Ingeniería-Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia con Distinción Meritoria , MSc Pipeline Engineering de la Universidad de Newcastle con Grado de Primera Clase, con experiencia en el sector Oil & Gas en trazado, diseño, operación, mantenimiento e integridad de líneas de transporte de hidrocarburos. Realización de trabajos de investigación en estabilidad de taludes, geotecnia aplicada, integridad estructural de ductos, gestión del riesgo e interacción suelo-tubería.

Amplio conocimiento en análisis y gestión del riesgo en los componentes geotécnicos y mecánicos, así como en integridad y gestión de activos en el área del transporte de hidrocarburos. Habilidades en cuanto a evaluaciones de ingeniería asociadas a "fitness for service", en miras de optimizar la inversión de capital de operación en la gestión de integridad de ductos.

1. Nombre del autor: Alejandro Marín Tamayo
2. Teléfono:
  - a. Residencia: 4576062
  - b. Oficina: 3250200
  - c. Celular: 3002831277
3. Dirección del autor:
  - a. Residencia: Carrera 5 No. 74-75
  - b. Oficina: Carrera 11 No. 84-09
  - c. Email: [Alejandro.marin@ocensa.com.co](mailto:Alejandro.marin@ocensa.com.co)
  - d. Ciudad: Bogotá D.C
  - e. País: Colombia

### Jon Freddy Hernandez Sanchez

Ingeniero mecánico, M Sc en Ingeniería de materiales de la Universidad Industrial de Santander, cuenta con más de 10 años de experiencia en el capo de la gestión de integridad y riesgos en oleoductos, estaciones y offshore, actualmente se desempeña como profesional de riesgo de la línea y el derecho de vía del Oleoducto Central S.A.

1. Nombre del autor: Jon Freddy Hernández Sánchez
2. Teléfono:
  - a. Residencia: 6886640
  - b. Oficina: 3250200
  - c. Celular: 3013718803
3. Dirección del autor:
  - a. Residencia: Calle 159 # 54-69
  - b. Oficina: Carrera 11 No. 84-09
  - c. Email: [jon.hernandez@ocensa.com.co](mailto:jon.hernandez@ocensa.com.co)
  - d. Ciudad: Bogotá D.C
  - e. País: Colombia