

Optimización de Mantenimiento en Tuberías de Hidrocarburos Mediante Análisis Geomático y Métodos de Optimización en Zonas Afectadas por Clima y Fuerzas Externas

Autores:

Oscar Gilberto Páez Ortiz – Líder de Análisis de Integridad
Diego Trespalacios – Especialista Análisis de Integridad
Karen Garay – Profesional Sistemas de Información Geográfica

GIE GROUP

Colombia

Correo Electrónico:

paez@giegroup.net
dtrespalacios@giegroup.net
kgaray@giegroup.net

Este trabajo presenta una metodología para la planificación y optimización de planes de mantenimiento en tuberías de transporte de hidrocarburos, específicamente en zonas bajo amenaza de fenómenos climáticos y fuerzas externas. La metodología se centra en la identificación de segmentos críticos mediante técnicas geomáticas, utilizando el enfoque de Mora y Vahrson (1991). Se integra la evaluación de tramos susceptibles a deslizamientos de tierra con los sectores de estos tramos afectados por anomalías en el ducto. A través de un algoritmo de optimización, se desarrollan soluciones que permiten agrupar las excavaciones necesarias para la atención de anomalías con las de liberación de esfuerzos en tramos de tubería identificados, generando planes de mantenimiento que equilibran la susceptibilidad de falla aceptable y la minimización de costos.

1. Introducción

Colombia cuenta con una topografía bastante variada debido a la existencia de las tres cordilleras de los Andes ecuatoriales y de las cuencas de los ríos Orinoco y Amazonas (Khobzi, J. Usselman, P. 1974 pág. 61), dichos dominios geomorfológicos de Colombia son definidos por la existencia de un escalonamiento climático en el ambiente ecuatorial, el relieve, la humedad y sequedad regional (Khobzi, J. Usselman, P. 1974. Pág. 60).

Las zonas montañosas tropicales, como las colombianas, son susceptibles a sufrir deslizamientos de suelos o movimientos en masa, debido a la presencia de los cuatro elementos más importantes para su ocurrencia: relieve montañoso, meteorización, alta sismicidad y lluvias intensas (González, Martha 2010).

Durante su vida útil, la integridad de los sistemas de transporte de hidrocarburo puede verse afectada por las cargas impuestas por dichos deslizamientos, y dada la importancia estratégica de esta infraestructura para la estabilidad energética de Colombia (Amortegui, 2011), deben ser inspeccionadas y evaluadas de manera regular para reducir la susceptibilidad de falla derivada de cualquier pérdida de contención no planeada.

Para tal fin, el presente trabajo plantea una forma de evaluación a partir de información general o regional (se construye con cartografía básica y temática 1:100.000) la cual se cruza con información estructural del ducto, permitiendo a los equipos de integridad tener varias capas de análisis integradas para el estudio detallado de zonas. Posteriormente, con los tramos identificados y la información compilada de las diferentes anomalías identificadas en el mismo, se aplican modelos de clasificación para priorizar la susceptibilidad de falla de las anomalías; para el

caso de este artículo se aplicó el modelo planteado por John F. Kiefner (Kiefner, 1997) [1] en la que se utilizan fórmulas simplificadas que le asigna un valor de probabilidad estimada a cada anomalía y luego con esta información se evalúa un modelo que utiliza un enfoque **multiobjetivo** basado en un algoritmo evolutivo para optimizar la selección de zonas afectadas por deslizamiento que se deben excavar y la extensión necesaria de la excavaciones respetando las restricciones presupuestarias. La optimización considera la posibilidad de incluir anomalías de corrosión ubicadas cerca del inicio y fin de las zonas a dentro de las excavaciones de **bending strain**, lo que permite que una excavación se extienda en ambos sentidos (aguas arriba y aguas abajo a lo largo del ducto), mientras que minimiza simultáneamente la susceptibilidad de falla y el costo. En este tipo de problemas, no buscamos una única solución óptima, sino un conjunto de soluciones que representan **trade-offs** entre los dos objetivos (susceptibilidad de falla y costo). La solución se obtiene utilizando técnicas que generan un conjunto de soluciones que no se pueden mejorar en un objetivo sin empeorar el otro, implementadas en bibliotecas especializadas en optimización multiobjetivo. En este caso, utilizamos la librería **DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python)**.

De tal manera, se procesa la información para apoyar la toma de decisiones de mantenimiento en la atención de zonas afectadas por deslizamientos, priorizando las áreas de mayor susceptibilidad de falla y controlando el impacto económico de las intervenciones. En conjunto, esta metodología proporciona una herramienta robusta para mejorar la seguridad y la eficiencia operativa en redes de transporte de hidrocarburos.

2. Metodología de Identificación de Tramos Críticos

Para el análisis presentado en el presente artículo se utilizó la metodología Mora-Vahrson, la cual fue desarrollada por los ingenieros Sergio Mora y Wilhelm-Gunter Vahrson (1991), quienes propusieron un enfoque práctico y empírico a

priori para evaluar el comportamiento de suelos susceptibles a deslizamientos. (Memorias Primer Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el estudio de riesgos naturales 1992. Pág. 259).

Esta metodología recurre al uso de información disponible como: relieve del terreno (topografía), litología (geología) y humedad del suelo (grado de saturación, actividad sísmica y precipitación). La metodología hace uso de indicadores morfodinámicos que, con la combinación de indicadores y sus clasificaciones, da como resultado los factores de susceptibilidad, generados por los factores de disparo, aplicando una ecuación, que determina como se deben combinar las entidades espaciales para la construcción del mapa de movimiento en masa.

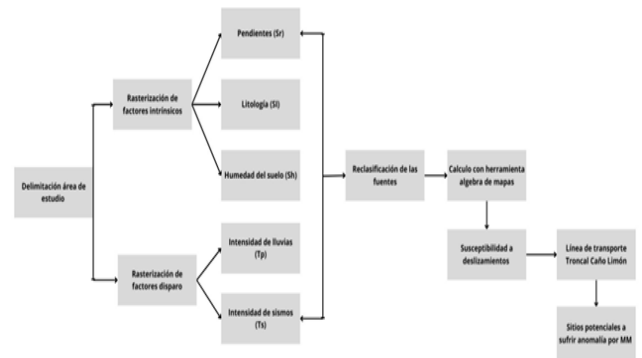


Figura 1. Esquema de la metodología según Mora & Vahrson (1994) utilizada en este análisis

A partir de esta metodología se construye un mapa de susceptibilidad para temporada húmeda para nuestro caso de estudio.

Para cada uno de los parámetros: pendiente, litología, humedad del suelo, intensidad de lluvias y sismos (intensidad máxima observada), se definió un peso relativo y específico propio de acuerdo con tablas de referencia y según el tipo de material y/o característica de acuerdo con su grado de influencia. A continuación, se presenta un ejemplo para el factor de la clasificación de dichos pesos relativos correspondiente a Pendientes:

Pendientes (Sr): Corresponde a la topografía. Según la metodología Mora & Vahrson (1994), se usaba el mapa de relieve relativo, posteriormente se usa mapa de pendientes con rangos según Van Zuidam (1986). En la Tabla 1, muestra la clasificación del mapa de pendientes:

Rangos de pendientes (grados)	Procesos y condiciones característicos del terreno	Peso asignado (Sr)
0 – 2	Plano o casi completamente plano	1
2 – 4	Inclinación suave	2
4 – 8	Pendientes inclinadas	3
8 – 16	Modelo escarpado	4
16 – 35	Escarpado	5
35 – 55	Muy escarpado	6
> 55	Extremadamente escarpado	7

Tabla 1. Rangos, clasificaciones y pesos asignados en el factor (Sr) del mapa de pendientes. Fuente: Van Zuidam (1986)

Las diferentes entidades espaciales generadas se combinan mediante la ecuación 1 para la construcción del mapa de susceptibilidad movimiento en masa:

$$Ad = (Sr \times SI \times Sh) \times (Tp + Ts) \quad Ad = Sr \times SI \times Sh \times (Tp + Ts) \quad (1)$$

Previo a la aplicación de la ecuación 1 se aplican las Ecuaciones 2 y 3 las cuales combinan inicialmente los mapas de litología, pendiente del relieve relativo y la humedad del suelo con el factor disparo, que corresponde a la precipitación máxima (Tp) que correspondiente al mes de septiembre de 2017, uno de los meses con mayor precipitación entre los años 2013 al 2023 y el factor sismo (Ts):

$$Susc = Sr \times SI \times Sh \quad Susc = Sr \times SI \times Sh \quad (2)$$

precipitación máxima (Tp) que correspondiente

Donde:

Sr = Índice de influencia de las pendientes
SI = Índice de influencia de las condiciones litológicas

Sh = Índice de influencia de humedad del suelo

El resultado de la Ecuación (2) se combina con el factor detonante, que corresponde a la precipitación máxima (Tp) que para el año 2013 al 2023 fue el mes de septiembre de 2017, y el factor sismo (Ts).

$$Dis = (Tp + Ts) \quad Dis = (Tp + Ts) \quad (3)$$

Donde:

Ad = Amenaza de deslizamientos

Sr = Pendientes, dada en grados y clasificada en rangos y su respectivo peso asignado

SI = Litología, clasificada en rangos de bajo, medio, moderado, alto y muy alto

Sh = Humedad del suelo, clasificada en rangos muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto

Tp = Intensidad de lluvias: dada en milímetros y clasificada en rangos

Ts = Intensidad máxima observada en ML y clasificada en rangos

Después de construir el mapa de susceptibilidad con la metodología antes dicha, se cruza esta información con la cobertura de línea de infraestructura y de esta manera se determinan los tramos de red de hidrocarburos con potencial de afectación por deslizamientos en la tubería de estudio en la temporada de lluvia seleccionada.

3. Metodología de Optimización de Excavaciones para Liberación de Esfuerzos

Luego de identificados los tramos críticos, se genera una capa adicional en el sistema GIS para identificación de las anomalías y movimientos de tubería detectados por las corridas con herramienta instrumentada (ILI), que están presentes en los tramos críticos identificados. Estas anomalías son clasificadas de acuerdo con un ranking de probabilidad de falla, para proceder a construir un modelo de optimización. El objetivo es reducir simultáneamente la susceptibilidad de falla de la tubería y el costo total de las excavaciones. El

algoritmo utilizado de tipo evolutivo NSGA-II busca soluciones óptimas que minimicen ambos objetivos, respetando las restricciones de presupuesto y asegurando que las anomalías de bending strain con un puntaje de susceptibilidad de falla máximo sean reparadas.

VARIABLES Y PARÁMETROS DE ENTRADA

1. Anomalías de Bending Strain: Son anomalías caracterizadas por deformaciones en el ducto. Cada anomalía tiene un puntaje de susceptibilidad de falla, y puede extender su excavación para incluir anomalías de corrosión cercanas, si es beneficioso en términos de costo y riesgo.

2. Anomalías de Corrosión: Son áreas donde la tubería está corroída. Estas anomalías pueden ser incluidas en las excavaciones de las anomalías de bending strain cercanas, si así lo sugiere la optimización.

3. Presupuesto Máximo: El presupuesto disponible para las excavaciones es limitado, y el modelo debe asegurarse de que el costo total de las excavaciones no lo supere.

4. Susceptibilidad de Falla Máxima para Bending Strain: Las anomalías de bending strain con puntajes de susceptibilidad máxima (por ejemplo, 1.0) deben ser reparados, sin importar los objetivos de costo.

5. Costo de Excavación: El costo de excavación es proporcional a la distancia excavada, y está determinado por la distancia en kilómetros entre los puntos de excavación, así como el costo unitario por metro.

El modelo tiene dos funciones objetivo:

- La primera es la Minimización del Costo Total de Excavación que se calcula como la suma de los costos de todas las excavaciones, las cuales dependen de la distancia excavada y del costo unitario por metro.

- La segunda es la Minimización de la Susceptibilidad Total de Falla de la Tubería, que se calcula como la suma de las susceptibilidades de las anomalías que son excavadas. La idea es que al reparar las anomalías, la susceptibilidad global de la tubería disminuya.

Para la solución del problema se imponen varias Restricciones:

- Presupuesto Máximo: El costo total de las excavaciones no debe superar el presupuesto disponible.

- Garantizar la Reparación Obligatoria de Anomalías con Susceptibilidad de Falla Máxima (Bending Strain) Si una anomalía de bending strain tiene un puntaje de riesgo máximo, debe ser excavada, sin importar el impacto en el costo. Esto se implementa como una restricción de inclusión en los grupos de reparación. Las excavaciones deben ser contiguas, lo que significa que no se pueden dejar espacios no excavados entre las anomalías de un mismo grupo de reparación.

Para solucionar el problema de optimización se seleccionó el algoritmo NSGA-II que es un algoritmo evolutivo multiobjetivo que emplea una población de soluciones y evoluciona hacia soluciones óptimas mediante generaciones sucesivas. En este caso, NSGA-II buscará soluciones que minimicen tanto el riesgo como el costo, utilizando los siguientes pasos:

1. Selección: El algoritmo selecciona un subconjunto de soluciones basándose en la dominancia de Pareto. Las soluciones que no son dominadas por otras son consideradas mejores.

2. Cruce: Se cruzan soluciones seleccionadas para generar nuevas soluciones. En este caso, el cruce puede involucrar la combinación de diferentes combinaciones de anomalías excavadas y sus respectivas distancias de excavación.

3. Mutación: En cada iteración, algunas soluciones son mutadas para explorar nuevas combinaciones de excavaciones y distancias.

4. Evaluación: Las soluciones generadas se evalúan con base en las funciones objetivo de costo y susceptibilidad de falla.

5. Reemplazo: Se seleccionan las mejores soluciones para la siguiente generación

El proceso se repite hasta que se alcanza una solución de compromiso que minimice tanto el riesgo total como el costo total, respetando todas las restricciones impuestas

Al final de la optimización, el algoritmo proporcionará:

- * El número de grupos de excavación y las anomalías que se incluyen en cada uno de estos grupos.
- * La distancia excavada por cada grupo.
- * La susceptibilidad de falla total y el costo total asociado con la combinación de excavaciones.
- * La solución óptima en términos de costo y susceptibilidad de falla.

4. Caso de Estudio

Como resultado de la metodología para identificación de tramos críticos de suelos susceptibles a deslizamientos, se utilizó la información disponible de relieve del terreno, litología y humedad de suelo como factores contribuyentes, así como la actividad sísmica y precipitación como factores detonantes, asignando pesos relativos y específicos según lo indicado en la Tabla 1, y reemplazando las ecuaciones (1), (2) y (3); con la información fue posible construir el mapa de susceptibilidad en el derecho de vía de un sistema de transporte, del cual se resalta el siguiente tramo con riesgo alto:

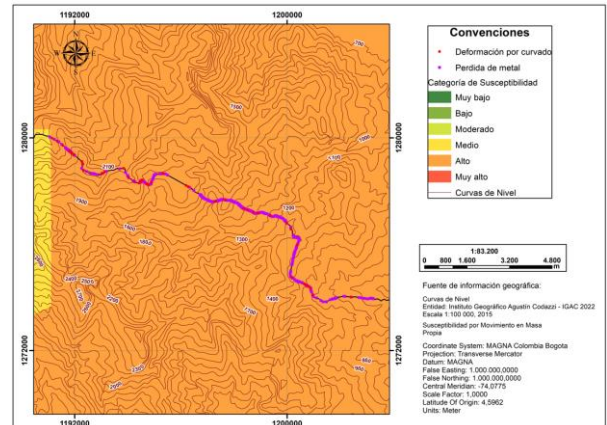


Figura 2. Zona con Riesgo Alto Obtenida al Desarrollar la Metodología

Este tramo de tubería tiene una longitud de 16.6 Km. Verificando el resultado de las inspecciones con herramienta instrumentada ILI (In Line Inspection) tecnología MFL para identificación de corrosiones, se obtiene que el tramo identificado presenta un total de 9526 corrosiones con pérdida de espesor variable entre 10 y 55%. Esta tubería también fue inspeccionada con herramienta geométrica, incluyendo unidad de mapeo inercial de alta resolución, así como un análisis de primer nivel para identificar zonas de deformación por curvado, producto de lo cual se tienen 40 zonas bending.

Luego de identificar el tramo y confirmada la criticidad, se procedió a establecer la gestión de mantenimiento del tramo consistente en realizar excavaciones sobre la tubería que permiten aliviar la carga impuesta por el terreno y así reducir los esfuerzos sobre la misma garantizando su integridad estructural.

Para poder establecer un plan de mantenimiento óptimo de la zona realizando las excavaciones de manera que minimice simultáneamente la susceptibilidad de falla de la tubería y mantenga el costo por debajo de un límite total, se aplicó una metodología de optimización de excavaciones para liberación de esfuerzos, así como la determinación de las distancias de excavación de las zonas detectadas por la herramienta inteligente inercia. Este proceso permitió seleccionar las zonas más críticas a atender y determinar una distancia

óptima de excavación en la que se incluya adicionalmente anomalías de corrosión adyacentes sin superar el presupuesto máximo proyectado.

Para tal efecto, se implementó un código que fue desarrollado por los autores con el fin de ejecutar un algoritmo evolutivo multiobjetivo NSGA-II,

Como resultado del proceso de optimización, el algoritmo inicialmente seleccionó un total de 9 zonas bending strain de las 40 inicialmente identificadas en el tramo de estudio, escogiendo las más críticas, mientras optimizó la reducción de la susceptibilidad de falla y se ajustó al 95% del presupuesto total. Posteriormente, el algoritmo realizó la optimización genética generando varias generaciones y mutaciones de estas, consistentes en distintas iteraciones y posibilidades de combinación de extensión de las excavaciones de las zonas bending strain.

Como resultado de este proceso, el algoritmo identificó dos zonas bending strain para que con el 5% por ciento del presupuesto permitieran agrupar el mayor número de corrosiones sin superar el total del presupuesto límite

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

→ Fase Inicial

* Bendings seleccionados: 9

* Presupuesto utilizado: 95% del presupuesto

→ Optimización por corrosiones

* Bendings extendidos: 2. Corresponde a las zonas que tienen asociadas las corrosiones más críticas.

* Presupuesto utilizado: 99% del presupuesto

→ Resultados finales luego de iteración y selección de la mejor alternativa:

* Presupuesto Total Utilizado: 99.64%

* Corrosiones mitigadas: 169

- Detalle por zona bending strain ampliada:

* Zona Bending Strain 1:

- Extensión aplicada: 258.70 m

- Corrosiones cubiertas: 118

* Zona Bending Strain 2:

- Extensión aplicada: 17.10m

- Corrosiones cubiertas: 51

Las otras 7 zonas bending strain continuaron con la misma extensión.

5. Conclusiones

* La metodología integrada desarrollada permite una optimización simultánea de la susceptibilidad de falla y los costos de mantenimiento en tuberías de hidrocarburos, utilizando técnicas geomáticas avanzadas y algoritmos evolutivos multiobjetivo.

* El enfoque Mora-Vahrson demostró ser efectivo para identificar tramos críticos susceptibles a deslizamientos, permitiendo una segmentación adecuada de tramos para enfocar la atención de planes de mantenimiento.

* El algoritmo NSGA-II permitió:

- Seleccionar estratégicamente 9 zonas de bending strain entre 40 presentes en la zona más crítica
- Optimizar la intervención cubriendo 169 corrosiones al extender dos de las excavaciones de zonas bending strain
- Maximizar la cantidad de atenciones utilizando prácticamente la totalidad del presupuesto (99%)

* La metodología ofrece los beneficios de reducción de riesgo de falla en tuberías mediante identificación temprana de zonas críticas, minimización de costos al agrupar excavaciones estratégicamente y es replicable para diferentes sistemas de transporte de hidrocarburos.

* La metodología genera un aporte diferenciador al integrar análisis geoespacial con optimización evolutiva de enfoque multiobjetivo que equilibra

riesgo estructural y restricciones económicas, así como el uso de herramientas computacionales avanzadas para decisiones de mantenimiento.

6. Bibliografía

[1] Kiefner, J. F. (1997). A risk management tool for establishing budget priorities. Presented in Risk Assessment/Management of Regulated Pipelines: A NACE TechEdge Series Program, Houston, Texas, Estados Unidos, 10-12 de febrero.

[2] Garay Rey, K. M. (2024, octubre). Evaluación preliminar de potenciales deslizamientos en tramos de la red de hidrocarburos, caso troncal Caño Limón - Coveñas durante la temporada húmeda a escala 1:100.000 [Trabajo de especialización en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada]. Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.

[3] Escobar, J. (n.d.). *Zonas sísmicas en Colombia*. En Colombia. Recuperado de <https://encolombia.com/educacion-cultura/geografia-colombiana/colombia/zonas-sismicas-en-colombia/>

[4] American Geosciences Institute. (n.d.). *Geology*. Recuperado el 25 de agosto de 2024, de <https://www.americangeosciences.org/earth/what-geology>

[5] Fidel, L., Villacorta, S., Zavala, B., Vílchez, M., Valderrama, P., Núñez, S., et al. (2010). *Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa del Perú*. En *XV Congreso Peruano de Geología, Cusco. Resúmenes extendidos* (pp. 308–311). Lima: Sociedad Geológica del Perú. *Publicación Especial 9*.

[6] Khobzi, J., & Usselman, P. (1974). Problemas de geomorfología en Colombia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 3(4), 59–86.

[7] Mora Castro, S., & Vahrson, W.-G. (1992, marzo 10–12). Determinación "a priori" de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos. En *Memoria del Primer Simposio Internacional Sobre Sensores Remotos y*

Sistemas de Información Geográfica (SIG) Para el Estudio de Riesgos Naturales (pp. 259–272).

[8] Obregón, C., & Lara, J. (2013). El mapa de susceptibilidad a movimientos en masa: Una herramienta para la gestión sostenible del territorio. *Espacio y Desarrollo*, 25, 49–64.

Oscar Gilberto Páez Ortiz Ingeniero Mecánico, Especialista en Alta Gerencia Financiera, Magíster en Ingeniería Industrial, PMP y Analista de Datos Certificado, con más de 22 años de experiencia gestionando proyectos en el sector energético e industrial, y 8 años dedicados al análisis de datos. Es experto en gestión de integridad estructural de equipos estáticos. Ha liderado equipos multidisciplinarios con dispersión geográfica, asegurando el cumplimiento de estándares y optimizando recursos estratégicos. Su enfoque analítico le ha permitido transformar datos complejos en soluciones prácticas, utilizando técnicas avanzadas de correlación y visualización para una adecuada toma de decisión basada en datos.

Diego Enrique Trespalacios Prada Ingeniero Mecánico con Magíster en Ingeniería Naval y especialización en soldadura, con 15 años de experiencia específica en análisis de integridad estructural, aplicado a sectores de alto impacto como Oil & Gas, minería y energía hidroeléctrica, optimizando la seguridad operativa de infraestructuras sometidas a cargas dinámicas y condiciones extremas. Múltiples Publicaciones en congresos nacionales e internacionales sobre integridad estructural en elementos sometidos a alta presión. Interés investigativo en el modelamiento numérico del comportamiento dinámico de los materiales compuestos en sistemas navales y offshore.

Karen Maritza Garay Rey Administradora Ambiental con especialización en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y una sólida formación en Cartografía y GIS. Cuenta con experiencia de 10 años en la aplicación de tecnologías geoespaciales para la gestión

ambiental, análisis de datos espaciales y toma de decisiones en proyectos relacionados con catastro, tierras e hidrocarburos. Título de Tecnología en Cartografía, especialización en SIG de la Universidad Internacional de Andalucía, y candidata a Especialista en Geomática. Posee habilidades técnicas avanzadas en software SIG, análisis geoespacial, capacidad para gestionar proyectos y trabajo en equipos interdisciplinarios.

1. **Nombre del autor:** Oscar Gilberto Páez Ortiz
 2. **Celular:** 3155129557
 3. **Dirección del autor:**
 - a. **Residencia:** Calle 172 No 55-74
 - b. **E. mail:** paez@giegroup.net
 - c. **Ciudad:** Bogotá D.C.
 - d. **País:** Colombia
-