

Plataforma tecnológica para el monitoreo de amenazas naturales en el oleoducto Ocesa

Technological platform for the natural hazard monitoring in the Ocesa Pipeline System

Hugo Alberto García García *

Juan Diego Colonia Ospina**

Julián Javier Corrales Cobos***

Resumen

El oleoducto de Ocesa en su recorrido hacia el puerto marítimo, atraviesa dos cordilleras de origen geológico diferente, 288 cruces con corrientes de agua y zonas de diverso clima y actividad sísmica. Para el monitoreo de estas amenazas naturales el oleoducto implementó una red de pluviómetros propia que en conjunto con el servicio de información satelital, radar de carga eléctrica e información de la red sísmica nacional están integrados en una plataforma web que recibe información en tiempo real. Para evaluar la amenaza, se presentan las ecuaciones que definen los umbrales de lluvia que desencadenan deslizamientos, y la carta que relaciona los sismos con probabilidad de afectación.

Palabras Clave: Amenazas naturales, sismos, lluvias, geotecnia de ductos, plataforma tecnológica.

Abstract

The OCENSA pipeline system crosses two range mountains with different geological origin, 288 under river crossing and zones with diverse climates and seismic activity. To monitoring his natural hazard OCENSA pipeline implement the own rain gages net and satellite information, electrical radar and seismic information integrated in a web platform that receive information in real time. The paper shows the equations that define the threshold of rain that triggering landslides and the relationship between tremors and consequences probability chart.

Key words: Natural hazards, earthquakes, rain, geotechnics for pipelines, technological platform

* Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Geotecnia, Universidad de Brasilia. Coordinador del área Civil & Geotecnia, OCENSA.hugo.garcia@ocensa.com.co

** Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Especialización en Gerencia Financiera, Universidad EAN. Jefe de Mantenimiento de Oleoducto, OCENSA.juan.colonia@ocensa.com.co

*** Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Geotecnia, Universidad de Los Andes. Magíster en manejo de desastres naturales, GRIPS University, Japón. Profesional de Geotecnia, OCENSA, julian.corrales@ocensa.com.co

I. AMENAZAS NATURALES SOBRE EL OLEODUCTO OCENSA

La ubicación de los yacimientos petrolíferos con respecto a los puertos de exportación de Colombia, hacen que los oleoductos estén sometidos a una serie de condiciones naturales complejas, puesto que deben atravesar el sistema de cordilleras andino, un sinnúmero de corrientes de agua, climas y enfrentar amenazas naturales solamente comunes para los países de la región andina (figura 1).

Entre los condicionantes de origen natural que debe enfrentar un oleoducto en nuestro medio, y específicamente para Ocenca, se destacan:

- Perfil topográfico

En su recorrido el oleoducto atraviesa enteramente la Cordillera Oriental y las estribaciones de la Cordillera Central, atravesando zonas escarpadas. La mayor altitud se presenta en el alto de Las Flores en Boyacá a 3000 msnm. En la figura 2 se ve el perfil topográfico del oleoducto.

- Cruces de corrientes de aguas

Antes de llegar al mar Caribe, el ducto atraviesa 288 cruces subfluviales (todos enterrados) incluyendo los principales ríos del país. Se destacan los ríos Cusiana, Upía, Lengupá, Minero, Magdalena, Nechí, Cauca, San Jorge y la Ciénaga Grande de Lórica.



Figura 1. Localización general del oleoducto Ocenca

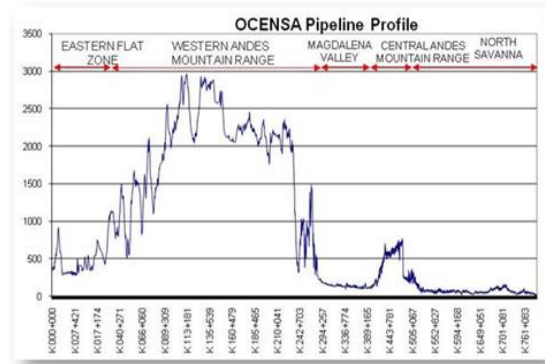


Figura 2. Perfil topográfico del oleoducto Ocenca.

- Geología diversa

Las cordilleras oriental y central de Los Andes colombianos son de origen diferente. La cordillera Central tiene origen ígneo y una edad de 280 millones de años. La Cordillera Oriental es de origen sedimentario y tiene una antigüedad de 3 millones de años. Las rocas, perfiles de suelo y problemas que se enfrentan son diferentes.

- Espesores de suelo

En la región tropical, debido a la acción de los agentes atmosféricos, los espesores de suelo producto de la meteorización de las rocas son mucho más potentes que los que se presentan en regiones más septentrionales. De esta manera, la ocurrencia de deslizamientos en material suelo es mucho más recurrente.

- Sismicidad

Colombia está localizada en medio de las placas tectónicas Pacífica y Caribe. Esto hace que la amenaza sísmica sea un factor importante y pueda afectar el ducto o detonar deslizamientos y represamientos de ríos y quebradas.

- Clima

Colombia se encuentra ubicada en la zona tropical y el régimen climático es influenciado por el Frente Intertropical de Convergencia que determina dos períodos de lluvias en el año en la región Andina y Caribe. Debido a características topográficas las lluvias varían ampliamente en distancias muy cortas. En el caso del oleoducto el acumulado de lluvias anual en Tunja es de 1000 mm, mientras que en Zaragoza en Antioquia alcanza 5000 mm. Variaciones por exceso como las que trae consigo el fenómeno de La Niña hacen que se aceleren procesos de deslizamientos y socavaciones de quebradas.

A. Las Geoamenazas

Definidas como las amenazas geotécnicas, hidrotécnicas y geoambientales que pueden afectar un oleoducto durante su construcción y etapa de funcionamiento. En nuestro medio se ven exacerbadas por los condicionantes y particularidades del relieve, clima y condiciones colombianas mencionadas anteriormente. Entre los más destacados tenemos.

- Movimientos de masa

Movimientos de los taludes, ocurridos por acción de la gravedad, en los que una masa de suelo se desplaza talud abajo. Entre los más peligrosos para la integridad de los oleoductos están los deslizamientos, flujos y reptaciones.

- Erosiones

Las partículas de suelo son arrancadas y arrastradas individualmente por acción de los agentes atmosféricos formando surcos y cárcavas. Este fenómeno reduce la cobertura sobre los oleoductos y eventualmente provoca su destape.

- Socavaciones

Los ríos y quebradas, especialmente en zonas montañosas, tienen alta capacidad erosiva y

disminuyen gradualmente el nivel de su fondo o se amplían hacia las márgenes. Este fenómeno hace que la tubería enterrada bajo los lechos se destape y puedan ser potencialmente impactadas.

B. Detonantes

Los anteriores fenómenos se ven detonados principalmente por tres agentes a saber: lluvias intensas o acumuladas, sismos y acción antrópica. Las lluvias, varían en cantidad acumulada e intensidad, con las anomalías atmosféricas como lo son el fenómeno de El Niño y La Niña.

II. PROCESO DE GESTIÓN ANTE GEOAMENAZAS

La estrategia de manejo de geoamenazas implementado en Ocesa se describe como parte del ciclo de control PHVA (planear, hacer, verificar y ajustar). Este modelo fue elegido porque la experiencia ha demostrado que el proceso de mantenimiento del oleoducto es cambiante y requiere un modelo de gestión para garantizar la mejora continua que es la característica principal de la estrategia. La figura 3 muestra la estructura general de la estrategia

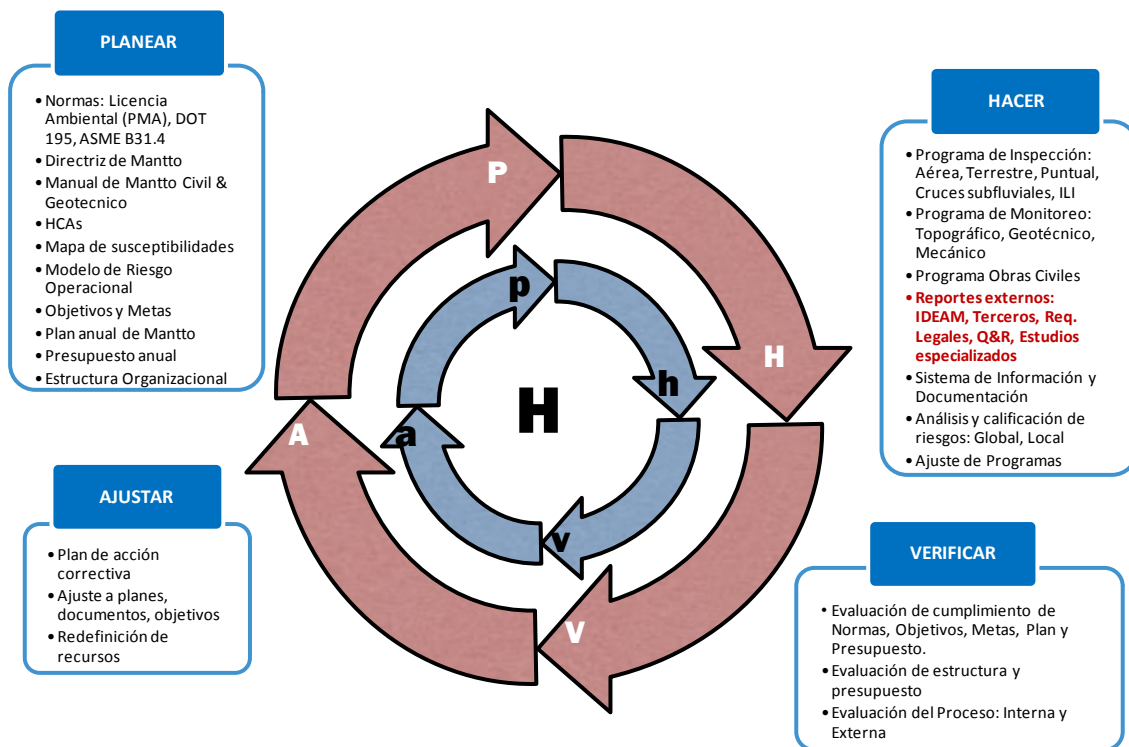


Figura 3. Proceso de gestión de geoamenazas

El proceso de gestión de geoamenazas, busca garantizar la operación segura de la tubería, conservando el registro de cero incidentes y fallas en el sistema debido a las amenazas naturales. Este proceso se basa actividades y acciones específicas basadas en el análisis de riesgos, para asistir y mitigar rápidamente las condiciones que podrían afectar a la integridad de la tubería y la estabilidad del derecho de paso con el fin de garantizar el funcionamiento normal de la tubería.

III. MONITOREO DE LLUVIAS Y AMENAZAS NATURALES

Como parte del Programa de Mantenimiento del Oleoducto, Ocesa ha implementado una serie de recorridos y monitoreos de la condición del suelo. Entre las actividades planeadas se destacan recorridos aéreos y terrestres, estudios especializados, monitoreos topográfico y geotécnico y colocación de galgas de deformación.

Recientemente, y con el objeto de ir un paso más allá en el mantenimiento preventivo, se implementó el monitoreo de lluvias y otras amenazas naturales. Para este desarrollo, el apoyo de convenios como el desarrollado con el Ideam ha sido un gran impulso.

A. Convenio con el Ideam

Ocesa estableció un convenio con el Ideam, Institución Estatal para Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales que le permite tener reportes y pronósticos diarios de lluvias en el área de influencia del oleoducto. Adicional a lo anterior, el Oleoducto Central instaló 22 pluviómetros propios en sitios claves para complementar la red del Ideam.

B. Proyecto umbrales de lluvia

Es bien conocida la estrecha relación existente entre movimientos de masa vs. precipitación y crecientes vs. precipitación. Para el corredor del oleoducto de Ocesa se utilizó la información histórica de las estaciones pluviométricas del Ideam y un inventario de 161 deslizamientos con información de localización y fecha del evento.

- Zonificación climática

Resulta evidente que una ecuación única para definir umbrales, en un oleoducto que atraviesa diversas zonas geológicas y climáticas muy diferentes no es posible, por esta razón la primera actividad desarrollada en el proyecto consistió en usar una zonificación climática usando la metodología de Holdridge, que clasifica la tipología del clima de acuerdo con la precipitación y la temperatura. Se utilizaron en el proyecto la información proveniente

de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Ideam a las que se les realizó un análisis para determinar sus regímenes climáticos con el fin de poder determinar su agrupación para estudio y luego mediante su asociación con los deslizamientos, se determinó su radio de representatividad; por último se efectuó una revisión de la zonificación con las zonas geológicas para la elaboración del mapa de zonificación definitiva, el cual cuenta con nueve zonas (figura 4), para cada una de las cuales se calcularon los umbrales de lluvia detonante de deslizamientos.

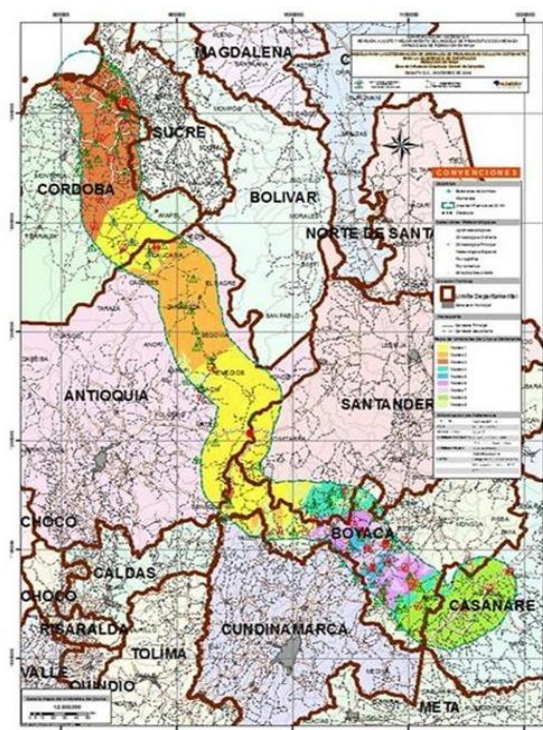


Figura 3. Sectorización climática del Oleoducto Ocesa. Producto desarrollado en convenio con Ideam

evento, tenía una estación cercana dentro de la misma zona climática y si la estación tenía la información pluviométrica que coincidiera con la fecha de ocurrencia del mismo. De esta manera los eventos analizados con validez estadística se redujeron a 50 y están relacionados con 27 estaciones del Ideam.

- Determinación de rangos de probabilidad

En esta etapa del estudio se busca estimar un modelo que determine la probabilidad de ocurrencia del evento en un día determinado tomando como insumo variables independientes que proporcionan

información sobre la precipitación de los últimos días. Las variables del modelo son las siguientes:

La variable respuesta está dada por la información que se tiene de si ocurrió o no un evento.

Las variables independientes del modelo están dadas por la precipitación en los días anteriores al día en que se quiere calcular la probabilidad de un evento, pueden estar dadas por valores acumulativos o por valores simples de la precipitación.

Para la precipitación puntual de los días anteriores al evento, se consideraron los dos días anteriores y del día en el que ocurrió el evento. Los rangos de lluvia evento y lluvia acumulada son los que se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Variables independientes consideradas para los modelos

	Notación	Descripción
Acumulados	Acum. 3	De los últimos 3 días
	Acum. 5	De los últimos 5 días
	Acum. 10	De los últimos 10 días
	Acum. 15	De los últimos 15 días
Precipitación puntual	P0	El día del evento
	P1	El día anterior al evento
	P2	En el día -2

Para cada grupo de estaciones se construyó un modelo que permitiera determinar los días propicios para la ocurrencia de un evento y estimar su probabilidad de ocurrencia. Para ello se usó el análisis discriminante.

El análisis discriminante es una técnica estadística utilizada para la clasificación de elementos basada en varias de las variables que los caracterizan. Se busca entonces con el análisis discriminante realizar un reconocimiento del patrón de comportamiento están clasificados como los “días con evento”, los restantes como “días sin evento”.

Un elemento de análisis está dado por un día específico caracterizado por las variables

independientes que describen su historial de precipitación (P0, P1, P2, acum 3, acum 5, acum 10, acum 15): Algunos de estos días, ya que se conoce una muestra de elementos bien clasificados (ocurrencia o no del evento) que sirve como pauta o modelo para clasificar los siguientes elementos.

Una vez obtenido el modelo con mayor poder de predicción; es decir, el que identifique la mayor cantidad de eventos correctamente y que contenga el menor número de variables posible, se estiman los parámetros de la función discriminante y el rango de probabilidad de ocurrencia de un evento.

Cuando son suficientes solamente dos variables los rangos se establecen mediante una función discriminante que corresponde a la ecuación de una recta (figura 5).

Cuando para predecir la probabilidad de ocurrencia de un evento se necesitan más de dos variables no es posible establecer los rangos de forma simple. Es necesario realizar un análisis de componentes principales para reducir el número de variables, en lo posible solo dos variable que resuman las variables iniciales. Esto permitiría un análisis grafica en un plano cartesiano.

En la figura 6 se observa un ejemplo de cómo es necesario la combinación lineal de varias variables independientes para mejorar el poder predictivo del modelo estadístico.

De esta manera los parámetros para determinar los días que corresponden a un rango de probabilidad se establecen mediante las ecuaciones de las rectas que dividen diferentes rangos de probabilidad de ocurrencia del evento. Los diferentes rangos se categorizaron en “umbrales” que definen la probabilidad de ocurrencia como Bajo, Medio, Alto, etc.

- Puesta en funcionamiento

Una vez la lluvia detonante o lluvia acumulada supera el umbral que genera deslizamientos se reporta una alarma en el área de influencia de la estación pluviométrica que desemboca en un recorrido aéreo y en inspecciones puntuales. Semanalmente se generan reportes de amenaza de deslizamientos debidos a las lluvias instantáneas y acumuladas ocurridas en los últimos días (figura 7).

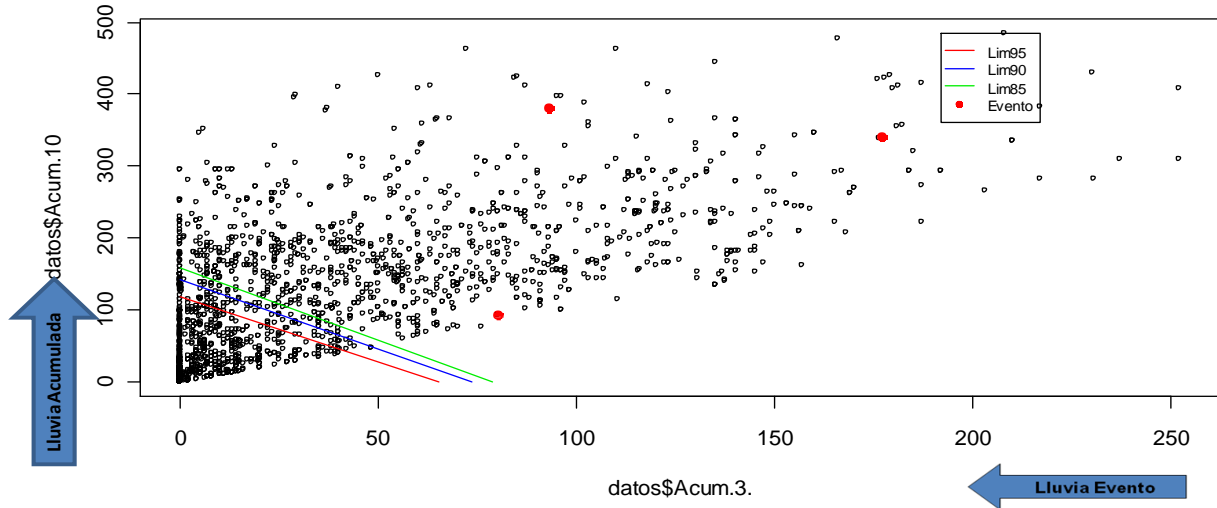


Figura 5. Rangos de probabilidad de ocurrencia de un evento obtenidos mediante análisis discriminante

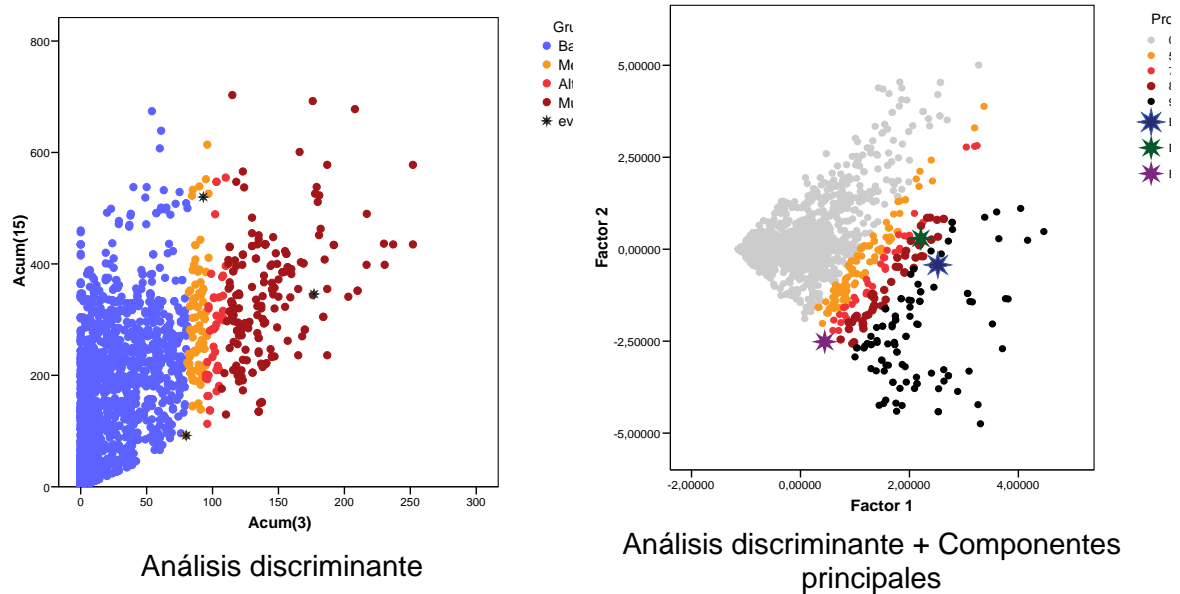


Figura 6. Mejora del poder predictivo al combinar las variables independientes mediante la técnica de componentes principales.

Un ejemplo de los resultados del análisis estadístico es explicado a continuación: Para la zona climática denominada “Calido y seco” el Factor dependiente X es:

$$X = -0.8047 + -0.0352Acum3 + 0.049Acum5 + -0.0336Acum10 + 0.0242Acum15$$

El valor final de X es una combinación lineal de las lluvias acumuladas para 3, 5, 10 y 15 días. Donde,,

$X < 1.164$, Probabilidad de ocurrencia de falla P es menor que el 50% = Probabilidad Muy Baja

$1.164 < X < 1.528$, P= 50% - 70% = Baja Probabilidad

$1.528 < X < 1.75$, P= 70% - 80% = Probabilidad Media

$1.75 < X < 2.092$, P= 80% - 90% = Probabilidad Alta

$X > 2.092$, P > 90% = Probabilidad Muy Alta

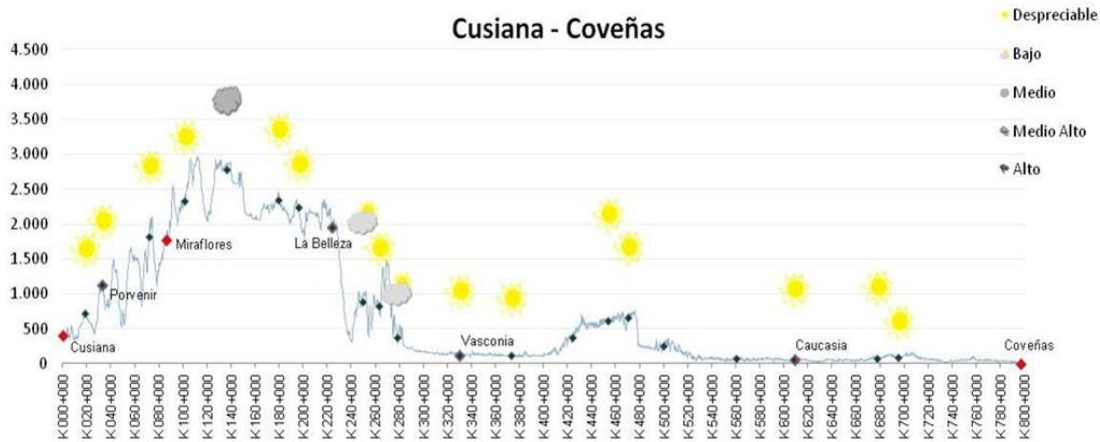


Figura 7. Informe semanal de amenaza de deslizamientos debido a las lluvias

C. Plataforma de monitoreo de amenazas naturales

Debido a las variaciones climáticas y naturales que han hecho más inclementes las condiciones de mantenimiento, se tomó la decisión de ampliar las variables monitoreadas y centralizar la información en una sola plataforma, el proyecto que está actualmente en la fase de implementación se denomina monitoreo de amenazas naturales en tiempo real.

La plataforma cuenta con los siguientes servicios:

- Visualización de información pluviómetros Ocesa en tiempo real vía Web.
- Pronóstico de lluvias y otras variables meteorológicas a 72 horas.
- Implementación de ecuaciones de umbrales de lluvia que detonan deslizamientos, generación de alertas.
- Radar de tormentas eléctricas, imágenes de satélite de nubosidad.
- Información de niveles de ríos con datos de sensores en sitio.
- Información de sismos, magnitud, profundidad y generación de alertas.

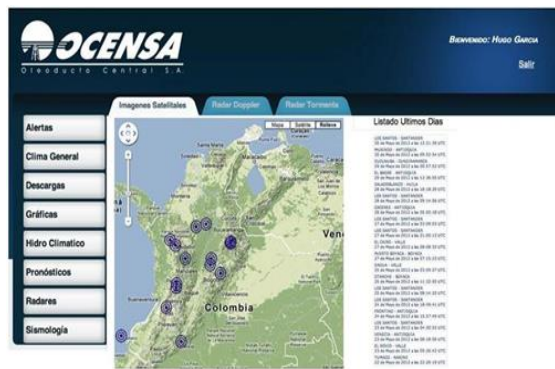


Figura 8. Imagen de módulo sísmico. Plataforma de amenazas naturales.

En la figura 8, se observan imágenes de los módulos del módulo sísmico de la plataforma.

Como insumo de la plataforma Ocesa instala estaciones meteorológicas y medidores de nivel de ríos en diferentes puntos del área de influencia del oleoducto que transmiten datos en tiempo real vía GPRS. La información sísmica se obtiene en tiempo real también, del Ingeominas.

La información se puede acceder vía web y cuando se supera un umbral determinado se envían alertas mediante mensaje de texto a los teléfonos celulares de los responsables de las verificaciones.

En la plataforma se implementan ecuaciones para generación de alertas que relacionan la magnitud del sismo y su distancia al oleoducto con la probabilidad de afectación debida al movimiento telúrico (figura 9).

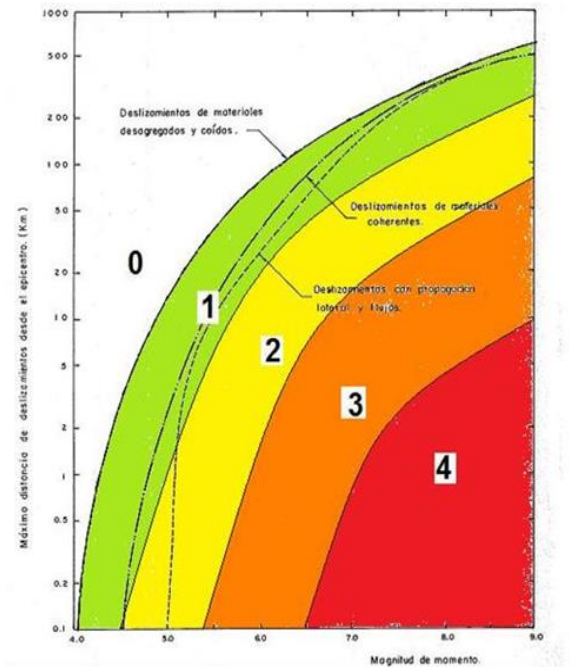


Figura 9. Carta de probabilidad de afectación debida a sismo.

IV. VARIACIONES CLIMÁTICAS Y SUS EFECTOS SOBRE EL MANTENIMIENTO

A. Variación de lluvias debidas al fenómeno de La Niña

Para ilustrar el aumento en la precipitación debido al último y crudo fenómeno de La Niña que abarcó parte de 2010, 2011 y 2012 se presenta la figura 10. Se comparan las lluvias acumuladas mensuales de la Estación Samacá de Orensa durante 2010 y 2011 con los máximos históricos (del año 1968 a 2007) de la Estación del Ideam Villa Carmen en Samacá (ubicada a 8 km de la estación de Orensa).

Se evidencia que las lluvias acumuladas mensuales de julio de 2010 y abril y noviembre de 2011 fueron significativamente mayores que las registradas en esos mismos meses durante los últimos 38 años de los que se posee registro. Esta situación se presentó de forma similar en otros sectores del oleoducto y en general en el territorio colombiano.

Tales condiciones representaron la aparición de nuevos procesos y la aceleración de existentes que exigieron gastar recursos extraordinarios para evitar afectación al oleoducto.

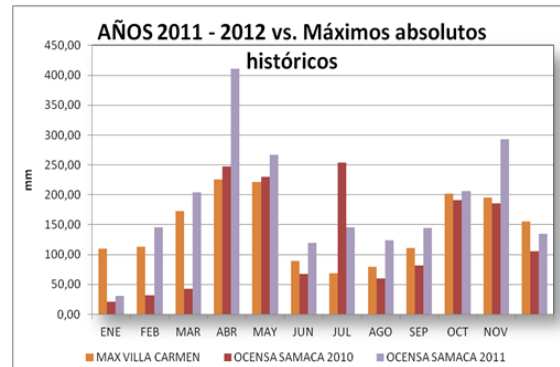


Figura 10. Comparativo entre los máximos históricos de los últimos 30 años en la estación Villa Carmen Ideam en Samacá y las lluvias 2010 y 2011 en la estación Samacá de Orensa.

B. Efectos en el presupuesto

Al observar la evolución presupuestal del mantenimiento para obras civiles con los años, se ven claramente picos en 2008, 2011 y 2012 (hasta agosto). En la figura 11 se discriminan lo que se ejecutó con presupuesto de rutina y lo que se cargó al rubro emergencias por causas naturales.

En 2011 y por extensión temporal de las obras, durante el 2012, se presentaron aumentos significativos en el presupuesto destinado a estabilizar deslizamientos y proteger cruces con corrientes de agua para garantizar la integridad del oleoducto Orensa. Pese a este “impacto” se destaca que el oleoducto Orensa no sufrió roturas, daños o paradas de bombeo este hecho, se atribuye a los mecanismos de detección de ocurrencias, monitoreos y obras que Orensa implementa en su programa.

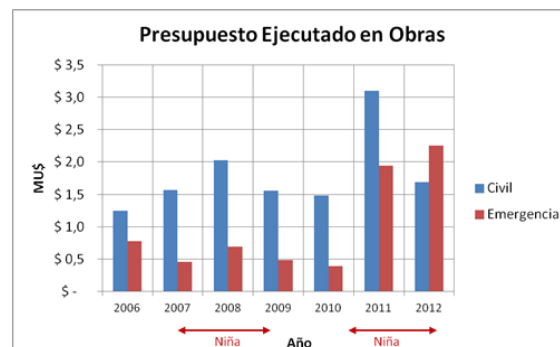


Figura 11. Evolución del presupuesto de mantenimiento y relación con el fenómeno de La Niña.

V. OBRAS DE MITIGACIÓN Y CONTROL

Como resultado final del proceso de planeación, análisis de riesgos y priorización se define el plan de acción para el monitoreo, mitigación, control y eliminación del riesgo. La acción puede ser

emprender alguna o varias de las acciones de monitoreo o la ejecución de obras.

A. Obras de mantenimiento

Estas obras corresponden a aquellas que son ejecutadas de manera proactiva antes de que un evento ocurra. Son aquellas realizadas dentro del mantenimiento común del derecho de vía.

Entre las obras de mantenimiento preventivo se encuentran las siguientes:

- Limpieza y descolmatación de canales.
- Sellado de grietas.
- Reparaciones menores.
- Rocería.
- Cortacorrientes y barreras vivas.

B. Obras correctivas

Este tipo de obras se realizan de manera reactiva cuando ya se ha presentado un evento en el derecho de vía o sus vías de acceso. Tienen como objeto restituir el sitio a su condición original. Estas obras se consideran típicas y no necesitan diseños detallados o análisis específicos. Entre ellas se cuentan:

- Construcción de canales, trinchos y manejo de aguas superficiales.
- Construcción de gaviones y estructuras de contención.
- Construcción de filtros.
- Realización de estructuras de cruce, bateas y disipadores.

C. Alivios de esfuerzos

Cuando la tubería del oleoducto atraviesa sitios con problemas de inestabilidad geotécnica, con el tiempo puede llegar a acumular esfuerzos y deformaciones debido al movimiento del terreno pudiendo llegar a comprometer su integridad.

Para mantener la tubería con valores de deformaciones por debajo de los criterios establecidos es necesario realizar actividades de alivio de deformaciones. Estas actividades consisten en retirar el suelo circundante a la tubería permitiendo que esta se relaje buscando su alineamiento original.

D. Obras especiales

Este ítem corresponde a la construcción de obras de gran escala recomendadas en los estudios

especializados y que responden a un diseño específico, tales como:

•Obras de drenaje: lechos drenantes, cortinas impermeables, pozos verticales, túneles de infiltración, drenes horizontales.

•Obras de contención: pilotes, caissons, sistemas de anclaje.

•Obras de protección: revestimiento de talud (revestimientos flexibles), revestimientos rígidos (concreto). Hidro-siembra.

E. Obras de elusión

Cuando el riesgo para la integridad del oleoducto debido a una geoamenaza se considera inaceptable se puede tomar la decisión de construir una variante para eludir el problema. La toma de una decisión de esta magnitud requiere estudios técnicos, ambientales, financieros y la decisión es tomada por la junta directiva de Ocesa.

VI. CONCLUSIONES

Los oleoductos en Colombia, debido a la localización de los yacimientos con respecto a los puertos, deben atravesar buena parte del país. Debido a esta situación están expuestos a geoamenazas entre las que se cuentan deslizamientos, crecientes súbitas, sismos y erosiones.

Como avance en el proceso de mantenimiento preventivo de los ductos frente a geoamenazas el oleoducto Ocesa ha implementado umbrales de probabilidad de deslizamientos debidos a lluvias para diferentes zonas climáticas homogéneas.

De igual manera, actualmente se desarrolla el proyecto de plataforma de amenazas naturales en tiempo real en el que se monitorearán también los niveles de ríos y se obtendrán datos de los sismos y la probabilidad de daño debido a estas ocurrencias.

REFERENCIAS

- [1.] Holdridge, L. R.; Grenke, W.; Hatheway, W.H.; Liang, T.; Tosi, J.A. «Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study». Pergamon Press, Oxford, 1971.
- [2.] IDEAM Sistema Nacional Ambiental Atlas Climatológico de Colombia. ISBN 958-8067-14-6. Bogotá, 2001

- [3.] ISAAKS, E. H. y Srivastava, R. M. An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 1989.
- [4.] MAYORGA R. Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias – Departamento de Geociencias. Programa de postgrado – Magister en Meteorología. Bogotá, D.C., 2003.
- [5.] STORCH, H. V. y Zwiers, F. W. Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, 1999.
- [6.] WEI, W. Time series Analysis. Univariate and Multivariate Methods, Addison Wesley, 2006

