

Evaluación cartográfica de la vulnerabilidad frente a derrames de hidrocarburos en ductos. Consecuencias ambientales y sociales

Cartographic assessment of vulnerability to pipeline oil spills. Environmental and social consequences

Omar Daza-Leguizamón,* Enrique Vera López,** y Luis Chías***

Recibido: 11/02/2019. Aprobado: 02/07/2020. Publicado en línea: 01/04/2020.

Resumen. La modelación y el análisis espacial han permitido mejorar la gestión de integridad de ductos de transporte de líquidos peligrosos gracias a que facilitan la identificación y la clasificación de tramos de los ductos de petróleo en función del grado de afectación que un potencial derrame pudiera ocasionar en el medio ambiente. Aunque existen herramientas de análisis basadas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la identificación de tramos, no priorizan adecuadamente las actividades de gestión de integridad sobre la tubería, ya que sus resultados no incluyen un análisis integrado del territorio. En este artículo se presenta una metodología basada en el uso del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) y el cálculo del costo mínimo acumulado (CMA) para clasificar puntos sobre tubería con afectación simultánea a varias áreas de alta consecuencia. El PAJ permitió establecer la vulnerabilidad relativa de cada uno de los elementos analizados del territorio. Con el cálculo del CMA se estimó el tiempo que tardaría el derrame, originado en la tubería, en alcanzar cada elemento. La vulnerabilidad relativa y el costo mínimo acumulado se utilizaron para calcular un índice de consecuencia que se asigna a puntos sobre el trazado del ducto. La metodología fue aplicada a un poliducto en el territorio colombiano para exponer las ventajas de identificar la afectación simultánea a varios elementos del lugar. Los

resultados obtenidos permiten diferenciar adecuadamente puntos con diferente nivel de afectación, y son datos útiles para la implementación del análisis de riesgo en gestión de integridad de ductos.

Palabras clave: Gestión de integridad, vulnerabilidad, análisis de riesgo, modelo cartográfico, análisis multicriterio.

Abstract. Modeling and spatial analysis led to improved management of the integrity of pipelines of hazardous liquids because it facilitates the identification and classification of sections of oil pipelines according to the extent of environmental affection that may result from a potential spillage. Although analytical tools based on Geographic Information Systems are available for the identification of sections of pipelines, these fail to prioritize properly the management activities related to pipeline integrity, as the results thereof do not include an integrated analysis of the territory. This article outlines a methodology that combines spatial data on population, environmentally sensitive areas, infrastructure, streams, route of pipelines transporting hydrocarbons, to identify the indirect consequences of leakage of transported liquids. Our findings provide information

* Grupo de Investigación en Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Avenida Central del Norte 39-115, Tunja. <https://orcid.org/0000-0002-9398-3610>. Email: omar.daza@uptc.edu.co

** Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Avenida Central del Norte 39-115, Tunja. <https://orcid.org/0000-0003-4150-9308>. Email: enrique.vera@uptc.edu.co

*** Geotecnología en Infraestructura Transporte y Sustentabilidad, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, Coyoacán, Ciudad de México. <https://orcid.org/0000-0003-0686-0936>. Email: luis.chias@gmail.com

related to the impact of spills, which are easily integrated to methodologies for integrity management based on risk analysis.

The methodology is based on the use of the Hierarchical Analysis Process (PAJ, in Spanish) and the calculation of the Minimum Cumulative Cost (CMA) to group together points along pipelines with simultaneous impacts involving several heavily affected areas. PAJ defines each at-risk element in the territory and determines the relative vulnerability by calculating weighting factors. The CMA is calculated from the element of interest to each point in the pipe; this process leads to identifying the proximity between them based on a surface spill. The transportation cost is used mainly to modify the vulnerability as a function of distance, so that vulnerability decreases with increasing distance and the cost of transportation from the pipeline. Implementation requires the design of cartographic models to describe data processing and analysis and spatial information. The cartographic models designed include spatial analysis processes for calculating cost maps, CMA, algebraic overlay, and estimates of impact levels for specific pipeline points.

PAJ contemplates the fulfilment of four phases: the first defined as an issue the need to classify pipelines according to the extent of environmental and social consequences. The second identified vulnerable elements in the territory and proposed a hierarchical three-level structure. The third set paired-comparison matrices, and calculated the weighting factors for each element at each level of the hierarchical structure with the Delphi method and a panel of experts. The fourth calculated the weighting factors for the last level using comparison values for intermediate pairs (Saaty, 2008).

INTRODUCCIÓN

El transporte de petróleo o de sus derivados a través de sistemas de ductos conlleva riesgos de falla durante su operación, que generan pérdidas del fluido e impacto negativo de tipo ambiental, social y económico. Como parte de las acciones que buscan las empresas encargadas de vigilar el adecuado funcionamiento de estos sistemas con el fin de evitar fugas, se proponen planes de gestión de integridad que tienen como objetivo lograr una predicción precisa de los defectos y equilibrar la confiabilidad y los costos de operación de una manera efectiva (Xie y Tian, 2018), facilitando la implementación de acciones de inspección, mitigación o remediación (DeWolf, 2003; Guzman y Aoyama, 2017). Los tres principales componentes de un programa de integridad son la identificación y detección de defectos, la predicción del crecimiento del defecto y la gestión basada en riesgo

The spatial representation of the CMA of the spill requires a map of surface transport cost considering transport at ground level and through rivers. For ground transport, we used Manning's equation assuming very wide rectangular cross sections (flat and convex plots) and parabolic sections (concave plots). For river transport, we included a constant k , which is higher than 1 for costs associated with water flows; this allows simulating the increased spill rate when transported by rivers. CMA represents the shortest time needed for a spill to travel the distance between the pipeline and any of the elements analyzed in the territory. The data required for calculation with the ArcGIS software are the map of costs, the digital elevation model, and vertical and horizontal cost factors. The layers of standardized minimum cost are overlaid algebraically using the weighting factors calculated previously. Finally, values are assigned to each point on the route of the pipeline.

The proposed methodology offers significant advantages compared to traditional methods regarding the identification of sections that impact heavily affected areas. The implementation of cartographic models yielded a classification of pipeline points, considering an analysis that integrates environmental and social aspects of the territory. On the other hand, the impact index, expressed in a range of 0 to 1, can be easily integrated to risk assessment matrices in pipeline integrity management programs. Finally, the methodology is flexible and can be reproduced in other geographic areas with differing social and environmental characteristics.

Key words: management of integrity, vulnerability, risk analysis, cartographic model, multicriteria analysis.

(Xie y Tian, 2018). En el análisis del riesgo se predice y previene la ocurrencia de eventos indeseables mediante la recopilación e integración de información cualitativa y cuantitativa de posibles causas, consecuencias y probabilidad de eventos adversos (Shahriar, Sadiq y Tesfamariam, 2012). En este contexto se aprecia que las actividades incluidas en la gestión de integridad estén relacionadas con elementos ubicados en un espacio geográfico (tubería, sociedad, medio ambiente), que deben ser analizados en función de sus relaciones espaciales para garantizar una adecuada evaluación del riesgo.

Para la caracterización y la clasificación de tramos de la tubería en función de las consecuencias de un derrame, se puede recurrir a códigos o normas, como la sección 195.450, título 49, del Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos, el estándar API 1160 del Instituto Americano del Petróleo y la norma técnica colombiana NTC

5901, en los que se indican aspectos mínimos a considerar en este tipo de análisis. La clasificación del ducto depende del nivel de impacto que puede tener una falla y, por lo tanto, de la proximidad de los elementos afectados del territorio. En el Código Federal de Regulaciones de Estados Unidos se definen las áreas de alta consecuencia, como cuerpos de agua que sirvan para la navegación comercial, áreas altamente pobladas, otras áreas pobladas y áreas inusualmente sensibles (Legal Information Institute, 2000a). En esta última categoría se consideran las fuentes de agua para consumo humano y los recursos ecológicos (Legal Information Institute, 2000b). En la norma colombiana para la identificación de áreas de consecuencia se consideran aspectos como densidad poblacional, número de unidades habitacionales, áreas recreativas, lugares públicos, cantidad y calidad de recursos ambientales, bocatomas, pozos de acueductos, vías navegables, vías férreas, autopistas y carreteras nacionales (Icontec, 2012). Estos son dos ejemplos de los elementos del territorio que pueden ser considerados en un estudio de identificación de tramos con potencial de impacto sobre el medio ambiente y la población.

Además del inventario de los elementos en el territorio que pueden ser afectados por un derrame desde la tubería, se requiere una metodología para la clasificación del ducto. Para los ductos de transporte de líquidos peligrosos se puede recurrir a metodologías que involucren el análisis y el modelamiento espacial para clasificar los tramos en afectación directa o indirecta. Las áreas impactadas directamente por derrames desde ductos se pueden identificar implementando operaciones de análisis espacial de proximidad, sobreposición (Huisman et al., 2014; Zabala et al., 2013) y georeferenciamiento lineal (Jia et al., 2009). Por otro lado, la identificación de las áreas de alta consecuencia impactadas indirectamente requiere análisis exhaustivos para considerar el transporte superficial o subterráneo del fluido después del derrame (Aguilar y Rapik, 2014; Daza-Leguizamón, Vera-López y Riaño-Cano, 2016; Gin y Davis, 2012; Paige, Park y Posner, 2003; Parrot, 2009; Zabala et al., 2013). En el primer caso se obtienen como resultado los puntos de inicio y finalización del tramo que

afecta a cada uno de los elementos del territorio estudiado, mientras que en el segundo se analiza si cada punto de origen de derrame puede o no afectar el elemento. Estos resultados requieren un procesamiento posterior para integrarlos y poder utilizarlos como insumo para el análisis de riesgo.

Las metodologías de análisis espacial propuestas para la identificación de tramos con afectación a áreas sensibles presentan debilidades que hacen que los resultados de su implementación sean de difícil integración en las matrices de riesgo dentro de la gestión de integridad. La principal desventaja es la clasificación del ducto considerando la proximidad a cada tipo de elemento de forma independiente. Este enfoque dificulta la comprensión de los efectos simultáneos sobre más de un elemento para un mismo tramo, ya que en el momento de ocurrir un derrame, un solo tramo puede afectar varios elementos del territorio en un mismo instante o de forma secuencial. Otra desventaja es que no tiene en cuenta la distancia relativa de cada punto de la tubería a cada elemento de análisis, es decir, se identifica el tramo pero no se da mayor importancia a los que están más cercanos al elemento sensible. Además, la simulación de derrames implica la selección, a veces subjetiva, de puntos específicos, por lo que se pueden dejar de analizar puntos de importancia para el cálculo del riesgo total. A causa de lo anterior se requieren mejoras metodológicas para clasificar el ducto con relación a las consecuencias causadas por un derrame desde la tubería.

En este artículo se propone una metodología para la combinación de datos espaciales de población, áreas ambientalmente sensibles, infraestructura, corrientes hídricas y trazado de ductos de transporte de hidrocarburos para identificar la consecuencia indirecta causada por la fuga del líquido transportado. La metodología se basa en el uso de los SIG, el PAJ y los modelos cartográficos para calcular un índice de consecuencia sobre puntos equidistantes a lo largo del trazado de la infraestructura lineal, y así suplir las debilidades de los métodos existentes. La propuesta se fundamenta en metodologías realizadas por el Instituto de Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de los Materiales durante la ejecución de proyectos de gestión de integridad (Daza et al., 2013) y pla-

nificación minera (Daza-Leguizamón et al., 2018) en los últimos seis años. Los valores del índice están en función del CMA de transporte, entre el origen y el destino del derrame, la vulnerabilidad relativa de los elementos analizados del territorio y el número de elementos que se pueden afectar. Para la aplicación de la metodología se tienen en cuenta las definiciones de áreas de alta consecuencia dadas por el Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos (49 CFR 195.450 y 49 CFR 195.6) y las recomendaciones de la norma colombiana NTC 5901.

METODOLOGÍA

El objetivo de la propuesta metodológica es aportar información que se pueda integrar con las metodologías para la gestión de integridad basadas en el análisis del riesgo (), que consideran el riesgo como una función de las consecuencias del derrame (vulnerabilidad) y la probabilidad de falla (peligro) (American Petroleum Institute, 2013; Singh, 2014). Se considera que las consecuencias ambientales y sociales dependen del nivel de vulnerabilidad del territorio, definida como el conjunto de características del territorio que le permiten a éste resistir el efecto adverso de un derrame; tal definición se basa en la propuesta por Perles, Sortino y Cantarero (2017). Por otro lado, la probabilidad de falla depende de las características y propiedades del ducto, además de su interacción con el entorno. Con la valoración de la vulnerabilidad se aporta a la identificación de puntos de conflicto a lo largo del ducto (Perles et al., 2019), en los cuales hay una elevada probabilidad de falla y se presentan altas consecuencias ambientales y sociales. A continuación se describe la propuesta para cuantificar el nivel de consecuencia asociado a la tubería, sin incluir el componente asociado con el peligro de la función de riesgo.

La formulación de la metodología siguió la secuencia presentada en la Figura 1 y fue implementada para un poliducto ubicado sobre la cordillera oriental en Colombia. Se considera la integración de los componentes funcionales de un SIG y los pasos para la implementación del PAJ. Los com-

ponentes funcionales de un SIG son la captura y la preparación de datos, y el mantenimiento, el almacenamiento, la manipulación, el análisis y la presentación de resultados (Huisman y De By, 2009). El PAJ es una técnica para la toma de decisiones propuesta por Saaty (1990), y su aplicación involucra la definición de un problema, la definición de los factores a incluir en la estructura jerárquica, la construcción de las matrices de comparación por pares y el cálculo de los valores de ponderación para cada factor (Saaty, 2008). El componente central de la metodología es la manipulación y el análisis de los datos espaciales a través de la propuesta de modelos cartográficos que permitan dar solución a la problemática espacial planteada. Este esquema permite la integración de la metodología a los SIG ya implementados en las empresas encargadas de la operación de la tubería o los ductos.

El problema que requiere solución es la clasificación por consecuencia indirecta de cada uno de los puntos sobre el trazado de la tubería, considerando un enfoque integral del territorio. El nivel de afec-

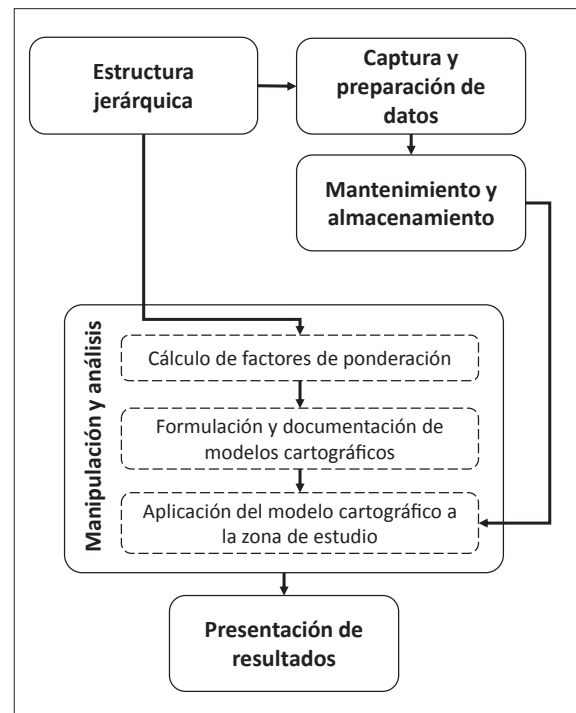


Figura 1. Metodología para identificar la consecuencia indirecta producida por derrames desde ductos. Fuente: elaboración propia.

tación para cada punto está expresado como una función de la vulnerabilidad en el territorio frente al peligro causado por un derrame, el número de elementos afectados y el CMA de transporte entre la tubería y cada uno de los elementos. Con el PAJ se definen cada uno de los elementos en el espacio expuestos al riesgo y se determina la vulnerabilidad relativa mediante el cálculo de ponderadores. El CMA se calcula desde el elemento de interés hasta cada uno de los puntos de la tubería; este cálculo conduce a identificar la proximidad entre ellos en función de un derrame superficial. Tal costo de transporte permite evaluar la variación de la vulnerabilidad en función de la distancia, donde es menor la vulnerabilidad a medida que incrementa el costo. Los modelos cartográficos diseñados incluyen procesos de análisis espacial para el cálculo de los mapas de costos, análisis de CMA, sobreposición algebraica y extracción de valores de nivel de afectación para los puntos del ducto.

Los resultados finales serán valores de consecuencia en un rango entre 0 y 1, donde 1 es la situación más crítica que corresponde a un punto en el que pueden afectarse simultáneamente todos los elementos considerados, localizados a lo largo y cerca del segmento analizado de la tubería. Esta situación de máxima criticidad es hipotética, y en el terreno es muy difícil que se presente, por lo que se espera que los valores calculados no alcancen el valor máximo. Por otro lado, el valor 0 corresponde a puntos desde los cuales un derrame no afectaría ninguno de los elementos del territorio incluidos en el análisis. Con este valor mínimo no se concluye una consecuencia nula, por ello se debe tener presente que existe afectación, pero es baja en comparación con los demás puntos sobre el ducto.

La estructura jerárquica: vulnerabilidad del territorio

El objetivo de la estructura jerárquica, esquematizada en la Figura 2, es conocer la vulnerabilidad del territorio ante el derrame de hidrocarburos transportados por ductos. Los elementos en el segundo nivel de la estructura están basados en la clasificación de áreas de alta consecuencia del CFR 195.450 e incluyen la agrupación de elementos del territorio, considerando aspectos como ocupación humana, medio ambiente natural e infraestructura de soporte para la economía regional. Las definiciones que se tienen en cuenta en este estudio para los criterios de tercer nivel son las siguientes y corresponden, en su mayoría, a las características ambientales y sociales del territorio colombiano. Para otros contextos se requiere realizar una selección y definición que se ajuste a las necesidades particulares del territorio en estudio.

Las áreas pobladas incluyen áreas de alta densidad poblacional, que son áreas urbanas con más de 50 000 habitantes y una densidad poblacional de 1 000 personas por milla cuadrada (Legal Information Institute, 2000a). Las áreas de media densidad poblacional son áreas urbanas o con concentraciones de edificaciones destinadas a la ocupación humana, con población menor a 50 000 habitantes o densidad poblacional menor a 1 000 personas por milla cuadrada. Los lugares con concentraciones de población son edificaciones o conjuntos de edificaciones en los que se pueden presentar concentraciones de personas de forma no permanente, por ejemplo, centros recreativos, centros deportivos, colegios e iglesias.

Los elementos de importancia ambiental incluyen aspectos relacionados con servicios ecosistémicos

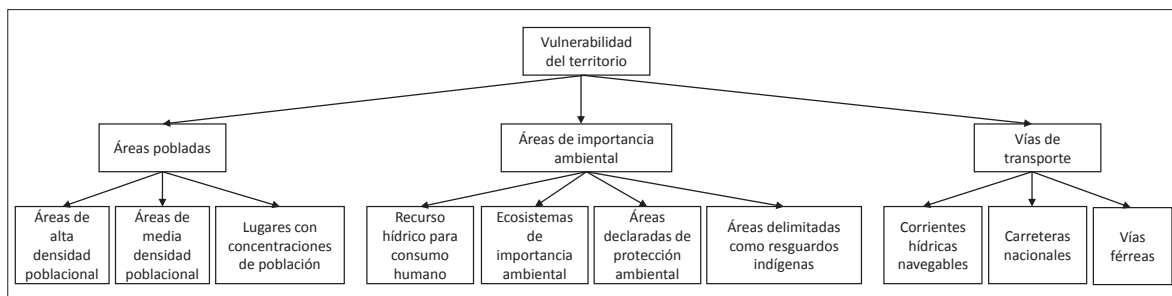


Figura 2. Estructura jerárquica para el análisis de la vulnerabilidad del territorio. Fuente: elaboración propia.

cos y de protección. El recurso hídrico para consumo humano incluye los puntos de extracción de agua, las zonas de protección de alrededor (que para este caso se representan como áreas con un radio de 150 m) y las zonas de recarga de acuíferos (49 CFR 195.6). Los ecosistemas de importancia ambiental son áreas en las que se ubican ecosistemas sensibles importantes para el país, entre los que están los complejos de páramos, bosque tropical seco y las áreas de importancia para la conservación de aves. Las áreas declaradas de protección son, por ejemplo, todas aquellas incluidas en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia y clasificadas como de protección nacional, regional, departamental, municipal, provincial y metropolitano (Ministerio del Medio Ambiente, 2001). Las áreas delimitadas como resguardos indígenas son en las que se resalta la importancia cultural y los valores espirituales en relación con el territorio de los pueblos indígenas que habitan en el territorio colombiano.

Los elementos naturales y artificiales asociados con el sistema de transporte corresponden con los modos de transporte terrestre, ferroviario y fluvial. Los cuerpos de agua navegables incluyen todos aquellos ríos y cuerpos de agua en los que hay alguna posibilidad de transporte de forma permanente o en temporadas del año (Arcadis y Jesyca, 2015). Las carreteras nacionales incluyen la red de carreteras que comunican a las capitales de los departamentos del país y por las cuales se transportan los mayores volúmenes de carga. Las vías férreas, aunque casi exclusivamente se utilizan para el transporte de carbón (Márquez, 2017), son aún de gran importancia económica para el país.

Cálculo de factores de ponderación

A partir de la estructura jerárquica presentada se plantearon las matrices de comparación por pares para cada nivel. La valoración de la vulnerabilidad relativa se realizó mediante la aplicación del método Delphi, con un panel de expertos conformado por profesionales e investigadores en áreas de gestión de integridad y gestión ambiental. Con el uso de la escala de nivel vulnerabilidad presentada en la Tabla 1, modificada en relación con la expuesta por Saaty (1990), se pidió a los expertos asignar valores comparando cada elemento en cada uno de los niveles de la estructura. La herramienta utilizada como cuestionario es la plantilla elaborada por Goepel (2013) (disponible en su sitio de internet <https://bpmmsg.com>), la cual permitió una fácil comprensión de la metodología a cada uno de los participantes que no tenía experiencia en el análisis jerárquico.

En la Tabla 2 se presentan las valoraciones consolidadas para el segundo nivel de la estructura jerárquica. Las conclusiones del panel de expertos

Tabla 1. Escala fundamental de vulnerabilidad.

Nivel de vulnerabilidad	Definición
1	Igual vulnerabilidad
3	Vulnerabilidad moderadamente superior
5	Vulnerabilidad superior
7	Vulnerabilidad fuertemente superior
9	Vulnerabilidad muy superior
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre las valoraciones adyacentes.

Fuente: elaboración propia con base en Saaty (1990).

Tabla 2. Matriz de comparación para el segundo nivel.

	Áreas pobladas	Áreas de importancia ambiental	Vías de transporte comercial	w_i
Áreas pobladas	1	3	7	0.682
Áreas de importancia ambiental	1/3	1	2	0.216
Vías de transporte comercial	1/7	1/2	1	0.102

Fuente: elaboración propia.

pusieron a la población en el primer lugar, por ser el elemento más frágil debido a la alta consecuencia directa en la salud y la vida de las personas. En segundo lugar quedaron las áreas de importancia ambiental porque incluyen elementos que podrían afectar indirectamente a la población, como los puntos de captación de agua para consumo humano y las áreas de poblamiento indígena. En tercer lugar se enlistan las vías de transporte que pueden tener consecuencias indirectas en el mediano y largo plazo sobre la población. En las Tablas 3,

4 y 5 se presentan las matrices de comparación para los criterios de tercer nivel. Las áreas de alta densidad poblacional son las cabeceras municipales y en ellas se localiza la sede administrativa del municipio y, por lo tanto, su afectación tendrá consecuencias sobre el resto del territorio con menor densidad poblacional. Las áreas de captación de agua para consumo humano representan un impacto indirecto sobre la salud y calidad de vida de la población, por lo que este elemento tiene la mayor vulnerabilidad en este nivel. En relación

Tabla 3. Matriz de comparación para las áreas con población.

	Áreas de alta densidad de población	Áreas de media densidad de población	Lugares con concentraciones de población	w_i
Áreas de alta densidad de población	1	2	5	0.595
Áreas de media densidad de población	1/2	1	4	0.276
Lugares con concentraciones de población	1/5	1/4	1	0.129

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Matriz de comparación para las áreas de importancia ambiental.

	Captación de agua para consumo humano	Ecosistemas de importancia ambiental	Áreas declaradas de protección	Resguardos indígenas	w_i
Captación de agua para consumo humano	1	2	7	5	0.533
Ecosistemas de importancia ambiental	1/2	1	4	2	0.254
Áreas declaradas de protección	1/7	1/4	1	1/5	0.054
Resguardos indígenas	1/5	1/2	5	1	0.159

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Matriz de comparación para las vías de transporte.

	Cuerpos de agua navegables	Carreteras nacionales	Vías férreas	w_i
Cuerpos de agua navegables	1	1/5	3	0.188
Carreteras nacionales	5	1	7	0.731
Vías férreas	1/3	1/7	1	0.081

Fuente: elaboración propia.

con la infraestructura de transporte, las carreteras se califican con un mayor nivel de vulnerabilidad, debido a que por éstas se transporta la mayor parte de carga comercial en Colombia.

El procedimiento de cálculo de los factores de ponderación para las categorías del segundo nivel inicia con la multiplicación de los tres juicios para cada fila de la matriz (Zhong-Wu et al., 2007) y después se obtiene su raíz cúbica (ecuación 1).

$$P_i = \sqrt[3]{\prod_{j=1}^3 b_{ij}}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

En esta ecuación b_{ij} es el valor de la matriz en la fila i y la columna j . Con los valores obtenidos para cada fila de la matriz se calcula el factor de ponderación con la ecuación 2. Los valores computados son 0.6816 para las áreas pobladas, 0.2158 para las áreas de importancia ambiental y 0.1025 para las vías de transporte comercial.

$$w_i = \frac{P_i}{\sum P_i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

Para evaluar la consistencia de los factores de ponderación calculados, se determina el radio de consistencia (RC), el cual requiere el cálculo del valor propio máximo (λ_{max}).

$$\lambda_{max} = \frac{\sum (BW)_i}{n w_i}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

Donde B corresponde a la matriz con la comparación por pares para las categorías del segundo nivel. Para este caso, $\lambda_{max} = 3.0026$. El radio de consistencia se calcula para $n = 3$ (Alonso y Lamata, 2006).

$$RC = \frac{\lambda_{max} - n}{2.7699n - 4.3513 - n} \quad (4)$$

El resultado es $RC = 0.002755$. Considerando que este valor es menor a 0.10, se tiene que la matriz tiene una adecuada consistencia (Apostolou y Hassell, 1993). Los radios de consistencia en el tercer nivel son 0.026, 0.059 y 0.068 para las áreas pobladas, las áreas de importancia ambiental y las

vías de transporte, respectivamente. Los factores de ponderación calculados para los criterios de cada nivel se presentan en las Tablas 2, 3, 4 y 5. Estos factores fueron utilizados en los modelos cartográficos para hacer la sumatoria ponderada de las capas raster en las que se representa la proximidad entre la tubería y los elementos analizados del territorio.

Modelos cartográficos

El objetivo de los dos modelos cartográficos propuestos es calcular un índice de consecuencia que permita determinar los potenciales impactos negativos desde puntos equidistantes sobre el trazado del ducto. En el primer modelo se estima el costo de transporte superficial del fluido sobre la superficie del terreno usando la ecuación de Manning para flujo en canales. En el segundo se determina el CMA entre cada elemento y la tubería, se sobreponen los costos mínimos acumulados para cada elemento y se asignan valores del índice de consecuencia a cada punto del trazado.

Modelo 1: costo de transporte superficial

Se elabora un modelo cartográfico para obtener una capa raster en la cual se representa, para cada pixel, el costo del transporte superficial del fluido (Figura 3), incluyendo el transporte sobre la superficie del suelo y el transporte por corrientes hídricas. Para el cálculo del costo del derrame directamente a la superficie del suelo, se utiliza la ecuación de Manning suponiendo secciones transversales rectangulares muy anchas (para terrenos planos y convexos) y secciones de forma parabólica (terreno con curvatura cóncava). La ecuación de Manning permite calcular la velocidad del fluido en función de la rugosidad del suelo (n), el radio hidráulico del canal (R) y la pendiente (s), y ha sido utilizada para describir derrames desde ductos por algunos autores (Farrar et al., 2005; Galagan, Fontenault y Turner, 2014). El modelo planteado tiene como datos de entrada las capas de cobertura del suelo (con los correspondientes valores de rugosidad), el modelo digital de elevación y las corrientes hídricas superficiales.

Del modelo digital de elevación se obtienen la curvatura y la pendiente. La curvatura (Cu) puede. En el modelo se supone que en las superficies

convexas el flujo corresponde a secciones transversales rectangulares muy anchas, por lo tanto, en el raster correspondiente los valores mayores a 0 son reemplazados por 0. La pendiente (s) se calculó haciendo uso del modelo digital de elevación; esta cuantificación se llevó a cabo aplicando el método de máximo promedio (Burrough y McDonell, 1998). Para el cálculo de la pendiente se eliminaron las pendientes iguales a 0 para poder hacer uso de la ecuación de Manning, por lo tanto, para estas pendientes se asigna el valor mínimo de 0.1%.

Para el caso de flujo sobre superficies cóncavas, en la Figura 3 se plantea la solución de un sistema de tres ecuaciones, en el cual las incógnitas son el costo (c), la profundidad de la lámina de líquido (h) y el ancho de la lámina de líquido (T). En la ecuación 5 el caudal es igual al área de la sección transversal parabólica multiplicada por la velocidad del fluido ($v = 1/c$). En la ecuación 6 la curvatura del terreno está en función de la profundidad del fluido y el ancho superficial, teniendo en cuenta que el resultado del cálculo de la curvatura en el software ArcGIS está multiplicado por 100 y es negativo para terrenos convexos. En la ecuación 7 el costo se calcula utilizando el inverso de la ecuación de Manning ($c = 1/v$). Para el caso de terrenos planos, únicamente se resuelve la ecuación 7 considerando que el ancho del derrame no se puede determinar y, por lo tanto, se asume

un valor de profundidad constante de lámina de líquido igual a 2 cm, que también corresponde al valor del radio hidráulico.

Para el sistema de ecuaciones mencionado, las demás variables conocidas son el caudal del derrame (Q) y el coeficiente de rugosidad (n). El caudal depende de las características hidráulicas del sistema de transporte y del tamaño del orificio en la tubería. El coeficiente de rugosidad se puede asignar con base en valores de referencia presentados por el US Army Corps of Engineers (1998) y por el United States Department Agriculture (1986), considerando los resultados obtenidos por García (2005) para flujos de poca profundidad y asumiendo que las características son homogéneas en cada tipo de cobertura del suelo para la zona de estudio.

Para diferenciar entre el transporte sobre la superficie del suelo, por corrientes hídricas y en zonas de encharcamiento, se propuso el uso de la constante k en el modelo. Para el transporte directamente sobre el suelo, la constante k será igual a 1. Para el caso del costo asociado a corrientes hídricas, k es mayor a 1, considerando que se tendrán mayores velocidades cuando el fluido llegue a estos cuerpos de agua. Este factor está asociado principalmente con un incremento en la velocidad y, en consecuencia, la reducción del costo de transporte. El factor fue estimado con base en los aforos de estaciones limnimétricas para la zona de estudio y calculando

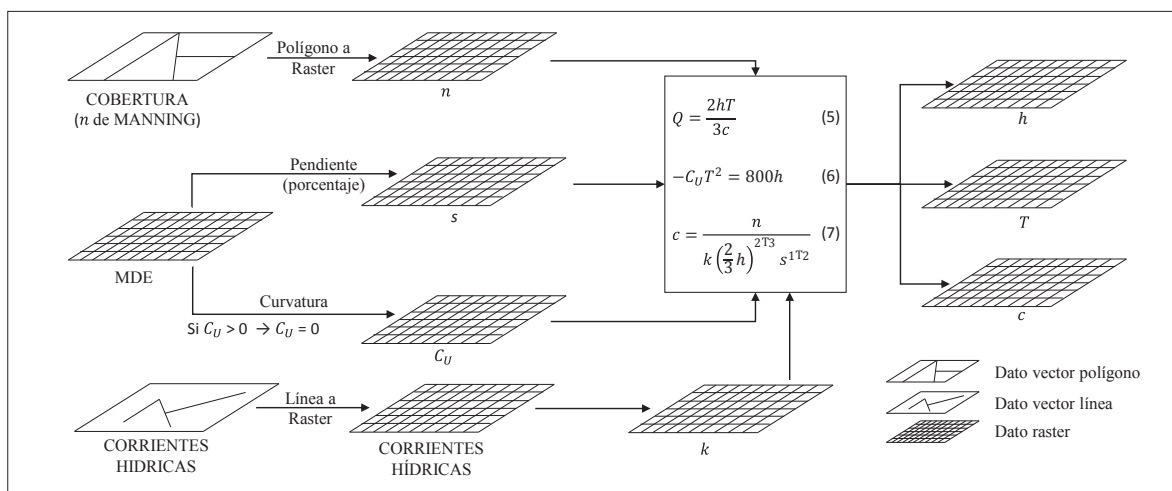


Figura 3. Modelo cartográfico para el cálculo del costo de la afectación indirecta. Fuente: elaboración propia.

el tiempo de la corriente hídrica con la ecuación propuesta por Jobson (1996). Por otro lado, los valores de k serán menores a 1 para los lugares de encharcamiento y su magnitud dependerá de la cantidad de fluido que se puede acumular. Los valores menores a 1 representan un incremento en el costo de transporte superficial, es decir, un mayor tiempo en alcanzar el elemento susceptible a ser afectado. El valor de k para áreas de encharcamiento se estimó con base en la experiencia del panel de expertos, con relación a los volúmenes de fluido y tiempos de encharcamiento en las depresiones del terreno.

Modelo 2: costo mínimo acumulado e índice de consecuencia

En la Figura 4 se muestra el modelo cartográfico para el cálculo del CMA, su transformación, la posterior sumatoria ponderada para calcular el índice de afectación y la asignación del índice a puntos sobre la tubería. El costo acumulado para recorrer la superficie del suelo se calcula como el producto del costo almacenado en cada pixel y la distancia recorrida entre los píxeles que conectan el origen y el destino (De Smith, Goodchild y Longley, 2018; Etherington, 2016). El costo mínimo acumulado representa el menor tiempo necesario para que el derrame recorra la distancia entre la tubería y cualquiera de los elementos analizados del territorio. Los datos requeridos para el cálculo en el software ArcGIS son el raster de costos, el modelo digital de elevación y los factores de costo verticales y horizontales (Environmental Systems Research Institute Inc., 2012). El factor de costo vertical utilizado es de tipo binario, con un factor de multiplicación igual a 1 entre los ángulos de 0 y -90 grados, e infinito para los valores menores a 0 y mayores a -90 . Este factor permite controlar que solamente se tengan en cuenta píxeles de igual o menor elevación para el transporte del fluido desde el origen. Otro parámetro utilizado es la dirección del desplazamiento, la cual, en este caso, es desde el elemento afectado hacia el origen del derrame. Con esto se estima el tiempo de transporte superficial originado desde cualquier pixel del modelo digital de elevación que cubre el área de estudio.

Los costos mínimos acumulados para cada tipo de elemento del territorio se transformaron en un rango de 0 a 1 utilizando la función sigmoideal de la ecuación 10, en donde z_i es el costo transformado para el criterio i , m_i es el costo mínimo acumulado y b corresponde al costo para el cual el valor transformado (z_i) es igual a 0.5. Los valores cercanos a 0 representan la menor afectación sobre el elemento de interés y los valores cercanos a 1, la máxima afectación. Las capas de costo mínimo transformadas se sobreponen algebraicamente utilizando cada uno de los criterios en el tercer nivel de la estructura jerárquica (ecuación 11). En el último paso se asignan los valores a cada punto del trazado de la tubería. Para esto, el trazado de la tubería fue transformado de geometría lineal a punto. Los puntos fueron equidistantes sobre el trazado y su separación depende del tamaño de pixel de los datos utilizados, por lo que se sugiere que la distancia entre puntos sea igual, como mínimo la resolución espacial del raster, para evitar que se tengan varios puntos sobre un mismo pixel.

RESULTADOS

Colombia cuenta con una amplia red de oleoductos y poliductos que se distribuyen principalmente en la zona centro y norte del país. Los ductos atraviesan zonas con diversidad topográfica, social y ambiental. Debido a estas condiciones se presenta una variedad de amenazas para la integridad del ducto y, en consecuencia, posibilidades de ocurrencia de derrames que pueden afectar áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad. La metodología descrita se aplicó a un segmento del trazado de una tubería localizada en una zona montañosa central del país. El tramo analizado tiene una longitud de 269.5 km y los modelos se implementaron para un área de influencia de 20 km alrededor de este trazado. El área de estudio presenta pendientes entre 0 y 120%, con un rango altitudinal de 120 a 3 600 metros sobre el nivel del mar.

Datos espaciales

Para la implementación de la metodología desarrollada se requieren grandes volúmenes de datos

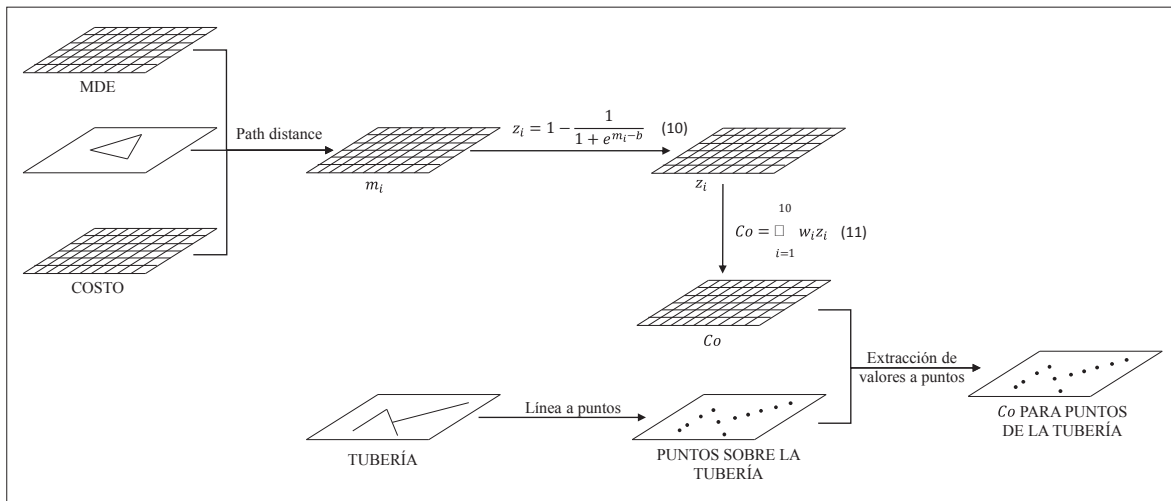


Figura 4. Modelo cartográfico para el cálculo del índice de afectación. Fuente: elaboración propia.

espaciales de la zona de influencia de una tubería. La mayor parte de los datos utilizados en este caso son generados y distribuidos por entidades públicas y privadas que tienen como uno de sus objetivos la producción de cartografía básica y temática. En Colombia el acceso a datos espaciales producidos por entidades del gobierno está garantizados para todos los ciudadanos en la Ley 1712 de 2014. Complementariamente hay portales en internet desde los cuales se pueden adquirir datos producidos a partir de imágenes de sensores remotos activos y pasivos. Estas condiciones aseguran la disponibilidad de datos para la aplicación de la metodología en casi todo el territorio colombiano.

Los datos espaciales fueron consultados y descargados de los portales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC). El IGAC produce cartografía base de Colombia y para este caso se utilizaron datos a escala 1:25 000, que es la mayor escala con el cubrimiento para la zona de estudio. Los datos extraídos de la cartografía base fueron las áreas urbanizadas, la localización de construcciones representadas como punto, las corrientes hídricas, las carreteras y las vías férreas. Del SIAC se obtuvieron los datos de localización de captaciones de agua para consumo humano, la cobertura del suelo, el trazado de poliductos, las áreas de importancia para la conservación de aves,

los bosques tropicales secos, los complejos de páramos, los humedales Ramsar, las áreas declaradas de protección ambiental y los resguardos indígenas. Todos los datos se encontraban en los sistemas de coordenadas oficiales para Colombia (EPSG 4686 o 3116).

Posterior a la adquisición fue necesario procesar los datos espaciales para crear una capa que correspondiera a cada uno de los criterios del tercer nivel de la estructura jerárquica. La capa de zonas urbanizadas fue separada en áreas de alta y media densidad con base en los datos de proyección de población del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). De la capa de construcciones con representación punto se extrajeron los elementos correspondientes a instituciones educativas, hoteles, cementerios, iglesias y centros de salud. Los ecosistemas de importancia ambiental corresponden a la superposición de las capas de las áreas de importancia para la conservación de aves, los bosques tropicales secos, los complejos de páramos y los humedales Ramsar. Las áreas protegidas se conforman con la superposición de los polígonos de las diferentes categorías de áreas protegidas declaradas según el Decreto 2372 de 2010. Los cuerpos de agua navegables se seleccionaron de la capa de corrientes hídricas teniendo en cuenta la caracterización realizada por la Superintendencia de Puertos y Transporte (Paredes, Garcés y Villa,

2010), entidad adscrita al Ministerio de Transporte. La clasificación de las carreteras en Colombia está establecida por el Instituto Nacional de Vías (Invias), y para este caso se seleccionó la red primaria de la capa de carreteras obtenida de la cartografía base. Para los demás criterios, las capas descargadas se ingresan directamente a los modelos.

Además de los datos descritos, se trabajó con modelos digitales de elevación para simular el derrame superficial del líquido desde la tubería. Se utilizaron modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes de la misión ALOS PALSAR, con tamaño de píxel 12.5 m, y sistemas de coordenadas con código EPSG 32618. Estos modelos fueron obtenidos del sitio web de Alaska Satellite Facility (ASF DAAC, 2015) y fueron transformados a un sistema de coordenadas compatible con los datos descritos anteriormente. Fue necesario evaluar la calidad del modelo para detectar posibles falencias que pudieran afectar los resultados. Los errores identificados y corregidos están relacionados con la presencia de elevaciones fuera del rango altitudinal para la zona de estudio, la inconsistencia de las elevaciones sobre las corrientes hídricas y la presencia de depresiones que no corresponden con una representación de la realidad.

Cálculo de costo mínimo acumulado para un elemento

Con el fin de mostrar los resultados intermedios de la metodología se implementó el modelo cartográfico de la Figura 3 y el cálculo del CMA para un punto de extracción de agua para consumo humano ubicado en una corriente hídrica. En las Figuras 5 y 6 se muestra la bocatoma y los costos mínimos acumulados estimados desde este punto y dentro de la cuenca hídrica correspondiente. El costo mínimo acumulado se expresa en horas utilizando caudales de derrame de 0.01 m³/s (Figura 6a) y 0.1 m³/s (Figura 6b), así como normalizaciones con la función sigmoideal con valores para b de 5 y 10 horas para los dos caudales. El resultado obtenido es coherente con el relieve del terreno y coincide adecuadamente con la red de drenaje, por lo tanto, los menores tiempos de transporte entre la tubería y la bocatoma están asociados con el transporte sobre la corriente hídrica. También se aprecia el efecto

causado por la divisoria de aguas de las cuencas hidrográficas, que permite separar claramente los tramos que podrían afectar el área de análisis. Es importante aclarar que el tiempo estimado es un indicativo de la proximidad y no representa un valor exacto del tiempo transcurrido entre el derrame y el momento en que alcanza la bocatoma.

Para el tramo analizado, la consecuencia sobre el punto de interés es máxima en el lugar que atraviesa la corriente hídrica principal de la subcuenca en la distancia 141.6 km. Como es de esperarse, un derrame en este punto iría directamente a la corriente hídrica y su transporte sería directamente sobre este cuerpo de agua. Los valores de consecuencia disminuyen en las dos direcciones de la tubería desde este punto de máxima afectación. Esta disminución implica un costo acumulado mayor porque el derrame, inicialmente, es de forma directa sobre el suelo hasta alcanzar una corriente hídrica. El caso en que el valor de consecuencia es 0 (antes del kilómetro 46 y después del 15.6) ocurre cuando la tubería hace parte de una subcuenca diferente de la que contiene la bocatoma. Entre los kilómetros 117 y 127.5 se tienen valores altos de costo acumulado causados porque la tubería está ubicada en una microcuenca diferente al tramo adyacente. Esta situación implica que un posible derrame requeriría un tiempo considerablemente mayor para alcanzar la bocatoma; con valores de afectación menores a 0.1 se considera que la posibilidad de afectación es casi nula y un derrame desde este tramo no representa un peligro para el punto de análisis.

También se puede ver el efecto del uso de caudales de derrame de 0.01 y 0.1 m³/s en los costos acumulados desde el trazado de la tubería. Un mayor caudal de derrame conlleva a un menor tiempo de transporte y, en consecuencia, una mayor posibilidad de afectar la bocatoma. La transformación aplicada a los costos acumulados utilizando diferentes valores para el parámetro a permite simular el tiempo de respuesta frente a una contingencia. Asumiendo que este parámetro representa el tiempo en que se controla el derrame, se puede ver que una intervención en un tiempo de 5 horas produce valores de consecuencia más bajos.

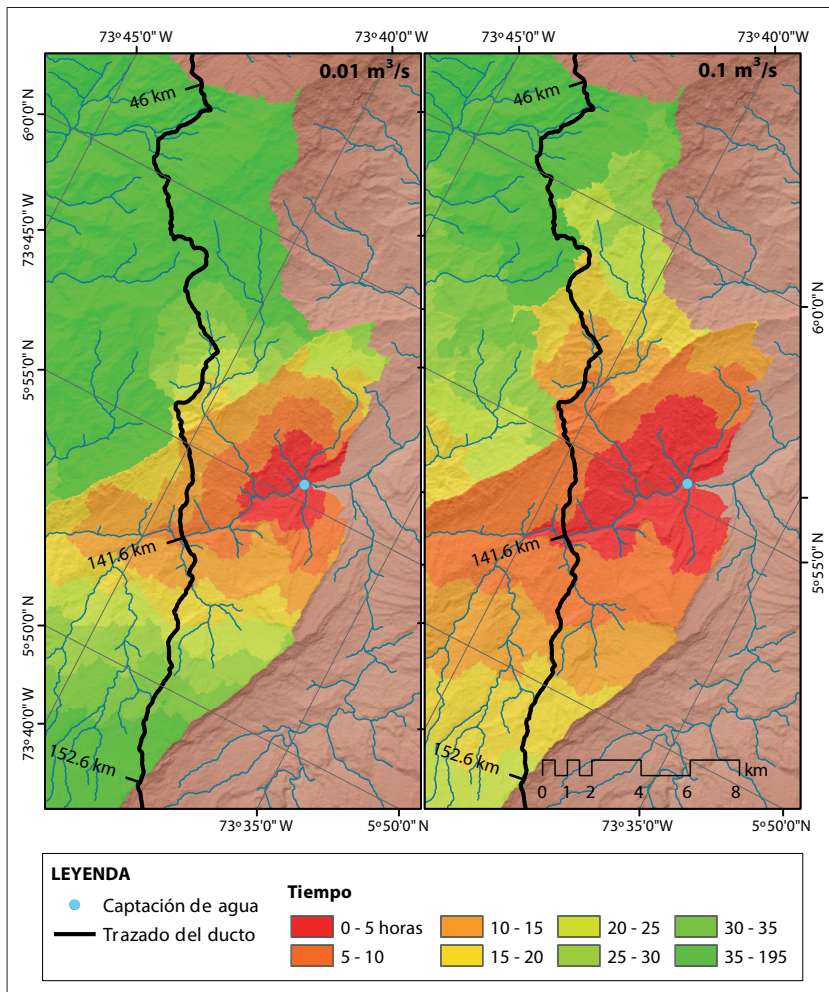


Figura 5. Proximidad de un tramo de tubería a una bocanoma. Fuente: elaboración propia.

Cálculo del índice de consecuencia para la tubería

Como resultado de la aplicación de los modelos cartográficos se asignan valores de consecuencia a cada uno de los puntos del trazado de la tubería con equidistancia de 10 m. Estos valores permiten identificar los tramos con mayor afectación a varios elementos utilizando un caudal de derrame de 0.1 m³/s y valores de b para la función sigmoïdal de 5 y 10 horas para la transformación. En la Figura 7 se puede ver cómo los primeros 10 km del trazado tienen valores medios de afectación debido a su proximidad con una corriente hídrica caudalosa que transportaría el derrame hasta algunos elementos ubicados aguas abajo. En los siguientes kilómetros, hasta la abscisa 62, los va-

lores son bajos debido a que el terreno es relativamente plano, esto está asociado a mayores tiempos de recorrido del derrame y mayores encharcamientos. Desde la abscisa 60 la tubería empieza su ascenso a una zona montañosa en la cual se incrementan los valores de la pendiente y, en consecuencia, el costo mínimo acumulado será menor al tener mayores velocidades para el derrame.

En la Figura 8 algunos de los valores máximos de afectación corresponden a los tramos alrededor de los kilómetros 141, 189, 221 y 245. En los detalles que se presentan en la Figura para cada uno de estos puntos se muestran flechas en color rojo para indicar la dirección aproximada del derrame desde la tubería. En los cuatro casos los valores altos están relacionados con la afectación

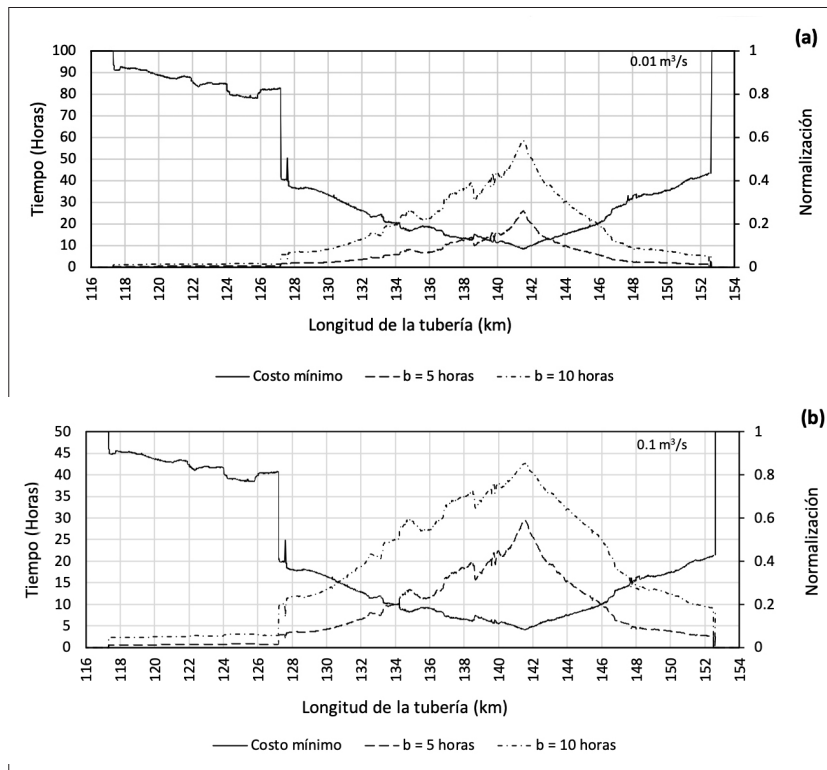


Figura 6. Consecuencia para el tramo presentado en la Figura 5. Fuente: elaboración propia.

a áreas urbanizadas de alta y media densidad poblacional. La abscisa 141 está localizada sobre la corriente hídrica principal de una subcuenca y transportaría el derrame con relativa rapidez hasta una bocatoma (caso analizado en el apartado anterior) y una carretera nacional, además de tener una posible afectación sobre un punto con concentración de población. En la abscisa 189 es posible la afectación de puntos con concentración de población. En el kilómetro 221 se afectarían una

carretera nacional y la vía férrea, mientras que en el kilómetro 245 el derrame podría alcanzar puntos con concentración de población y una carretera nacional.

El uso de dos valores diferentes de transformación del costo acumulado permite evidenciar situaciones particulares para la tubería; su localización se puede apreciar en la Figura 7. En algunos tramos, por ejemplo, en el kilómetro 221, no se incrementa el valor de la afectación para los dos casos porque

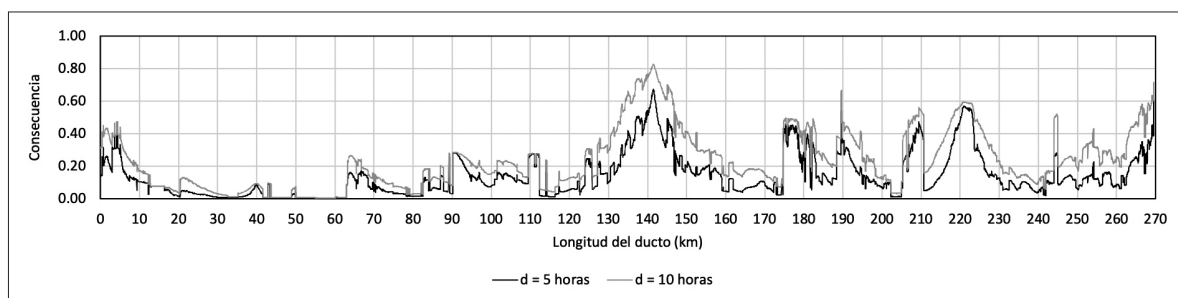


Figura 7. Resultado del cálculo de la consecuencia para el ducto estudiado. Fuente: elaboración propia.

los elementos afectados se encuentran cerca del trazado de la tubería en ese punto. En la abscisa 189 parte de la tubería está ubicada en una divisoria de aguas, por lo tanto, este tramo podría afectar los elementos en las dos microcuencas. Como se puede apreciar, el derrame en dirección noroeste alcanzaría un área de alta densidad poblacional y en la dirección sureste llegaría a un área de media densidad poblacional. En el kilómetro 245, el tramo que se encuentra en una microcuenca diferente a la de los tramos adyacentes, el incremento notable es causado por la presencia de elementos consecutivos sobre la posible ruta del derrame, lo cual hace que se incremente el valor de afectación al aumentar el valor de b , es decir, el tiempo de respuesta. Estos ejemplos permiten identificar los tramos críticos con valores altos de afectación o aquellos en los

elementos a ser afectados y que están relativamente cerca de la tubería.

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En este artículo se presentó una metodología, basada en el uso de análisis multicriterio y modelos cartográficos, para la valoración de niveles de afectación ambientales y sociales de puntos sobre el trazado de una tubería de transporte de líquidos peligrosos. El nivel de afectación considera la vulnerabilidad relativa entre los elementos del territorio y su proximidad con la fuente del derrame. El análisis multicriterio abordó la implementación del PAJ para identificar la vulnerabilidad relativa de los elementos del territorio. La proximidad consideró

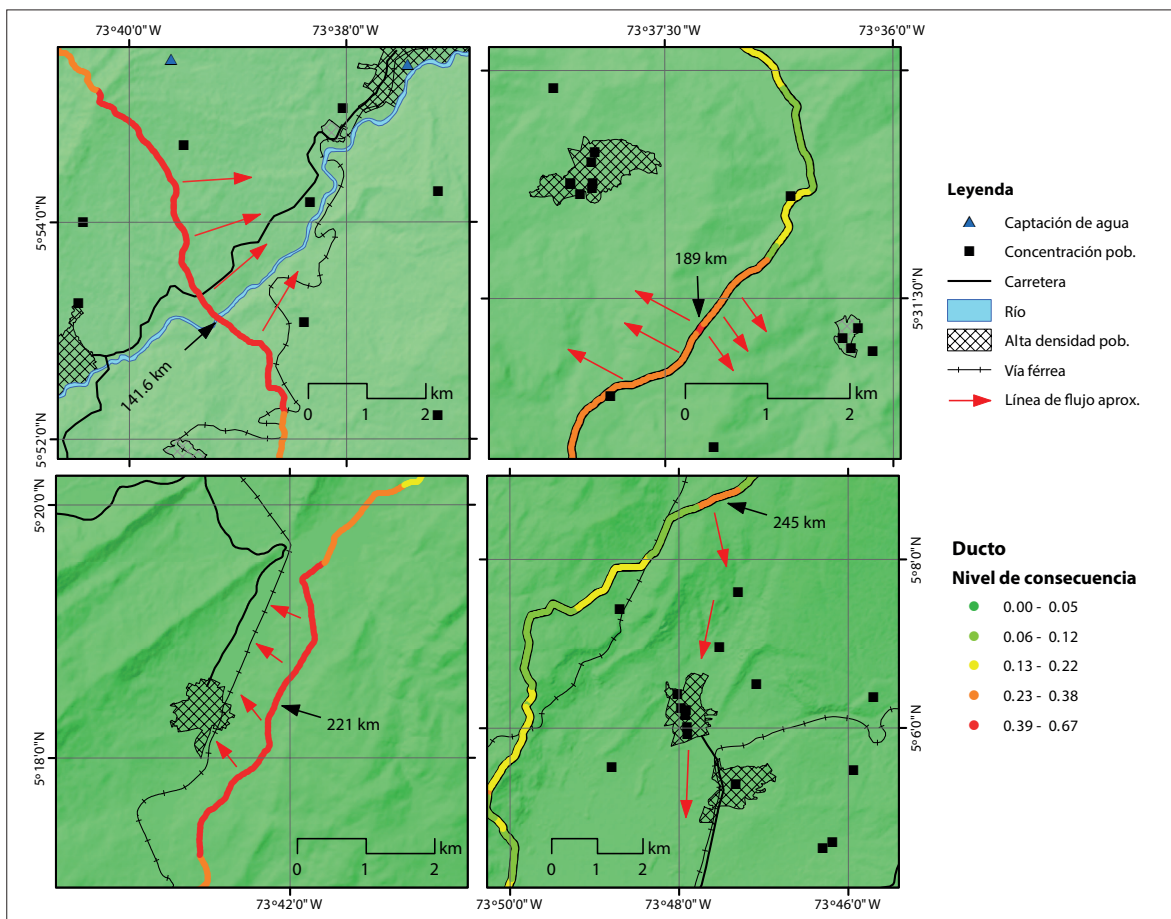


Figura 8. Nivel de afectación calculado para la tubería. Fuente: elaboración propia.

las características del relieve para identificar la dirección de posibles derrames desde cualquier punto del área de estudio seleccionada. Los resultados finales se expresan con un nivel de consecuencia en puntos equidistantes sobre la tubería.

La metodología propuesta presenta ventajas significativas frente a los métodos tradicionales, puesto que condujo a la identificación de tramos con afectación a áreas de alta consecuencia. Los resultados obtenidos de la implementación de los modelos cartográficos facilitan la clasificación de puntos o tramos considerando un análisis que integra aspectos ambientales y sociales del territorio. Además, permite la valoración de puntos equidistantes sobre la tubería, evitando la selección subjetiva de puntos o tramos para la asignación del nivel de afectación. Por otro lado, los resultados del índice expresados en un rango de 0 a 1 facilitan su integración a matrices de evaluación de riesgo que ya se tengan implementadas en los programas de gestión de integridad de ductos. Finalmente, la metodología es flexible y se puede replicar en otras áreas geográficas con características ambientales y sociales diferentes.

Para el caso de estudio presentado se identificaron claramente los tramos y puntos con mayor posibilidad de afectación a los elementos del territorio considerados. En el análisis particular para una bocanoma se encontró que aproximadamente a 25 km de tubería podrían afectarla, y dentro de este tramo la abscisa 141 del trazado tiene el valor más alto de afectación; este punto corresponde al cruce de la tubería y una corriente hídrica. En el análisis general para la tubería se confirma el mismo tramo como el de mayor importancia por su alto nivel de afectación. Además, se identificaron otros tramos entre las abscisas 175 y 270 con niveles altos y medios de afectación. Mientras que los valores de baja afectación se ubicaron en la parte inicial del trazado después de la abscisa 20, la parte inicial registró valores medios debido a su proximidad con una corriente hídrica caudalosa.

La metodología presentada es un aporte para perfeccionar los procesos de análisis espacial y modelamiento cartográfico aplicados a la gestión de la integridad de ductos, y así optimizar la toma de decisiones para prevenir consecuencias adversas

generadas por derrames. La propuesta es susceptible de mejoras, principalmente en los aspectos relacionados con el cálculo del tiempo de transporte, para lo cual se podría hacer uso de modelos físicos para describir el transporte superficial e integrarlos en reemplazo de la ecuación de Manning. No se consideraron los efectos relacionados con pérdidas del líquido, como la evaporación y la infiltración en el suelo, suponiendo la situación más crítica. Estos aspectos, como otros más, se podrían incluir, pero requieren estudios específicos, por ejemplo, para determinar las tasas de pérdida del fluido causadas por estos fenómenos.

REFERENCIAS

- Aguilar J. y Rapik, M. (2014). Flammable Liquid Fire Consequence Modeling. En *Proceedings of Joint Rail Conference* (pp. 1-6). Colorado Springs: ASME. DOI: 10.1115/JRC2014-3851
- Alonso, J. A. y Lamata, M. T. (2006). Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge Based Systems*, 14(4), 445-459. DOI: 10.1142/S0218488506004114
- American Petroleum Institute (2013). *Managing Systems Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*. API Recommended Practice 1160 (2a. ed.). Washington, D. C.: American Petroleum Institute.
- Apostolou, B. y Hassell, J. M. (1993). An Empirical Examination of the Sensitivity of the Analytic Hierarchy Process to Departures from Recommended Consistency Ratios. *Mathematical and Computer Modelling*, 17(4), 163-170. DOI: 10.1016/0895-7177(93)90184-Z
- Arcadis Nederland, B. V. y Jesyca, S. A. S. (2015). *Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015*. Bogotá. Recuperado de <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=13276>
- Dataset ASF DAAC (2015). ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_hihg_res; Incluye material © JAXA/METI 2007. Recuperado el 13 de octubre de 2017 de <https://asf.alaska.edu/>. DOI: 10.5067/Z97HFCNKR6VA.
- Burrough, P. A. y McDonell, R. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. Nueva York: Oxford University Press.
- Daza, O., Vera, E., Mejía, O., Barón, A., Dueñas, M. y Bahamon, C. (2013). Modelo dinámico para determinación de zonas de alta consecuencia (HCA) en

- ductos con valoración del Índice de Consecuencia. En *Memorias de la 8 Jornada Andina de Ductos* (p. 8). Bogotá: Asociación Colombiana de Ingenieros-Capítulo Cundinamarca.
- Daza-Leguizamón, O. J., Riaño-Cano, G. A., Vera-López, E., López-Díaz, A. y Pineda-Triana, Y. (2018). *Análisis espacial y modelos cartográficos: metodología implementada en ArcGIS para la planificación minera*. Tunja: UPTC.
- Daza-Leguizamón, O. J., Vera-López, E. y Riaño-Cano, G. A. (2016). Efecto de la resolución espacial de modelos digitales de elevación en la simulación de derrames de hidrocarburos. *Revista Científica*, 26, 149-172. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/revcie/article/view/11620/12372>. DOI: 10.14483/23448350.11620
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F. y Longley, P. A. (2018). *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools* (6a. ed.). Winchelsea: Drumlin Security Ltd.
- DeWolf, G. B. (2003). Process Safety Management in the Pipeline Industry: Parallels and Differences Between the Pipeline Integrity Management (IMP) Rule of the Office of Pipeline Safety and the PSM/RMP Approach for Process Facilities. *Journal of Hazardous Materials*, 104, 169-192. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2003.08.008
- Environmental Systems Research Institute Inc. (2012). ArcGIS for Desktop [Software].
- Etherington, T. R. (2016). Least-Cost Modelling and Landscape Ecology: Concepts, Applications and Opportunities. *Current Landscape Ecology Reports*, 1(1), 40-53. DOI: 10.1007/s40823-016-0006-9
- Farrar, W., Galagan, C., Isaji, T. y Knee, K. (2005). GIS Technology Applied to Modeling Oil Spills on Land. En *Proceedings of 25th Annual Esri International User Conference* (p. 7). California: ESRI. Recuperado de <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap2129.pdf>
- Florinsky, I. V. (2016). *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology* (2a. ed.). Londres: Elsevier Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-804632-6.00001-8
- Galagan, C., Fontenault, J. y Turner, J. (2014). *Simulations of Hypothetical Oil Spill from the Froth Finn Creek Segment of the Transmountain Pipeline*. Recuperado de <https://apps.neb-one.gc.ca/REGDOCS/File/Download/2578179>
- García Díaz, R. (2005). Analysis of Manning Coefficient for Small-Depth Flows on Vegetated Beds. *Hydrological Processes*, 19, 3221-3233. DOI: 10.1002/hyp.5820
- Gin, G. E. y Davis, J. (2012). Spill Impact Assessment: Crude Oil Pipeline ERCB License Number 3353-1. En *Proceedings of 2012 9th International Pipeline Conference. Upstream Pipelines; Project Management; Design and Construction; Environment; Facilities Integrity Management; Operations and Maintenance; Pipeline Automation and Measurement* (vol. 1) (pp. 283-294). ASME. DOI: 10.1115/IPC2012-90252
- Goepel, K. D. (2013). Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for MultiCriteria Decision Making in Corporate Enterprises. A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. En *Proceedings of International Symposium on the Analytic Hierarchy Process 2013* (pp. 1-10). DOI: 10.13033/isahp.y2013.047
- Guzman Urbina, A. y Aoyama, A. (2017). Measuring the Benefit of Investing in Pipeline Safety Using Fuzzy Risk Assessment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 45, 116-132. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.11.018
- Legal Information Institute (2000a). High Consequence Areas. Definitions. 49 C.F.R. § 195.450. Recuperado de <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/49/195.450>
- Legal Information Institute (2000b). Unusually Sensitive Areas. 49 C.F.R. § 195.6. Recuperado de <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/49/195.6>
- Huisman, O., Almandoz, R., Schuster, T., Andrade, A. y Martinez, L. (2014). Leveraging HCA Results in an Advanced Pipeline Risk Assessment Model. En *Proceedings of the 10th International Pipeline Conference. Design and Construction; Environment; Pipeline Automation and Measurement* (vol. 1) (p. 8). Calgary. DOI: 10.1115/IPC2014-33152
- Huisman, O. y De By, R. A. (2009). *Principles of Geographic Information Systems: An Introductory Textbook*. Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Icontec (2012). *Gestión de integridad de sistemas para transporte de líquidos peligrosos* (NTC 5901) (1a. ed.). Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- Jia, S., Feng, Q., Zhou, L. y Yu, H. (2009). Software Uses GIS Data to Identify High Consequence Areas Along Pipelines. *Pipeline and Gas Journal*, 236(8). Recuperado de <https://pgjonline.com/magazine/2009/august-2009-vol-236-no-8/features/software-uses-gis-data-to-identify-high-consequence-areas-along-pipelines>
- Jobson, H. E. (1996). *Prediction of Traveltime and Longitudinal Dispersion in Rivers and Streams*. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/wri/1996/4013/documents/dispersion.pdf>
- Márquez, L. (2017). El ferrocarril colombiano: 4 temas recurrentes en la literatura. *Estudios Gerenciales*, 33(143), 187-194. DOI: 10.1016/j.estger.2017.04.003

- Ministerio del Medio Ambiente. (2001). *Parques Nacionales de Colombia: Política de participación social en la conservación*. Bogotá: Ministerios del Medio Ambiente.
- Paige, D., Park, N. y Posner, J. (2003). Modeling Pipeline Spill Determines Impact on HCAs. *Oil and Gas Journal*, 101(12), 72-77. Recuperado de <https://www.ogj.com/articles/print/volume-101/issue-12/transportation/modeling-pipeline-spill-determines-impact-on-hcas.html>
- Paredes Morato, Y., Garcés, P. A. y Villa, L. M. (2010). *Informe de seguimiento de caracterización de 16 ríos navegables y la actividad portuaria*. Bogotá, D. C.
- Parrot, J. F. (2009). DEM Simulation of Petroleum Flux Extension and Diffusion Due to Pipeline Ruptures in Mexico. En *Proceedings of 18th World IMACS / MODSIM Congress* (pp. 2701-2705). Cairns. Recuperado de https://www.mssanz.org.au/modsim09/G3/parrot_G3.pdf
- Perles Roselló, M. J., Pardo García, S. M., Mérida-Rodríguez, M. y Olcina-Cantos, J. (2019). Metodología para la predicción de puntos de riesgos múltiples en infraestructuras viarias tras episodios torrenciales (road-risk). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 80, 1-40. DOI: 10.21138/bage.2615
- Perles Roselló, M. J., Sortino Barrionuovo, J. F. y Cantarero Prados, F. (2017). Cartografía de la vulnerabilidad del territorio frente al riesgo de inundación. Propuesta adaptada a la directiva europea de inundaciones y normativas derivadas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 75, 341-372. DOI: 10.21138/bage.2504
- Saaty, T. L. (1990). How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I
- Saaty, T. L. (2008). Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. Recuperado de <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Shahriar, A., Sadiq, R. y Tesfamariam, S. (2012). Risk Analysis for Oil and Gas Pipelines: A Sustainability Assessment Approach Using Fuzzy Based Bow-Tie Analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 505-523. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.12.007
- Singh, R. (2014). *Pipeline Integrity Handbook*. Waltham: Gulf Professional Publishing.
- United States of Department Agriculture (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. TR-55. Washington, D. C. Recuperado de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- US Army Corps of Engineers. (1998). *HEC-1 Flood Hydrograph Package: User's Manual*. Davis, CA. Recuperado de [https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-1_UsersManual_\(CPD-1a\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/publications/ComputerProgramDocumentation/HEC-1_UsersManual_(CPD-1a).pdf)
- Xie, M. y Tian, Z. (2018). A Review on Pipeline Integrity Management Utilizing In-Line Inspection Data. *Engineering Failure Analysis Journal*, 92, 222-239. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.05.010
- Zabala, L. E., Sarmiento, E. E., Cuaical, Cruz, K., de la, Mendez, C. A. y Fajardo, H. C. (2013). Determining High Consequence Areas (HCA) and Consequence Modeling of Onshore Hydrocarbon Pipeline Using a Geographic Information System (GIS). En *Proceedings of Rio Pipeline 2013 Conference y Exposition* (p. 9). Río de Janeiro.
- Zhong-Wu, L., Guang-Ming, Z., Hua, Z., Bin, Y. y Sheng, J. (2007). The Integrated Eco-Environment Assessment of the Red Soil Hilly Region Based on GIS. A Case Study in Changsha City, China. *Ecological Modelling*, 202(3-4), 540-546. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.11.014