

Áreas de alta consecuencia en la gestión de integridad de oleoductos en Colombia

High Consequence Areas in the Integrity Management System of Colombian Oil Pipelines

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2010
 Fecha de aprobación: 12 de noviembre de 2010

Omar Javier Daza Leguizamón*
 Rigaud Sanabria Marín**
 Enrique Vera López***

Resumen

En Colombia, los sistemas de gestión de integridad de las tuberías que transportan líquidos peligrosos están en proceso de estandarización por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Dentro del proyecto de esta nueva norma técnica se definen las áreas de alta consecuencia, su identificación e importancia dentro del proceso de gestión de tuberías; pero en nuestro entorno la información espacial y no espacial para la correcta identificación de estas áreas es de difícil adquisición o no está disponible; por ello, con este artículo se busca dar una primera mirada a este tipo de zonas a nivel nacional y presentar sus posibles fuentes de información, bajo estándares y normas internacionales. También se presentan metodologías basadas en sistemas de información geográfica, implementadas a escala internacional, para su identificación.

Palabras clave: Análisis espacial, Sistemas de Información Geográfica, Transporte de líquidos peligrosos.

Abstract

In Colombia the integrity management system of oil pipelines that transport hazardous liquids are in the process of standardization by the Colombian Institute for Certification and Technical Regulation. Within the project for this new technical regulation, the areas of high consequence, their identification and importance in the process of oil pipeline management are defined. But in our country, neither the spatial nor the non spatial information for these areas' correct identification is easily obtained or available. Therefore, this article intends to give a first look at these types of zones on a national level and their possible sources of information, according the international regulation and standards. We also present the methodologies based on the geographical information systems applied at an international level, for their identification.

Key words: Spatial Analysis, Geographic Information Systems, Hazardous Liquids Transportation.

* Estudiante Maestría en Ingeniería con énfasis en infraestructura vial. Docente ocasional Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Uptc). Investigador Grupo de Investigación en Geomática y Ambiente (GIGA) Uptc. omar.daza@uptc.edu.co

** Doctor en Geografía Física. Docente Programa de Estudios de Posgrado en Geografía Uptc. Investigador Grupo GIGA. sanabriarigaud@yahoo.com

*** Doctor en Física de Materiales. Docente Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Uptc. Investigador Grupo de Investigación en Integridad y Evaluación de Materiales Uptc.

I. INTRODUCCIÓN

La infraestructura de transporte de petróleo y sus derivados está conformada en Colombia por más de ocho mil kilómetros de tuberías. Esta infraestructura tiene una importante interacción con los diferentes elementos del medioambiente cercanos a su localización, por lo que dentro de los sistemas de gestión de integridad se deben considerar los principales aspectos del medio que pueden afectar tanto el adecuado desempeño de las tuberías como los efectos que sobre estos elementos puede tener un derrame de cualquier líquido transportado. Entre los principales impactos ambientales causados por derrames están la contaminación de corrientes hídricas [1], [2], la contaminación del suelo, la mortalidad de especies animales y vegetales [3] y la mortalidad y morbilidad de seres humanos. En cuanto al suelo, el líquido derramado puede adherirse o fluir, dependiendo de sus características, haciendo difícil la recuperación ambiental. La mortalidad de fauna y flora está asociada con efectos como asfixia, envenenamiento, contaminación de fuentes de alimentación, entre otros [4]. La contaminación del recurso hídrico puede afectar directamente los ecosistemas asociados, e indirectamente a quienes se abastecen del recurso, como es el caso del consumo humano. Algunas de estas zonas, dependiendo de su vulnerabilidad ante un derrame de petróleo, se podrían clasificar dentro de la gestión de integridad de oleoductos como áreas de alta consecuencia (AAC), y deben ser identificadas dentro del proceso de implementación del sistema de manejo de ductos.

Los operadores de la infraestructura de transporte de petróleo han incluido, dentro de sus sistemas de gestión de ductos, métodos para priorizar sus tareas de mantenimiento, que involucran los posibles impactos negativos a las áreas de alta consecuencia [5]; para ello se han implementado metodologías que, centradas en la gestión basada en el análisis del riesgo [6], identifican la probabilidad de falla y la consecuencia ante una pérdida de líquido en cualquier punto de la tubería. Finalmente, estas metodologías evalúan el riesgo, para implementar y priorizar medidas de mitigación o de mantenimiento, con el fin de reducir la consecuencia o la probabilidad de

falla. En este escenario, los sistemas de información geográfica (SIG) se están convirtiendo en una herramienta indispensable en la gestión de integridad de oleoductos, porque permiten integrar información relacionada con las inspecciones de integridad de la tubería [7], [8], las áreas de alta consecuencia [9], los costos de mantenimiento [10], [11], la evaluación de riesgos [12] y los planes de respuesta a emergencias [13]; información que al ser integrada facilita el análisis en tiempos más cortos y de forma más precisa y confiable durante el ciclo de vida de la infraestructura [14], [15].

Un importante aporte de los SIG a la gestión de integridad de oleoductos está relacionado con la implementación de operaciones de análisis espacial para identificar y cuantificar objetivamente los tramos de la tubería que pueden afectar un área de alta consecuencia. Esta identificación es insumo para la posterior evaluación del riesgo en la tubería y, en consecuencia, para la elaboración de planes de mantenimiento más efectivos. Se describen a continuación los principales criterios en la definición de áreas de alta consecuencia del proyecto de la norma técnica colombiana para la gestión de integridad de sistemas de transporte de líquidos peligrosos, en el estándar internacional API1160 y en la normatividad internacional; además, se indica su posible fuente de información y metodologías basadas en SIG para su identificación.

II. GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD DE TUBERÍAS BASADA EN EL ANÁLISIS DEL RIESGO

La gestión de la integridad de tuberías está centrada en las metodologías de Inspección Basada en el Riesgo (*RBI*, siglas en inglés de *Risk Based Inspection*), que se han desarrollado para la priorización de mantenimiento de sistemas de refinamiento y transporte de líquidos peligrosos. Estas metodologías buscan tener en cuenta, en la toma de decisiones, cuáles medidas de mantenimiento se deben desarrollar y cuándo, además de la confiabilidad del sistema objeto de gestión y el riesgo resultante de las consecuencias originadas ante una falla [6]; para ello se evalúa de forma combinada el riesgo relacionado con los empleados, con la

comunidad, con la interrupción del negocio y el daño ambiental [16].

Las metodologías de *RBI* permiten un análisis sistémico que establece y clasifica los niveles de riesgo asociados con la operación de cada tubería, y se define como la probabilidad de falla por la consecuencia de la falla [17]. El análisis de riesgo define la relación entre las amenazas que pueden reducir la integridad del sistema y las consecuencias en el momento de un derrame, a través de supuestos relacionados con el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento del sistema, así como del ambiente y otros factores externos que afectan el riesgo [5]. Los pasos generales que se siguen durante la implementación de la *RBI* comprenden la recolección y almacenamiento de la información al sistema (características de funcionamiento, historial de fallas, procesos asociados, inspecciones, entre otras), análisis de la probabilidad de falla, análisis de la consecuencia, análisis y evaluación del riesgo, y elaboración de planes de acción relacionados con las futuras inspecciones al sistema, tareas de mitigación o de mantenimiento [17], [18], [19]. La metodología también incluye una etapa en la que se realiza su evaluación, desarrollada para realizar los ajustes y mejoras necesarios.

Para evaluar el riesgo asociado con la población y el medioambiente, en el estándar API1160 y en el proyecto de Norma Técnica Colombiana se definen las áreas de alta consecuencia, que deben ser analizadas para valores de proximidad definidos por el operador del ducto. En el proceso de gestión de integridad se requiere identificar los tramos de tubería que atraviesan o están cercanos a alguna área de alta consecuencia, considerando también la complejidad del territorio.

III. DEFINICIÓN DE ÁREAS DE ALTA CONSECUENCIA

Las áreas de alta consecuencia son zonas en las que un derrame de petróleo puede ocasionar consecuencias adversas a personas, al ambiente, a la infraestructura fluvial comercial [5], [7] y a las vías férreas, autopistas y carreteras [20]. Las áreas de alta consecuencia se pueden clasificar, de acuerdo con

su relación espacial con la tubería, en impactadas directamente e impactadas indirectamente; las primeras son aquellas que intersectan el trazado de la tubería, y las segundas son las que tienen alguna proximidad con el ducto, pero que no lo intersectan [5].

El estándar API1160 [5] cita las normas estadounidenses donde se clasifican las áreas de alta consecuencia en vías fluviales con alguna probabilidad de navegación comercial; áreas pobladas de alta densidad, con más de 50.000 habitantes, y densidad poblacional no menor a 386 personas por kilómetro cuadrado (1.000 personas por milla cuadrada); otras áreas pobladas que contienen alguna concentración poblacional, y áreas particularmente sensibles [21]. Adicionalmente, en China se consideran áreas de alta consecuencia las carreteras principales y las vías férreas, ya que son lugares donde puede haber afectación a la población [22]; en el proyecto de Norma Técnica Colombiana, incluir o no este último tipo de áreas se deja a criterio del operador del ducto [20]. La información espacial para la identificación de AAC y sus respectivas fuentes en Colombia podría ser la cartografía base producida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escalas 1:25.000 ó 1:100.000, y la cartografía temática producida por entidades como las Corporaciones Autónomas Regionales, el Instituto de Estudios Hidrológicos, Meteorológicos y Ambientales, el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Con relación a la información espacial tomada de la cartografía base, el principal inconveniente es que no se encuentra actualizada para el país, y presenta diferencias entre planchas, lo que obliga a recurrir a métodos para actualizarla [23].

A. Áreas altamente pobladas y otras áreas pobladas

Por los efectos adversos sobre la morbilidad y mortalidad de los seres humanos, este tipo de áreas son de gran importancia y deben ser cuidadosamente definidas y delimitadas. Teniendo en cuenta los lineamientos dados en la norma estadounidense 49 CFR 195.450 (que se toma como referencia por no

contar con legislación asociada para Colombia) y los datos del censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el año 2005, se encuentra que 76 municipios de Colombia tienen una población mayor a 50.000 habitantes en su cabecera municipal [24]; pero no se cuenta con estadísticas oficiales a nivel nacional sobre las densidades poblacionales. La clasificación de zonas urbanas, dada en la normatividad estadounidense, debe ser evaluada para el caso de las condiciones geográficas, sociales y económicas propias de Colombia, por lo que sería necesario un estudio para definir y clasificar este tipo de AAC. Más aún teniendo en cuenta que en el proyecto de norma colombiana no se hace referencia a ningún tipo de clasificación.

B. Corrientes hídricas navegables

Las vías de transporte fluvial se consideran áreas de alta consecuencia por su importancia económica para el desarrollo nacional y regional, ya que un derrame puede causar la interrupción del transporte comercial. La red de infraestructura fluvial de Colombia está conformada por 18.225 kilómetros de ríos, divididos en cuatro cuencas, como se muestra en el Cuadro 1. Los canales navegables en Colombia se clasifican, según su función, en canales para embarcaciones menores, embarcaciones mayores o la combinación de estas dos; las embarcaciones menores son las que tienen una capacidad de transporte menor a 25 toneladas, y las mayores, las que tienen una capacidad mayor a 25 toneladas [25].

Cuadro 1. Infraestructura fluvial en Colombia

Cuenca	Longitud navegable (km)			Total	Longitud de ríos (km)
	Mayor		Menor		
	Permanente	Transitorio			4.258
Magdalena	1.188	277	1.305	2.770	4.435
Atrato	1.075	242	1.760	3.077	8.897
Orinoco	2.555	1.560	2.621	6.736	7.135
Amazonas	2.245	2.131	1.266	5.642	24.725
TOTAL	7.063	4.210	6.952	18.225	

Fuente: Ministerio de Transporte. (2009). Anuario Estadístico del Transporte. Oficina Asesora de Planeación. Bogotá, Colombia. [En línea]. Disponible: <http://www.mintransporte.gov.co/Servicios/Estadisticas/home.htm>.

Adicionalmente, la Ley 242 de 2008 considera también vías fluviales a las lagunas, los lagos, las ciénagas, los embalses y la bahía de Cartagena. El Ministerio de Transporte incluye los principales cuerpos de agua en un mapa de Inspecciones Fluviales, donde además se indica cuál es la red fluvial primaria y secundaria del país [26].

C. Áreas particularmente sensibles

Las áreas particularmente sensibles son aquellas en las que el derrame de líquido transportado causa impactos ambientales negativos en un largo plazo [27]; para su identificación se realiza una determinación inicial de áreas ambientalmente sensibles ante un derrame de petróleo, para después,

con estas áreas y la implementación de criterios de selección, identificar las AAC definitivas [27], [28]. Los criterios para la selección son la vulnerabilidad del recurso natural ante el derrame de crudo, la unicidad del recurso, si el recurso es irreparable o irremplazable, si hay sustitutos para el recurso y la criticidad del recurso [27].

Para implementar este procedimiento en Colombia habría que identificar las posibles áreas ambientalmente sensibles, considerando la disponibilidad de información, tanto espacial como no espacial, y la clasificación de este tipo de áreas como fuentes de agua para uso humano y zonas de importancia ecológica, siguiendo el ejemplo de la legislación existente para los Estados Unidos [21]; lo

cual requiere de un equipo interdisciplinar que incluya, entre otros, especialistas en biología, geografía, geología e ingeniería. Igualmente importante sería la participación de todas las entidades gubernamentales y no gubernamentales encargadas del control y vigilancia de este tipo de zonas en el país.

1) Fuentes de agua para consumo humano

Dentro de los usos del agua, considerados por la Ley 9 de 1979 en Colombia [29], están el consumo

humano y doméstico, la preservación de la flora y la fauna, las actividades agrícolas y pecuarias, recreativas, industriales y de transporte. Teniendo en cuenta los usos del agua, Sames [27] considera las bocatomas o pozos que suministren agua para uso doméstico, industrial y comercial como áreas ambientalmente sensibles, y, basado en criterios que se resumen en el Cuadro 2, realiza un proceso de selección de las fuentes de agua que pueden ser afectadas de forma permanente o a largo plazo por el derrame de un líquido peligroso.

Cuadro 2. Criterios para clasificar fuentes de agua como áreas ambientalmente sensibles

Uso	Tipo de fuente principal	Fuente alternativa	Área ambientalmente sensible
Poblaciones transitorias (campamentos, hoteles de uso transitorio)	Superficial	No	Ninguna
Poblaciones de mínimo 25 personas durante todo el año	Superficial	Ninguna adecuada	Bocatoma
	Subterránea de acuíferos TIPO I y TIPO IIa [30]	Ninguna adecuada	Áreas de protección asociadas al pozo de agua
		Ninguna	Área igual al doble del área de protección asociadas al pozo de agua
	Subterránea de acuíferos TIPO IIb, TIPO III o TIPO U [30]	Ninguna adecuada	Áreas de protección asociadas al pozo de agua
Poblaciones de mínimo 25 personas durante mínimo seis meses	Superficial	Ninguna adecuada	Bocatoma
	Subterránea de acuíferos TIPO I y TIPO IIa [30]	Ninguna adecuada	Áreas de protección asociadas al pozo de agua
		Ninguna	Área igual al doble del área de protección asociadas al pozo de agua
	Subterránea de acuíferos TIPO IIb, TIPO III o TIPO U [30]	Ninguna adecuada	Áreas de protección asociadas al pozo de agua

En Colombia, los usos relacionados con consumo doméstico, comercial e industrial están definidos por el Decreto 1594 de 1984 [31]. El uso doméstico y comercial incluye actividades como fabricación y procesamiento de alimentos, bebida directa, preparación de alimentos, satisfacción de necesidades domésticas y fabricación o procesamiento de medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares. El uso industrial incluye actividades como

procesos manufactureros de transformación o explotación, generación de energía y minería. Además de estos usos, dentro del análisis de AAC se podría incluir el consumo de agua para el sector agrícola, ya que es el de mayor demanda en el país [32].

En cuanto a la fuente de información relacionada con estas áreas de alta consecuencia, las Corporaciones Autónomas Regionales, encargadas de regular las

licencias de explotación del recurso agua de las fuentes naturales, deberían tener georreferenciados dichos puntos, al igual que definidas sus áreas de protección.

2) Recursos ecológicos

En Colombia, las áreas ambientalmente sensibles que se podrían considerar en el proceso de selección de AAC, relacionadas con recursos ecológicos, hacen parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. De acuerdo con la Ley 165 de 1994 [33], un área protegida es “un área definida geográficamente que haya sido asignada o regulada y administrada a fin de alcanzar objetivos específicos de conservación”; un listado de estas áreas se puede ver en la página web de Parques Naturales Nacionales de Colombia.

La información relacionada con las características geográficas y ecológicas de las áreas protegidas se puede obtener de las entidades y personas encargadas de su manejo, como Parques Naturales Nacionales de Colombia, las corporaciones autónomas regionales, los municipios y organizaciones privadas. De otro lado, se puede considerar la localización geográfica de las especies con algún riesgo de extinción (la lista para flora y fauna es aportada por el Instituto Von Humbolt), al igual que las zonas de migración de aves, como es el caso de la Sierra Nevada de Santa Marta [34].

Los criterios de selección de AAC dados por Sames [27] y Freeman *et ál.* [28] corresponden a áreas con presencia de especies en peligro, áreas con empobrecimiento de las especies marinas y áreas con un alto porcentaje de población de especies de aves migratorias. En este caso también se requiere de un equipo interdisciplinario que realice una adecuada identificación de este tipo de áreas.

IV. METODOLOGÍAS CON SIG PARA IDENTIFICAR ÁREAS DE ALTA CONSECUENCIA

La identificación de tramos o puntos de la tubería que pueden afectar áreas de alta consecuencia debe considerar los casos en que el impacto es directo e indirecto con relación a su localización espacial [35]; en las AAC impactadas directamente, la tubería atraviesa el área y su identificación es sencilla, utilizando operaciones de análisis de sobreposición; en las áreas de alta consecuencia impactadas indirectamente, la tubería se encuentra a una proximidad determinada, y el derrame puede alcanzarlas a través de la superficie de la tierra o a través de canales, por lo que los análisis por realizar suelen ser más complejos [35], [36], [37]. En cuanto a la precisión de los datos espaciales ingresados en los análisis, Jai *et ál.* [38] emplean cartografía 1:50.000, mientras que para los Estados Unidos la escala puede variar de 1:100.000 a 1:500.000, situación que debe ser estudiada debido a la incidencia de la escala en la identificación de áreas a ser impactadas ambientalmente [39].

A. Análisis espacial para identificar tramos de tubería con afectación directa

El procedimiento para identificar tramos de tubería con afectación directa consiste en sobreponer la tubería con AAC (Fig. 1). Teniendo en cuenta que durante la gestión de infraestructuras lineales es muy común utilizar como sistema de referencia espacial medidas a lo largo del trayecto, los programas de sistemas de información geográfica han incorporado la referencia lineal como método para organizar localizaciones geográficas, utilizando la medida de distancia de un punto a lo largo de una línea desde otro punto de referencia [40]-[42]. El uso de la referencia lineal permite identificar las estaciones en las que la tubería cruza determinada AAC, al igual que las coordenadas Norte y Este de estos puntos [43].

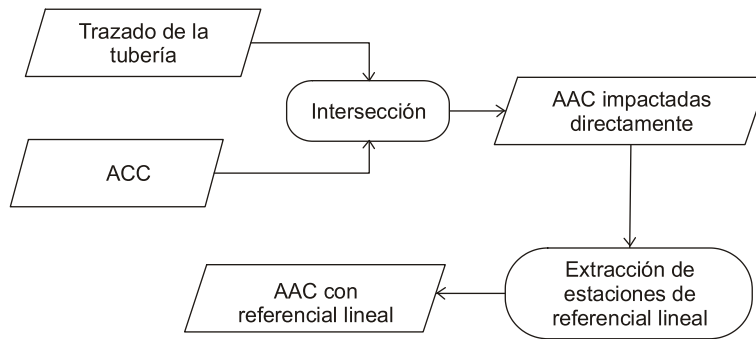


Fig. 1. Proceso para identificar las áreas de alta consecuencia impactadas directamente.
Fuente: traducido de Odegar and Humber [35].

El modelo de la Fig. 1 tiene como información de entrada el trazado de la tubería en geometría de línea y las AAC, que pueden ser de geometría línea o polígono. El trazado de la tubería debe ser calibrado, este proceso consiste en la asignación de valores de longitud medidos desde un punto de referencia [40]. El análisis espacial consiste en una sobreposición para identificar puntos comunes a las coberturas iniciales. Finalmente se utiliza la tubería calibrada para conocer la estación de inicio y fin de cada uno de los tramos que interceptan AAC.

B. Análisis espacial para identificar tramos con afectación indirecta

La determinación de AAC impactadas indirectamente es más compleja debido a que el modelamiento debe considerar la radiación térmica en el caso de una fuga con incendio o un derrame descontrolado [35]. La implementación más sencilla incluye la ampliación de la AAC o de la tubería hasta una proximidad determinada, para luego realizar la sobreposición indicada en la Fig. 1 [38], [43]; aunque otros autores proponen realizar análisis espaciales más exhaustivos para lograr dicha identificación.

Para fluidos con baja probabilidad de ignición, la afectación de AAC está gobernada por flujo en canales y flujo superficial, donde la implementación de análisis espaciales requiere de tres fuentes de información: el trazado de la tubería, la localización de las AAC y los datos para la modelación del flujo superficial [35]. Los requerimientos de información

para implementar análisis exhaustivos son los siguientes [36,] [44], [45], [46]:

Modelo digital de elevación. Es el principal componente; determina la energía potencial disponible y la dirección del flujo. Se deben considerar barreras e incrementos fuertes de pendiente.

Localización del origen del derrame. Lugar del derrame (punto o línea). La localización de puntos requiere indicar lugares predefinidos, mientras que la localización en línea tiene la ventaja de permitir el modelamiento de todo el sistema ante un derrame.

Características del derrame. Tiempo de duración del derrame y volumen de líquido liberado. El tiempo de duración del derrame está relacionado con el tiempo de respuesta para el cerrado de la válvula en una emergencia. El volumen liberado depende de las características hidráulicas de la tubería, y es esencial para determinar la extensión del derrame.

Tipo de flujo. Se pueden considerar flujo laminar, planar o en canales, cada uno de los cuales depende de la topografía.

Factores de resistencia al flujo y propiedades del suelo. Se consideran todas las posibles barreras al flujo como la vegetación, elementos puestos por el hombre, la hidrografía y las propiedades de absorción del suelo.

Propiedades del fluido: densidad, viscosidad y presión de vapor. Los dos primeros explican el movimiento y masa del fluido, mientras que la

presión de vapor es importante cuando se considera la evaporación del fluido.

Condiciones ambientales. La velocidad del viento y la temperatura ambiental son factores que determinan la tasa de evaporación del fluido.

Cada uno de los autores que mencionan los anteriores requerimientos de información han implementado

modelos para identificar AAC impactadas indirectamente, los cuales se pueden resumir en el modelo general de la Fig. 2. Este modelo es complementado por Paige *et ál.* [36], considerando las características de la red hídrica, simulando derrames que alcanzan corrientes hídricas y son transportados hacia AAC considerablemente alejadas de la tubería.

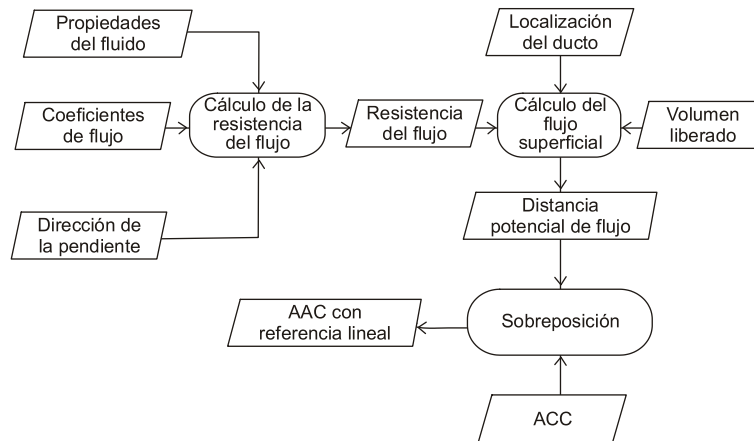


Fig. 2. Proceso para identificar las áreas de alta consecuencia impactadas indirectamente.

Fuente: traducido de Odegar and Humber [35]

Teniendo en cuenta que la distancia recorrida por el fluido después de ser liberado depende de la pendiente, se han utilizado cuatro métodos que permiten determinar esta distancia. El primer método realiza un análisis de una ventana de 3 por 3 pixeles de un modelo digital de elevación; a partir de la celda central se identifica la celda de menor altura, para indicar la dirección del flujo; en este método el flujo solo ocurre si hay un descenso de nivel desde el pixel central; si esta situación no se presenta, el algoritmo de cálculo termina [47]; en zonas donde hay una profundidad constante, esta debe ser llenada por el fluido para que el proceso continúe [45]. Este primer modelo solo tiene en cuenta el modelo digital de elevación y la fuente del flujo, por lo que es el menos exhaustivo de los tres modelos.

El segundo método utiliza el modelo digital de elevación para identificar los lugares con alturas menores a la fuente del derrame, y los clasifica como

posibles de ser afectadas. El modelo simula el derrame desde el origen hasta los lugares que pueden ser afectados, considerando como restricciones el volumen de líquido liberado y la distancia. Denby y Humber [44] consideran que a pesar de que se pueden incluir todos los parámetros requeridos para un modelo exhaustivo, muchos de ellos son asumidos constantes para toda la zona de estudio y no considera su variabilidad espacial.

El tercer método es el más exhaustivo desde el punto de vista del análisis y desde los datos de entrada. Considera, el modelo digital de elevación, los tipos de flujo y factores de resistencia, y, en consecuencia, se aproxima mejor a la forma en que fluye el líquido derramado [44]. El modelo debe incluir el hecho de que parte del fluido va quedando adherido a la superficie del terreno o a la vegetación, así como considerar la acumulación en zonas de depresión; para considerar estos efectos se incluyen en el modelo

las variables relacionadas con las características físicas del suelo y del líquido [45], [48].

El cuarto método utiliza el modelo digital de elevación para determinar la dirección del flujo y determinar cuál es la acumulación en cada celda. Durante el proceso se marcan las celdas que están relacionadas con corrientes hídricas, y cuando el derrame alcanza estas celdas el análisis cambia, para considerar la dirección del flujo de la corriente hídrica, su velocidad y orden de la corriente para determinar la distancia que será transportado. Para la determinación de la distancia se considera el tiempo de respuesta para el cerrado de las válvulas después de ocurrido el derrame [37]. Adicionalmente, Farrar *et ál.* [45] consideran la pérdida de fluido causada por la evaporación, haciendo de este modelo el más cercano a la realidad para derrames sobre la superficie del terreno. Mulligan [49] implementó un modelo con las características ya mencionadas, que permite ser usado para simular fugas en cualquier parte de la tubería e identificar la velocidad de contaminación y área contaminada.

Hasta el momento se puede ver que los modelos implementados en sistemas de información geográfica están orientados a identificar las áreas afectadas ante un derrame superficial de líquido; pero para el caso particular de las tuberías instaladas bajo tierra no se ha encontrado, en este estudio, ese tipo de modelamiento espacial. Al igual que para el transporte superficial de líquidos, existen leyes físicas ya establecidas para determinar el flujo de líquidos en medios porosos [50], las cuales pueden contribuir a una modelación espacial de este tipo de fenómenos.

V. CONCLUSIONES

La clasificación dada para las áreas de alta consecuencia permite mostrar que en Colombia la información espacial no está centralizada ni disponible para su adecuada identificación; además, que las AAC definidas por las normas estadounidense no están adaptadas a la geografía y condiciones de nuestro país. Por otro lado, la cartografía base no se encuentra actualizada, lo cual en algunas zonas con altas dinámicas espaciales podría llevar a tomar

decisiones no acordes con la realidad. En cuanto a los datos provenientes de la cartografía temática, se tiene el principal inconveniente de que no son de fácil adquisición o no se tiene certeza sobre su existencia y disponibilidad. Por lo tanto, junto con la próxima publicación de la nueva Norma Técnica Colombiana para gestión de integridad de tuberías de transporte de líquidos peligrosos, debería surgir la regulación de la información por utilizar, sus fuentes y escala.

Los modelos de análisis espacial implementados a escala internacional para identificar áreas de alta consecuencia fueron desarrollados para tuberías localizadas en la superficie del terreno; pero en el caso particular de Colombia, las tuberías se encuentran bajo tierra, por lo que dichos modelos no se pueden aplicar directamente. Se requiere la definición y complementación de modelos exhaustivos para las condiciones particulares de nuestro país; por lo tanto, esta es una importante área de investigaciones futuras en cuanto al modelamiento espacial. En futuros estudios se podrían incluir en los análisis el análisis multicriterio o el uso de lógica difusa [51] para considerar criterios como el de que a mayor proximidad del AAC al ducto, mayor debería ser el valor de consecuencia asignado. Hoy en día solo se pueden implementar modelos que consideran una proximidad uniforme independiente de la variación espacial de factores que gobiernan el transporte de líquidos en medios porosos.

Referencias Bibliográficas

- [1] El Tiempo. "Mancha de crudo navega por el río Magdalena". *El Tiempo*, mayo 24 de 1995. [En línea]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-332226>.
- [2] Caracol Radio. "Derrame de petróleo en zona rural de Sincelejo provoca daño ambiental". *Caracol Radio*, junio 26 de 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.caracol.com.co/nota.aspx?id=835769>.
- [3] Armada Nacional de Colombia. *Desastre ecológico causado por el terrorismo en Colombia*. Armada Nacional de Colombia, 2003, octubre 30. [En línea]. Disponible en: <http://www.fac.mil.co/index.php?idcategoria=2192>.
- [4] J. Celis. "Efectos de los derrames de petróleo sobre los hábitats marinos". *Ciencia Ahora*, 24(12), pp.

- 22-30 2009. Julio a diciembre 2009.
- [5] *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*. American Petroleum Institute 1160, 2001.
- [6] M. Bertolini, M. Bevilacqua, F. E. Ciarapica and G. Giacchetta, G. (2009, March). "Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [Online]. 22 (2), pp. 244-253. Available: <http://www.sciencedirect.com>.
- [7] W. Perich, D. Oostendorp, P. Puente and N. Strike. (2003, Oct.). "Integrated Data Approach to Pipeline Integrity Management". *Pipeline and Gas Journal* [online]. Available: <http://www.oildompublishing.com/pgj/pgjarchive/Oct03/integrateddata10.03.pdf>.
- [8] C. Pubillier. *A 3D GIS Pipeline Management. Presented at 23th Anual ESRI International User Conference*. Available: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc03/p1105.pdf>.
- [9] Aeroterra. *Sistema de integridad de ductos*. Aeroterra. 2008. Buenos Aires, Argentina. [En línea]. Disponible: http://www.aeroterra.com/PDF/ASA_Integridad_Ductos.pdf?Subject=Ref.:Integridad%20de%20Ductos.
- [10] M. Garaci, J. Sutherland and B. J. Mergelas. *Role of GIS and Data Management Systems for Pipeline Integrity*. Presented at Pipeline División Speciality Conference 2002. Available: <http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=ASCECP000114040641000006000001&idtype=cvips&gifs=yes&ref=no>.
- [11] J. Allen. "Integrated Pipeline GIS, Finance and Work Management". *Pipeline and Gas Journal* [Online]. 235(12). pp. 59-61. 2008, Dic. Available: <http://www.oildompublishing.com/PGJ/pgjarchv.htm>.
- [12] D. Coobs. "GIS - An Invaluable Tool for Oil & Gas". *Pipeline and Gas Journal* [Online]. 233(8). pp 48-54. 2006, Aug. Available: <http://www.oildompublishing.com/PGJ/pgjarchv.htm>.
- [13] J. Palmer. "GIS Plays Critical Role in Data Management and Pipeline Integrity". *Pipeline and Gas Journal* [Online]. Available <http://www.oildompublishing.com/PGJ/pgjarchv.htm>.
- [14] S. Kennedy. "Pipelines Benefits By Integrating Management Systems". *Pipeline and Gas Journal* [Online]. pp. 57-58. 2002, Sep. Available: <http://www.oildompublishing.com/PGJ/pgjarchv.htm>.
- [15] M. C. Dueñas, H. Sepúlveda, E. Vera, Y. Pineda, Yaneth y C. Africano. "Aseguramiento del riesgo por corrosión externa en ductos mediante correlación de datos de inspección". *Scientia et Technia*. Año XIII. No. 36. pp. 513-517. Septiembre, 2007.
- [16] *Risk-Based Inspection Technology*. American Petroleum Institute Recommended Practice 581, 2008.
- [17] M. Chang, R. Chang, C. Shu and K. Lin.. "Application of Risk Based Inspection in Refinery and Processing Piping". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* [Online]. 18(4-6). pp. 397-402. 2005, Jul. Available: <http://www.science-direct.com>.
- [18] R. J. Patel. *Risk Based Inspection*. Presented at Middle East Nondestructive Testing Conference and Exhibition. Available: www.ndt.net/article/mendt2005/pdf/23.pdf.
- [19] S. Tien, W. Hwang and C. Tsai. Study of a Risk-Based Piping Inspection Guideline System. *ISA Transactions* [Online]. 46(1). pp. 119-126. 2007, Feb. Available: <http://www.sciencedirect.com>.
- [20] Gestión de Integridad para Sistemas de Transporte de Líquidos Peligrosos. Proyecto de norma técnica ICONTEC. 2010.
- [21] United States. Code of Federal Regulations. *CFR 195.450, Pipeline integrity management in high consequence areas*. [Online]. 2001. Dic, 1. Available: <http://law.justia.com/us/cfr/title49/49-3.1.1.1.6.6.22.27.html>.
- [22] S. Jia, Q. Feng, L. Zhou and H. YU. "Software Uses GIS Data To Identify High-Consequence Areas Along Pipelines". *Pipeline and Gas Journal* [Online]. 235(8). 2009, August). Available: <http://www.pgionline.com/software-uses-gis-data-identify-high-consequence-areas-along-pipelines?page=show>.
- [23] O. J. Daza, R. Sanabria y E. Vera. *Herramientas de análisis espacial para la identificación de áreas de alta consecuencia en gestión de integridad de ductos*. Presentado en II Congreso Internacional en Ingeniería civil 2010. [CD-ROM].
- [24] Departamento Administrativo Nacional de Estadística. *Censo general 2005: Nivel Nacional*. Bogotá: DANE, 2008. 498 p.
- [25] Colombia. Congreso de la República de Colombia. *Ley 1242* (5, agosto, 2008). Por la cual se establece el Código Nacional de Navegación y Actividades Portuarias Fluviales y se dictan otras disposiciones.
- [26] Ministerio de Transporte de Colombia. *Mapa Red Fluvial Nacional*. Bogotá: Dirección General de Transporte Fluvial, 2008. 1 Mapa.
- [27] C. Sames. *Identification and Mapping of Areas Unusually Sensitive to Environmental Damage from a Hazardous Liquid Release*. Presented at 2001 International Oil Spill Conference. Available: <http://www.iosc.org/papers/00958.pdf>.
- [28] B. Freeman, M. Macrader, B. Holton, J. Williams

- and S. Zengel, Scott. *Ugins GIS to Identify Unusually Sensitive Areas*. Presented at 21th Anual ESRI International User Conference. Available: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap591/p591.htm>.
- [29] Colombia. Congreso de la República de Colombia. *Ley 9*. (24, enero, 1979). Por la cual se dictan medidas sanitarias. 13 p.
- [30] W. A. Pettyjohn, M. Savoca and D. Self. "Regional Assessment of aquifer vulnerability and sensitivity in the conterminous United States". United States Environmental Protection Agency, Washington D.C., EPA/600/2-91/04, August, 1991.
- [31] Colombia. Ministerio de Agricultura. *Decreto 1594*. (26 de junio, 1984). Por el cual se reglamenta el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III - Libro I del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto asuntos del agua y residuos líquidos. 55 p.
- [32] C. Costa, R. Vanegas, E. Domínguez y H. G. Rivera, *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia. Estudio nacional del agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica*. 2008. IDEAM. Bogotá, Colombia. [En línea] Disponible: <http://www.cambioclimatico.gov.co:9090/openbiblio/Bvirtual/020962/Estudio%20Nacional%20del%20agua.pdf>.
- [33] Colombia. Congreso de la República de Colombia. *Ley 165* (9 de noviembre, 1994). Por la cual se aprueba el "Convenio sobre la diversidad biológica" hecho en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992.
- [34] Selva. *Project: Crossing the Caribbean – identifying priority stopover sites for Neotropical migratory birds in northern Colombia*. 2010. Available: <http://avesmigratoriascolombia.wordpress.com>.
- [35] L. Odegard and J. Humber. *Comprehensive Modeling: Inventorying Directly and Indirectly Affected High Consequence Areas*. Presented at Geo Tech Event 2005. [Online]. Available: http://www.integrated-informatics.com/pdf/geotec_2005_hca_presentation.pdf.
- [36] D. Paige, N. Park and J. Posner, Jonathan. *Terrestrial Spill Modeling: Increase Confidence in the Estimation of High Consequence Area (HCA) Impact*. Presented at GIS for Oil and Gas Conference 2002. Available: http://www.geofields.com/support/resources/Presentations/OGJ_HCA_Liq_reprint.pdf.
- [37] D. Paige, N. Park and J. Posner. "Modeling pipeline spill determines impact on HCAs". *Oil and Gas Journal*, 2003, Mar. [Online]. 6 p. Available: http://www.geofields.com/support/resources/Presentations/OGJ_HCA_Liq_reprint.pdf.
- [38] S. Jia, Q. Feng, L. Zhou and H. YU. "Software Uses GIS Data To Identify High-Consequence Areas Along Pipelines". *Pipeline and Gas Journal* [Online]. 235(8), 2009, August. Available: <http://www.pgionline.com/software-uses-gis-data-identify-high-consequence-areas-along-pipelines?page=show>.
- [39] E. João. "How scale affects environmental impact assessment". *Environmental Impact Assessment Review*. [Online]. 22(4). pp. 289-310. 2002, Aug. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/>
- [40] P. Brennan and M. Harlow. "ArcGIS 9: Linear Referencing in ArcGIS". *Redlands: ESRI*, 2004. 164 p.
- [41] V. Noronha and R. Church. *Linear Referencing and Other Forms of Location Expression for Transportation*. 2002. [Online]. Available: <http://www.ncgia.ucsb.edu/vital/research/pubs/200204-LRsynthesis.pdf>.
- [42] R. Blazek. *Introducing the Linear Reference System in GRASS*. Presented at FOSS/GRASS User Conference 2004. [Online]. Available: <http://gisws.media.osaka-cu.ac.jp/grass04/viewpaper.php?id=50>.
- [43] J. Meehl. *Pipeline Integrity Management Using Linear Referencing Whit ArcObjects*. Presented at 24th Anual ESRI International User Conference. [Online]. Available: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc04/docs/pap1976.pdf>.
- [44] A. Denby and J. Humber. *Overland Flow: Comparison of Modelling Methods*. Presented at GIS for Oil and Gas Conference 2004. [Online]. Available: http://www.gisdevelopment.net/proceedings/gita/oil_gas2004/index.htm.
- [45] W. Farrar, C. Galagan, T. Isaji and K. Knee. *GIS Technology applied to Modeling Oil Spill on Land*. Presented at 25th Anual ESRI International User Conference. [Online]. Available: <http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap2129.pdf>.
- [46] R. Kiefer. (2008). "GIS Method for Calculating Maximum Potential Spill Volume Due to Natural Landforms". *Papers in Resource Analysis* [Online]. 2008. 10. 11 p. Available: <http://www.gis.smu.edu/GradProjects/KieferR.pdf>.
- [47] J. P. Wilson and J. C. Gallant. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Estados Unidos: WILEY, 2000. 520 p.
- [48] S. Kutukov, R. Bakhtizin, R. Nabiev, S. Pavlov and A. Vasiliev. *Simulation Method of Pipeline Sections*

- Ranking by Environmental Hazard due to Oil Damage Spill*. Presented at Intellectual Service for Oil and Gas Industry: Analysis, Solutions, Perspectives. [Online]. Available: <http://www.ogbus.com/eng/authors/Nabiev/simulation.pdf>.
- [49] M. Mulligan. *SLICKMOD - A spatial model of oil spill dispersal rates and extents in aquatic environments*. King's College London. (2007, Sep). [Online]. Available: <URL:http://www.ambiotek.com/slickmod/slickmod_documentation.pdf>.
- [50] A. O. Hernández y J. Echeverría. "Modelación de la migración de derivados del petróleo en las aguas subterráneas en un acuífero poco profundo próximo al pueblo de Güines". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* (2001, Marzo). [En Línea]. *VXXIII(1)*. pp. 3-9. Disponible: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd19/collazo/modmigra.pdf>>.
- [51] T. A. Yanar and Z. Akyürek. "The enhancement of the cell-based GIS analysis with fuzzy processing capabilities". *Information Sciences*. [Online]. 176(2006), pp. 1067-1085. Available: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V0C-4FP1GFG-1&_user=10&_coverDate=04/22/2006&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1477788386&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=417c441716cc43071a449f89f635607f&searchtype=a.