

**Metodología para Evaluación de Vulnerabilidad Ambiental ante Derrames de
Hidrocarburos en ríos.**

Diana Marcela Ibarra Mojica

Trabajo de Grado para Optar por el título de Magíster en Ingeniería Química

Director

Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov

Dr. en Ciencias Técnicas

Co-directora

Ágata Fernandes Romero

Dra. en Geociencias y Medio Ambiente.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Químicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2017

Dedicatoria

*A mis papás y hermanas, mi más grande inspiración y motivación
para alcanzar siempre nuevas metas.*

*A mi esposo, porque con su amor y fe en mi me ayuda a construir
cada día este camino.*

Agradecimientos

Al mis compañeros del Centro de Investigaciones para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía –CIDES, por todo su apoyo durante este proceso.

Al Dr. Kafarov por la confianza depositada en mí para desarrollar mi trabajo de investigación en su grupo de investigación.

A mis compañeros de Maestría, “los peladitos”, por recorrer parte de este camino conmigo, que no habría sido posible sin su apoyo y cariño.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira y su familia, por la confianza depositada en mí, su apoyo constante e incondicional.

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Planteamiento del trabajo de investigación	17
1.1. Planteamiento del problema.	17
1.2. Hipótesis	19
1.3. Objetivos	19
1.3.1. General.	19
1.3.2. Específicos.	19
2. Marco teórico	20
2.1. Impacto de derrames de hidrocarburos en ríos.	20
2.2. Comportamiento de derrames de hidrocarburos en ríos.	20
2.2.1. Advección.	21
2.2.2. Dispersión mecánica.	22
2.2.3. Adhesión a las orillas.	22
2.2.4. Evaporación.	22
2.2.5. Disolución.	22
2.2.6. Mezcla vertical y resuspensión.	23
2.3. Evaluación de vulnerabilidad.	23
2.3.1. Evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos.	25
2.3.2. Evaluación de susceptibilidad.	28
3. Metodología.	30

3.1. Fase I. Selección de métodos y/o metodologías para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad, aplicable a ríos.	30
3.2. Fase II. Planteamiento de metodología para evaluación de vulnerabilidad en ríos.	31
3.3. Fase III. Aplicación en un caso de estudio de la metodología planteada para evaluación de vulnerabilidad.	32
3.3.1. Evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos.	32
3.3.2. Evaluación de susceptibilidad.	33
3.3.4. Evaluación de vulnerabilidad.	34
4. Resultados y análisis.	35
4.1. Fase I. Métodos y/o metodologías seleccionadas para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad, aplicables a ríos.	35
4.1.1. Environmental Sensitivity Index, ESI-NOAA, para evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos.	35
4.1.2. SPILLCALC, modelo de trayectoria y degradación de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.	37
4.2. Fase II. Metodología para evaluación de vulnerabilidad en ríos.	45
4.2.3. Adaptación de Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos (Environmental Vulnerability Index in Rivers, EVI-R).	45
4.3. Fase III. Aplicación en un caso de estudio de la metodología planteada para evaluación de vulnerabilidad.	51
4.3.1. Área de estudio.	51
4.3.2. Evaluación de sensibilidad.	51
4.3.3. Evaluación de susceptibilidad.	54
5. Conclusiones.	67

6. Divulgación de resultados.	69
Referencias Bibliográficas	71

Lista de Figuras

Figura II-1. Comportamiento de derrames de hidrocarburos en ríos.	21
Figura II-2. Análisis de vulnerabilidad propuesto por Romero et. al., 2009.....	26
Figura II-3. Análisis de vulnerabilidad propuesto por Da Silva et. al., 2011.....	27
Figura II-4. ESI y RSI, NOAA.....	27
Figura III-1. Metodología de ejecución del proyecto.....	34
Figura IV-1. Características del medio para evaluación de sensibilidad.	35
Figura IV-2. Resumen de operación de SPILLCALC	46
Figura IV-3. Propuesta metodológica para evaluación de derrames de hidrocarburos en ríos.	51
Figura IV-4. ESI en el sector de estudio, condiciones normales y de inundación.	53
Figura IV-5. Velocidad de corriente en un sector de estudio del río Magdalena.....	56
Figura IV-6. Resultados presencia de hidrocarburos en superficie de lámina de agua.....	59
Figura IV-7. Resultados tiempo de primer contacto hidrocarburos – ribera.....	60
Figura IV-8. Probabilidad de presencia de hidrocarburos en la ribera.....	62
Figura IV-9. Áreas inundadas con alta retención de hidrocarburos	63
Figura IV-10. Vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos (riberas).	64
Figura IV-11. Reducción de área de influencia inicial.....	66

Lista de Tablas

Tabla IV-1. Comparación ESI-NOAA (fluvial) y Amazon Riverine Sensitivity (PETROBRAS).	36
Tabla IV-2. Retención de hidrocarburos en riberas de acuerdo al tipo de material.	43
Tabla IV-3. Subclasificación sensibilidad y probabilidad, Romero et. al. 2013	47
Tabla IV-4. Escala IEVO, Romero et. al. 2013.	47
Tabla IV-5. Matriz IEVO, Romero et. al. 2013.	48
Tabla IV-6. ESI simplificado IPIECA.	48
<i>Tabla IV-7.</i> Subclasificación sensibilidad y probabilidad en ríos.	49
Tabla IV-8. Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos, EVI-R	50
Tabla IV-9. Seudocomponentes Western Canadian Select Type Oil.	58
Tabla IV-10. Resumen balance de masas modelos probabilísticos.	61

Lista de Gráficos

Gráfico IV-1. Distribución de sensibilidad periodo normal y de inundación.	52
Gráfico IV-2. Caudales y niveles históricos del río Magdalena en el sector de estudio.	55

Apéndices

- Apéndice A. Mapas de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos, sector río Magdalena. Periodo normal y periodo de inundaciones.
- Apéndice B. Mapas de modelos estocásticos de presencia de hidrocarburos sobre la lámina de agua, sector río Magdalena. Periodo normal y periodo de inundaciones.
- Apéndice C. Mapas de modelos estocásticos de tiempo de contacto hidrocarburo-ribera, sector río Magdalena. Periodo normal y periodo de inundaciones.
- Apéndice D. Mapas de probabilidad presencia de hidrocarburos en la ribera, sector río Magdalena. Periodo normal y periodo de inundaciones.
- Apéndice E. Mapas de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos, sector río Magdalena. Periodo normal y periodo de inundaciones.

Resumen

Título: Metodología para evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos ¹

Autor: Diana Marcela Ibarra Mojica ²

Palabras Clave: Derrames de hidrocarburos, ríos, sensibilidad, vulnerabilidad

Descripción:

Colombia es uno de los países con mayor presencia de cuerpo de agua dulce y frecuentemente los ríos son objeto de contaminación por derrames de hidrocarburos. La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), recomienda conocer el nivel de sensibilidad de los ecosistemas presentes en el área afectada, así como la trayectoria y degradación de las plumas contaminantes. Algunos autores plantean integrar estos dos tipos de información en lo que han denominado evaluación de vulnerabilidad. La literatura reportan metodologías para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad para ríos, pero no metodologías para evaluación de vulnerabilidad. A través del presente trabajo se desarrolló el Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante Derrames de Hidrocarburos en ríos (Environmental Vulnerability Index for Rivers, EVI-R). La aplicación del EVI-R en escenarios hipotéticos de derrames en el río Magdalena permitió establecer zonas prioritarias para manejo de este tipo de contingencias. Esto, en la atención de un incidente real, podría implicar la reducción de impactos socio-ambientales y costos de recuperación de áreas afectadas.

¹ Trabajo de Grado de Maestría

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dr. Viatcheslav Kafarov. Codirectora: Dra. Agata Fernandes Romero

Abstract

Title: Methodology for environmental vulnerability assessment of oil spills in rivers ³

Author: Diana Marcela Ibarra Mojica ⁴

Keywords: Hydrocarbons spills, rivers, sensitivity, vulnerability

Description:

Colombia is one of the countries with the highest presence of freshwater bodies and rivers are frequently subject to pollution by hydrocarbon spills. The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) recommends knowing the level of sensitivity of the ecosystems present in the affected area, as well as the trajectory and degradation of polluting feathers. Some authors propose integrating these two types of information into what they have called vulnerability assessment. The literature reports methodologies for assessing sensitivity and susceptibility to rivers, but not methodologies for vulnerability assessment. Through this work the Environmental Vulnerability Index for Rivers (EVI-R) was developed. The application of EVI-R in hypothetical spill scenarios in the Magdalena River allowed the establishment of priority areas for the management of this type of contingency. This, in the attention of a real incident, could imply the reduction of socio-environmental impacts and costs of recovery of affected areas.

³ Master's Degree Work

⁴ Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Dr.. Viatcheslav Kafarov. Codirector: Dra. Agata Fernandes Romero

Introducción

Según el Estudio Nacional del Agua ((IDEAM, 2014), Colombia es uno de los países con mayor presencia de cuerpo de agua dulce en su territorio. Sin embargo, a diario los ríos son objeto de contaminación como consecuencia de derrames de hidrocarburos provenientes de actividades humanas.

Entidades como National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica (ARPEL), el Minsiterio de Ambiente de Brasil y el Ministerio de Ambiente de Colombia reconocen que la atención efectiva de este tipo de incidentes debe implicar el uso de información del nivel de sensibilidad de los ecosistemas presentes en el área afectada (evaluación de sensibilidad), así como la evaluación de la trayectoria y degradación de las plumas contaminantes (evaluación de susceptibilidad).

Algunos autores señalan que es importante además integrar estos dos tipos de información mediante una evaluación de vulnerabilidad. En la literatura se reporta la existencia de metodologías para realizar evaluación de sensibilidad, susceptibilidad y vulnerabilidad en ambientes marino-costeros. A nivel fluvial no se conocen metodologías para evaluación de vulnerabilidad por lo que a través del presente proyecto de investigación se desarrolló el Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante Derrames de Hidrocarburos en ríos (Environmental Vulnerability Index for Rivers, EVI-R).

La aplicación del EVI-R en escenarios hipotéticos de derrames de diferentes proporciones en un sector del río Magdalena permitió establecer zonas prioritarias para manejo de este tipo de

contingencias, reduciendo hasta en un 95% el área de afectación considerada inicialmente. En la atención de un incidente real, la priorización de áreas podría implicar la reducción de impactos socio-ambientales y costos de recuperación de áreas afectadas, gracias a que se podrían implementar de estrategias de respuesta temprana para evitar el avance del derrame proteger área de alta sensibilidad.

La evaluación del caso de estudio permitió además establecer que el comportamiento y nivel de afectación de los derrames de hidrocarburos en ríos puede verse influenciado por las condiciones climáticas; así como la cantidad de producto derramado. Los resultados obtenidos en los modelos desarrollados para temporadas de inundaciones revelaron que la evaluación de sensibilidad, susceptibilidad y vulnerabilidad en la línea límite de inundación podría no ser apropiada, puesto que en estos casos gran parte de los hidrocarburos pueden retenidos en las zonas anegadas de baja profundidad o con presencia de vegetación emergente. En consecuencia, se plantea la necesidad de desarrollar metodologías específicas de análisis de sensibilidad, susceptibilidad y vulnerabilidad para áreas de inundación.

A través del presente documento se presenta el planteamiento original del trabajo de investigación llevado a cabo, el marco teórico que fundamenta el desarrollo de la metodología de evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos y los resultados obtenidos de su implementación en un caso de estudio sobre un sector del río Magdalena.

1. Planteamiento del trabajo de investigación

1.1. Planteamiento del problema.

Los ríos han sido parte primordial en el desarrollo de las actividades humanas desde el inicio de la civilización (Wu, 2010) dado que además de concentrar gran cantidad de biodiversidad, son fuente importante de recursos y servicios.

A nivel mundial, el incremento de navegación en los ríos e infraestructura de almacenamiento de hidrocarburos a lo largo de su cauce ha aumentado el riesgo de derrames de éstas sustancias en cuerpos de agua (Yapa, Shen, & Angamma, 1994). En Colombia se registran casos como el del Oleoducto Caño Limón Coveñas, en el que el volumen total de crudo derramado entre 1986 y 2004 se aproxima a los 3 millones de barriles (10 veces la cantidad derramada por el Exxon Valdez en Alaska en 1989), siendo solo el 1% de dichos incidentes atribuible a causas diferentes a los sabotajes y actos de terrorismo. En el año 2005, Miranda y Restrepo (Miranda & Restrepo, 2005) estimaron que más del 70% de los derrames de hidrocarburos en Colombia afectaban ríos y caños, 30% de los cuales estarían relacionados con sistemas cenagosos.

Además de los riesgos inmediatos sobre el abastecimiento de agua para los seres humanos (Yapa et al., 1994), el derrame de hidrocarburos en un río puede implicar a largo plazo amenazas sobre la disponibilidad de alimentos, materias primas y zonas de recreación, entre otros. La mitigación de impactos asociados a este tipo de incidentes depende en gran medida de la formulación e implementación de Planes de Contingencia adecuados, los cuales deben abordar principalmente la identificación de fuentes de derrame de hidrocarburos y los respectivos

patrones de dispersión, así como la caracterización de áreas que pueden verse más gravemente afectadas por la presencia de los mismos (Gundlach & Hayes, 1978).

En el mundo se encuentran numerosas técnicas para evaluar por separado la trayectoria de los hidrocarburos derramados en el agua y los impactos socio-ambientales relacionados, mediante análisis de susceptibilidad y análisis de sensibilidad ambiental respectivamente (Rocha-Oliveira, T.C.; Klein, A.H.F. ; Petermann, R. M.; Menezes, J.T. & Sperb, 2008), (Romero, Riedel, Carlos, Milanelli, & Carolina, 2011); siendo más comunes los desarrollos para casos de estudio de ambientes marino-costeros. Sin embargo, algunos autores señalan que, en la práctica, para garantizar una mitigación efectiva de impactos ambientales de estos incidentes se deben integrar los análisis de susceptibilidad y sensibilidad, en lo que han denominado como análisis de vulnerabilidad (Silva, Lima, Araújo, & Gomes, 2011).

En Colombia, el Plan Nacional contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas- PNC (Ministerio del Interior -República de Colombia, 1999) señala la necesidad de analizar la trayectoria de los hidrocarburos una vez son liberados al ambiente como consecuencia de un derrame y los impactos socio-ambientales potenciales asociados, sin embargo, el país no cuenta con una guía oficial o metodología ampliamente reconocida para este fin.

Teniendo en cuenta el panorama nacional de afectación de sistemas fluviales por derrame de hidrocarburos y el escaso desarrollo metodológico para prever los impactos socio-ambientales de este tipo de incidentes, mediante el presente trabajo de investigación, se desarrolló una Metodología para Análisis de Vulnerabilidad Ambiental ante Derrames de Hidrocarburos en Ríos, adaptada a partir de metodologías conocidas para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad ambiental en ambientes marino-costeros y fluviales.

1.2. Hipótesis

Es posible desarrollar una metodología para evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos, mediante la integración de metodologías reconocidas para análisis de sensibilidad y susceptibilidad en ambientes fluviales y/o marino-costeros; como herramienta para la formulación de planes de contingencia.

1.3. Objetivos

1.3.1. General. Formular una metodología para evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos, a partir de la integración de metodologías existentes para análisis de sensibilidad y susceptibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ambientes fluviales y/o marino-costeros.

1.3.2. Específicos.

- Seleccionar una metodología para evaluación de sensibilidad y una metodología para evaluación de susceptibilidad, aplicables al análisis de derrames de hidrocarburos en ríos.
- Formular una metodología de evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos aplicable a ríos, a partir de la integración de los métodos o metodologías seleccionados para análisis de sensibilidad y susceptibilidad.
- Aplicar la metodología planteado para evaluación de vulnerabilidad en ríos, en un escenario hipotético de derrame de hidrocarburos en un caso de estudio (sector del río Magdalena).

2. Marco teórico

2.1. Impacto de derrames de hidrocarburos en ríos.

La muerte de especies de flora y fauna impregnadas con hidrocarburos es tal vez el efecto más inmediato y visible de un derrame de hidrocarburos en un cuerpo de agua. Sin embargo, a mediano y largo plazo se deben considerar impactos como la disminución de disponibilidad de alimento y oxígeno para animales y plantas acuáticas en la columna de agua (Miranda & Restrepo, 2002), la afectación de los ecosistemas de ribera, las ciénagas, esteros y lagunas asociadas al río, en donde tienen lugar las primeras etapas del ciclo de vida de miles de especies de plantas y animales (Miranda & Restrepo, 2005) y cuya recuperación ecológica puede tomar décadas (Petersen et al., 2002).

En consecuencia, los derrames de hidrocarburos en ríos repercuten negativamente en los servicios que los seres humanos reciben de los mismos, como abastecimiento de agua, alimentos, terrenos para cultivo y sitios de recreación, entre otros. Diversos estudios han demostrado además que la interacción de los hidrocarburos con estos ambientes facilita su entrada en el ciclo de nutrientes y los diferentes eslabones de la cadena trófica, llegando finalmente a ser consumidos por los seres humanos (Miranda & Restrepo, 2002).

2.2. Comportamiento de derrames de hidrocarburos en ríos.

Una vez los hidrocarburos son liberados en un río, éstos se esparcen y forman una mancha desde la cual los compuestos más livianos se evaporan, mientras que las fracciones más pesadas se dispersan en la columna de agua y eventualmente se precipitan al fondo del río, (Zapata, Calle, &

Parra, 2002), o son arrastradas por las corrientes hacia la ribera (Yapa et al., 1994). Según Green y Trett (Green & Trett, 2012), factores como la carga de sólidos, caudal y turbulencia del río intervienen en la emulsificación, solubilización, disolución, dispersión y sedimentación del producto (Miranda & Restrepo, 2002).

Diversos autores respaldan estas afirmaciones, relacionando el destino de los hidrocarburos derramados con procesos como el arrastre de la mancha por acción de las corrientes (advección), adhesión a las orillas, dispersión mecánica, evaporación, disolución y mezcla vertical (Yapa et al., 1994), (Guo & Wang, 2009), (Gundlach, 1987), (Yapa, Shen, Wang, & Angamma, 1992), (Fay, 1971), (Giwa & Jimoh, 2010); tal como se muestra en la Figura 2-1.

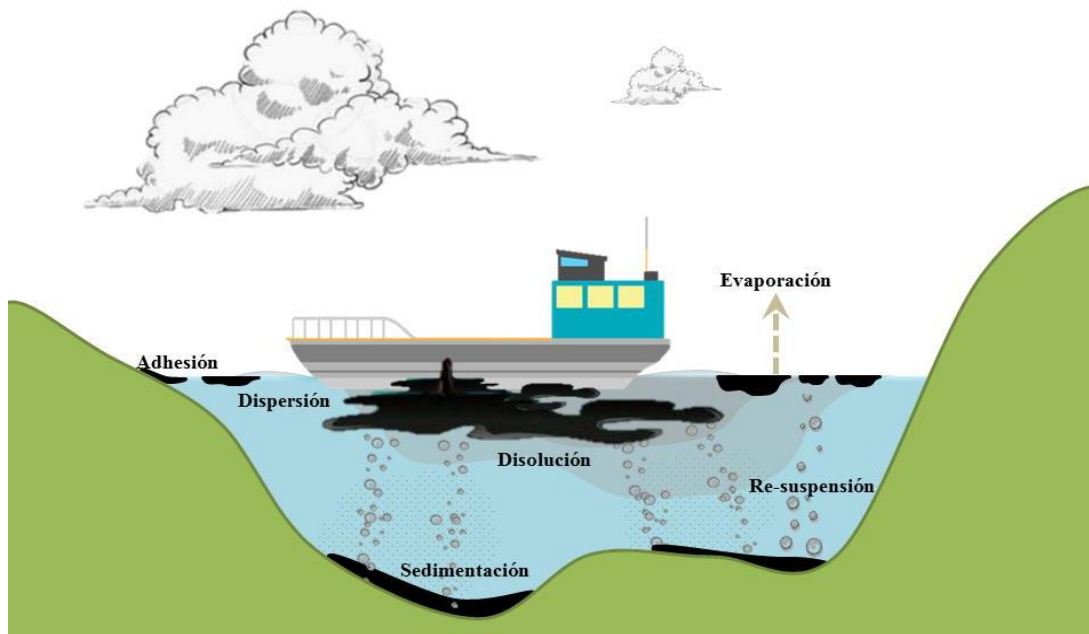


Figura 2-1. Comportamiento de derrames de hidrocarburos en ríos.

2.2.1. Advección. Es un proceso físico que implica el arrastre de la mancha de hidrocarburos, influenciado principalmente por la corriente del cuerpo de agua, el viento y el oleaje (Guo & Wang, 2009). Sobre la lámina de agua estaría influenciado por la velocidad superficial de la

corriente y el viento, mientras que en la columna de agua se considera influenciado solo por corrientes sub-superficiales (Yapa et al., 1994).

2.2.2. Dispersión mecánica. Involucra la propagación de la mancha en el agua. Se considera que potencializa procesos de evaporación, dilución y emulsificación; especialmente durante las etapas tempranas del derrame (Yapa et al., 1994). Según el trabajo realizado por Fay J.A. (Fay, 1971), cuyas fórmulas empíricas son consideradas “el estado del arte” para el modelado de derrames de hidrocarburos (Guo & Wang, 2009), la gravedad y la tensión superficial del agua promueven la difusión de la mancha, mientras que la inercia y viscosidad del producto derramado la retrasan (Giwa & Jimoh, 2010).

2.2.3. Adhesión a las orillas. La adhesión y permanencia de los hidrocarburos en la ribera depende de factores como las propiedades físico-químicas del producto derramado, las características físicas de las riberas, las corrientes del cuerpo de agua y el viento (Guo & Wang, 2009), (Gundlach, 1987), (Yapa et al., 1992).

2.2.4. Evaporación. Es un proceso que ocurre desde el momento mismo en que los hidrocarburos son liberados al medio ambiente, generando cambios en la masa y características físico-químicas del producto vertido (Guo & Wang, 2009). Depende del viento, temperatura ambiente, área de extensión de la mancha y tipo de hidrocarburo (Yapa et al., 1994).

2.2.5. Disolución. Algunas fracciones de los hidrocarburos más livianos, como el benceno, son moderadamente solubles en agua (Hospital, Henderson, Mazzocco, & St-amand, 2016). Dado que la evaporación de los hidrocarburos ocurre más rápido que la dilución, desde el punto de vista de la trayectoria de la mancha se considera un fenómeno poco relevante. Sin embargo, la toxicidad asociada a los compuestos solubles (especialmente los compuestos aromáticos) hace

que frecuentemente éste proceso sea incluido en el análisis de derrames de hidrocarburos en ríos (Yapa et al., 1994), (Yapa et al., 1992).

2.2.6. Mezcla vertical y resuspensión. La mezcla de hidrocarburos en ríos se encuentra influenciada principalmente por la turbulencia, la cual propicia el fraccionamiento de la mancha en “glóbulos”, los cuales se desplazan a través de la columna de agua. Algunos de estos glóbulos se precipitan y depositan en el lecho del río, mientras que otros flotan y resurgen a la superficie, influenciados ambos casos principalmente por las propiedades del producto derramado y la presencia de material suspendido en la columna de agua (Yapa et al., 1994).

2.3. Evaluación de vulnerabilidad.

El impacto de un derrame de hidrocarburos depende en gran medida del tiempo de permanencia de estas sustancias en el medio (Miranda & Restrepo, 2002) y las características de las áreas que se ven afectadas por este tipo de incidentes. Por tal motivo muchos gobiernos han desarrollado guías para la formulación de planes de contingencia, como herramienta estratégica para reducir, mitigar o prevenir los efectos socio-ambientales negativos de este tipo de incidentes (Yapa et al., 1994).

En Colombia, el artículo 3 del decreto nacional 1609 de 2002 define un plan de contingencias –PDC, como un “programa de tipo predictivo, preventivo y reactivo con una estructura estratégica, operativa e informática desarrollado por la empresa, industria o algún actor de la cadena del transporte, para el control de una emergencia que se produzca durante el manejo, transporte y almacenamiento de mercancías peligrosas, con el propósito de mitigar las consecuencias y reducir los riesgos de empeoramiento de la situación y acciones inapropiadas, así como para regresar a la normalidad con el mínimo de consecuencias negativas para la población

y el medio ambiente” (República de Colombia., 2002). Por su parte, el plan nacional contra derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas, PNC (Ministerio del Interior - República de Colombia, 1999), estipula que para definir la estrategia de respuesta en el evento de un derrame, es necesario conocer el comportamiento esperado del crudo, derivado o sustancia nociva; sin embargo, el país no cuenta con una guía oficial para su elaboración.

A nivel mundial, organismos como The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA (USA) (Petersen et al., 2002), The International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, IPIECA (The global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues -IPIECA, International Maritime Organization -IMO, & -OGP, 2011), y la Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y El Caribe, ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica - ARPEL, 1997), señalan la importancia de que mediante los planes de contingencia se identifiquen fuentes de derrame de hidrocarburos y los respectivos patrones de dispersión; así como las áreas que pueden verse más gravemente afectadas por la presencia de estas sustancias.

En la literatura se pueden identificar diferentes métodos para la evaluación por separado de sensibilidad y susceptibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos. Sin embargo, algunos autores referencian haber evidenciado en la práctica que una estrategia de mitigación efectiva de impactos de estos incidentes debe integrar estas dos herramientas de información, en lo que han denominado como análisis de vulnerabilidad (Silva et al., 2011), (Rocha-Oliveira, T.C.; Klein, A.H.F. ; Petermann, R. M.; Menezes, J.T. & Sperb, 2008), (Romero et al., 2011).

En este sentido, un estudio realizado por el Departamento de Ecología del Estado de Washington, en el que se modelaron varios escenarios de derrames de hidrocarburos en zonas

costeras y sectores de ríos donde se tenían Mapas de Sensibilidad Ambiental ante Derrames de Hidrocarburos –MSA’s, evidenció que teóricamente es posible esperar la remoción del 50-70% de los hidrocarburos derramados, si el equipo de respuesta tiene pleno conocimiento de la trayectoria de la pluma contaminante y los ecosistemas asociados más sensibles (French-McCay et al., 2005).

En Latinoamérica sobresalen los estudios desarrollados por Romero et al. (Romero et al., 2011) y Da Silva et al. (Silva et al., 2011) para la evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en zonas costeras de Brasil. En ambos casos, los autores evaluaron la sensibilidad de un área de estudio y aplicaron técnicas de modelado matemático de trayectoria de escenarios hipotéticos de derrames de hidrocarburos para el análisis de susceptibilidad. Sin embargo, mientras que Romero et. al proponen realizar el análisis de vulnerabilidad sobreponiendo las capas de información de sensibilidad y susceptibilidad, Da Silva et. al. proponen aplicar una matriz de integración de los dos parámetros para generar un índice de vulnerabilidad, tal como se ve en Figura 2-2 y Figura 2-3. A la fecha no se registran en la literatura trabajos específicos para análisis de vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos en ríos.

2.3.1. Evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos. En general, se define como sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos como el nivel de respuesta esperado de un ecosistema determinado, ante la presencia de este tipo de sustancias (Rocha-Oliveira, T.C.; Klein, A.H.F.; Petermann, R. M.; Menezes, J.T. & Sperb, 2008). Para llevar a cabo dicha evaluación sobresale, por su difusión y aceptación a nivel mundial, el método The Environmental Sensitivity Index -ESI, desarrollado por Gundlach y Hayes a finales de la década de los 70 (Gundlach & Hayes, 1978). A través de esta técnica los ecosistemas de costa son

clasificados de en una escala 1 a 10 (menor a mayor sensibilidad), teniendo en cuenta principalmente sus características físicas (S. I. Araújo, Silva, Muehe, & Pereira, 2002).

Generalmente, la sensibilidad atribuida a una zona mediante el método ESI se presenta a través de Mapas de Sensibilidad Ambiental –MSA´s, en los que se presenta además información puntual de la ubicación de recursos biológicos, socio-económicos y culturales (The global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues -IPIECA et al., 2011), tal como se muestra en la Figura 2-4 (a).

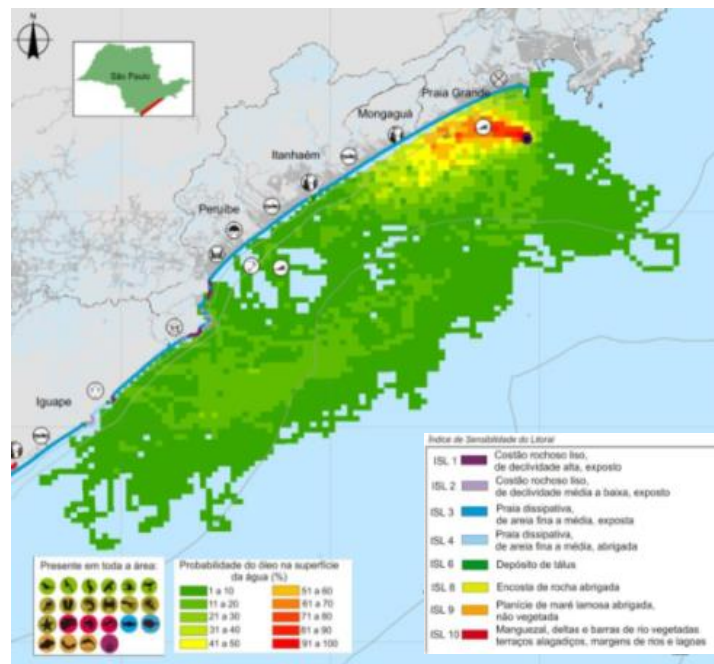
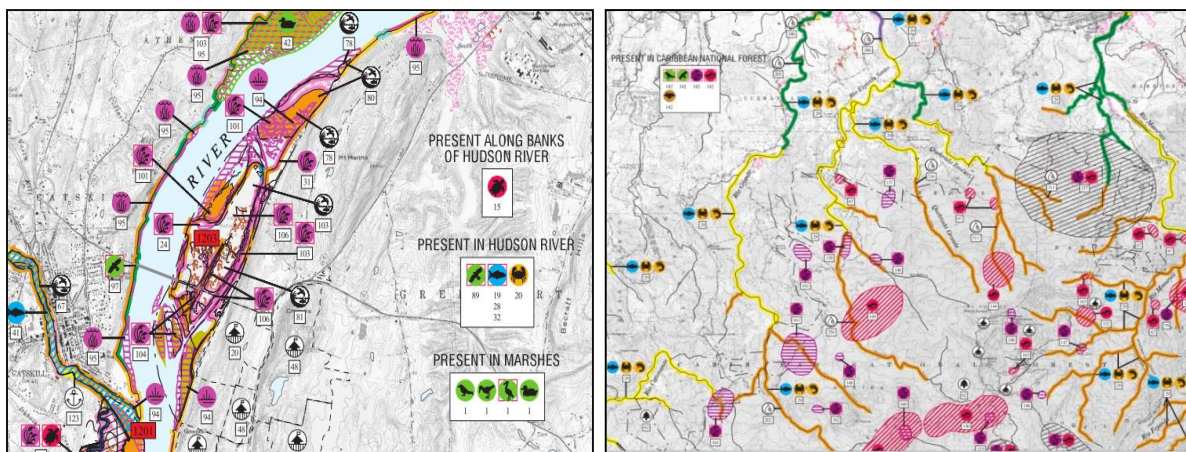


Figura 2-2. Análisis de vulnerabilidad propuesto por Romero et. al., 2009.



Figura 2-3. Análisis de vulnerabilidad propuesto por Da Silva et. al., 2011.

Dado que el método ESI fue adaptado para grandes ríos, éste no necesariamente satisface los requerimientos de información para respuesta ante derrames de hidrocarburos en pequeños ríos (Hayes, Michel, Montello, & Street, 1997). Por tal motivo, The US Environmental Protection Agency -USEPA, en asociación con NOAA, desarrollaron en los años 90 el método The Reach Sensitivity Index -RSI (Environmental Protection Agency -USEPA, 1994), aplicable a ríos pequeños y riachuelos (Hayes et al., 1997), tal como se muestra en la Figura 2-4 (b).



(a) ESI Río Hudson. NOAA. 2006.

(b) RSI Ríos Puerto Rico. NOAA, 2004.

Figura 2-4. ESI y RSI, NOAA.

En la actualidad, los métodos ESI y RSI siguen siendo implementados por la NOAA en la generación de Atlas Regionales de Sensibilidad Ambiental ante Derrames de Hidrocarburos (RPI -Louisiana, 2005), (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 200AD).

El método ESI ha sido adoptado y adaptado por entidades como IPIECA (The global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues -IPIECA et al., 2011), ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica -ARPEL, 1997), Petróleo Brasileiro S.A. -PETROBRAS (Araujo, Silva, & Muehe, 2001) y el ministerio de Ambiente de Brasil (Ministerio de Medio Ambiente-Brasil, 2002), para la construcción de Mapas de Sensibilidad ante Derrames de Hidrocarburos en Ambientes Marino-costeros. Además del ESI fluvial de NOAA, son escasos los reportes de métodos específicos para ríos. En Latinoamérica el mayor referente es la adaptación del ESI fluvial realizada por PETROBRAS para el río Amazonas (Solange Irene de Araújo & Santos, 2006). En Colombia, ECOPETROL realizó la adaptación del mismo método para ecosistemas marino-costeros (Gil-Agudelo, Nieto-Bernal, Ibarra-Mojica, Guevara-Vargas, & Gundlach, 2015) y se encuentra realizando el proceso para ecosistemas de grandes ríos.

2.3.2. Evaluación de susceptibilidad. Da Silva et. al. (Silva et al., 2011) definen *susceptibilidad* ambiental ante derrames de hidrocarburos, como la tendencia o probabilidad que una zona sea afectada por un incidente de este tipo. Dicha probabilidad generalmente es evaluada a través de simulación de escenarios de derrames, en los que se analiza la trayectoria esperada de los hidrocarburos derramados en el agua, a través de modelos matemáticos (Romero, 2009).

En la literatura se registran muchos y variados softwares libres y comerciales (2D y 3D), con los que es posible generar modelos estocásticos y determinísticos; teniendo en cuenta

mecanismos de advección, dispersión, difusión, evaporación, dilución, mezcla horizontal y vertical y adhesión de los hidrocarburos a las riberas, entre otros (Wu, 2010), (Yapa et al., 1994), (Yapa et al., 1992), (Hibbs, Chen, Gulliver, & Voller, 1997), (French & Rines, 1997), (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2002), (Per S. Daling et al., 2014).

3. Metodología.

El proyecto se llevó a cabo mediante la ejecución de 3 fases generales, a través de las cuales se seleccionaron metodologías para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad (Fase I), se planteó una metodología para evaluación de vulnerabilidad en ríos (Fase II) y se aplicó la metodología desarrollada para ríos en un caso de estudio (Fase III).

Desde el inicio y durante la ejecución del proyecto se llevó a cabo revisión de literatura científica, manuales, guías y normatividad legal vigente en Colombia y el mundo; relacionadas con temáticas como formulación de planes de contingencia ante derrames de hidrocarburos y herramientas para análisis de derrames de hidrocarburos en ambientes marino-costeros y fluviales; así como metodologías para evaluación de sensibilidad, susceptibilidad y vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos propiamente dicha.

A continuación, se describen las actividades ejecutadas por fase.

3.1. Fase I. Selección de métodos y/o metodologías para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad, aplicable a ríos.

A través de la revisión de literatura científica en bases de datos académicas, se indagó respecto a los métodos para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad más ampliamente reconocidos y aplicados en el mundo, así como los softwares disponibles para modelado matemático de comportamiento de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.

En la selección del método para evaluación de sensibilidad se tuvieron en cuenta aquellos que incluyeran el análisis información del medio físico y biológico; así como consideraciones de tipo socio-económico y cultural, según lo recomendado en las guías de entidades como NOAA, IPIECA, ARPEL, PETROBRAS y la legislación ambiental vigente, de orden nacional e internacional.

En cuanto a la selección de la metodología o el software para análisis de susceptibilidad, se tuvieron en cuenta aquellos que incluyeran en el análisis procesos de advección, dispersión, difusión, evaporación, disolución, mezcla horizontal y vertical, y adhesión de los hidrocarburos a las riberas, tal como lo recomiendan autores como Wu et. al., 2007 (Wu, 2010); Yapa et. al., 1994 (Yapa et al., 1994); French y Rines, 1997 (French & Rines, 1997); y Zapata et. al., 2002 (Zapata et al., 2002); entre otros.

3.2. Fase II. Planteamiento de metodología para evaluación de vulnerabilidad en ríos.

Dado que no se registran antecedentes de metodologías específicas para la evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos, se tomó como punto de partida la identificación y comparación de criterios de valoración de los métodos planteados por autores como Da Silva et. al. (Silva et al., 2011) y Romero et. al. (Romero et al., 2011), para ambientes marino-costeros; así como el análisis de ventajas y desventajas de las mismas.

Dado que la evaluación de vulnerabilidad integra resultados del análisis de sensibilidad y susceptibilidad, se procedió además a analizar la compatibilidad de formatos de salida de resultados de los métodos, metodologías y software seleccionados en la fase I, con base en lo cual se estableció una estrategia técnicamente viable para la integración de los mismos.

Con base en lo anterior, se propuso una metodología para la evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos, realizando las adaptaciones pertinentes para integrar el análisis de sensibilidad y susceptibilidad según lo planteado por los autores de referencia.

3.3. Fase III. Aplicación en un caso de estudio de la metodología planteada para evaluación de vulnerabilidad.

En esta fase se llevó a cabo aplicación de la metodología planteada en la Fase II para evaluación de vulnerabilidad en ríos, tomando como caso de estudio escenarios hipotético de derrames de hidrocarburos en un sector del río Magdalena.

Durante el proceso, en primera instancia se delimitó un sector de estudio del río Magdalena, teniendo en cuenta la disponibilidad de información como cartografía del medio físico, batimetrías, caudales, recursos biológicos y socioeconómicos; así como la existencia de potenciales fuentes de derrame de hidrocarburos.

Puesto que la evaluación de vulnerabilidad incluye los resultados de las evaluaciones de sensibilidad y susceptibilidad, primero se procedió a realizar dichos análisis por separado y posteriormente se realizó su integración la según lo establecido en la metodología propuesta en la fase II, tal como se describe a continuación.

3.3.1. Evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos. Teniendo en cuenta los requerimientos del método seleccionado para este fin en la Fase I del proyecto, se adelantó gestión para obtener la información base requerida a través de entidades públicas nacionales y regionales como La Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la

Magdalena –CORMAGDALENA y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y el Instituto Humboldt, entre otros.

La información obtenida fue analizada y editada mediante el uso de softwares como AutoCad y ArcGis para su uso en el análisis de sensibilidad del sector del río Magdalena seleccionado como caso de estudio.

3.3.2. Evaluación de susceptibilidad. Se propusieron escenarios hipotéticos de derrame de derrames de hidrocarburos en el sector de estudio del río Magdalena, en condiciones normales del río y durante periodos de inundación. Dichos escenarios fueron establecidos de acuerdo a los tipos de productos usualmente transportados a través de río y estadísticas de derrames de hidrocarburos en el Río Magdalena, de acuerdo a información proporcionada por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales -ANLA.

Dado que los modelos de trayectoria de derrames se ejecutan tomando como base las corrientes presentes en el cuerpo de agua afectado, se procedió a elaborar en primera instancia un modelo hidrodinámico del sector del río objeto de estudio. Para esto se usó el código de licencia libre DELFT 3D, el cual permite generar un modelo hidrodinámico en 3 dimensiones, a partir de datos como la batimetría y caudal del río (Gerritsen et al., 2007).

Con el modelo hidrodinámico y datos del escenario de derrame proyectado se procedió a generar los modelos probabilístico de desplazamiento y degradación de la mancha de hidrocarburos, haciendo uso del software seleccionado para tal fin en la fase I del proyecto. Se contó en el desarrollo de esta actividad con la amplia experiencia la Dra. Ágata Fernandes (codirectora del proyecto) y personal técnico-profesional de TetraTech (Brasil y Canadá).

3.3.4. Evaluación de vulnerabilidad. A partir de los resultados de la evaluación de sensibilidad y la evaluación de susceptibilidad (en el que se incluye el modelado de desplazamiento y degradación de la mancha de hidrocarburos), se llevó a cabo la evaluación de vulnerabilidad del sector del río Magdalena objeto de estudio, aplicando la metodología desarrollada para este fin, en la Fase II del proyecto.

La **Figura 3-1** resume de manera general las fases y actividades ejecutadas en el desarrollo del proyecto.

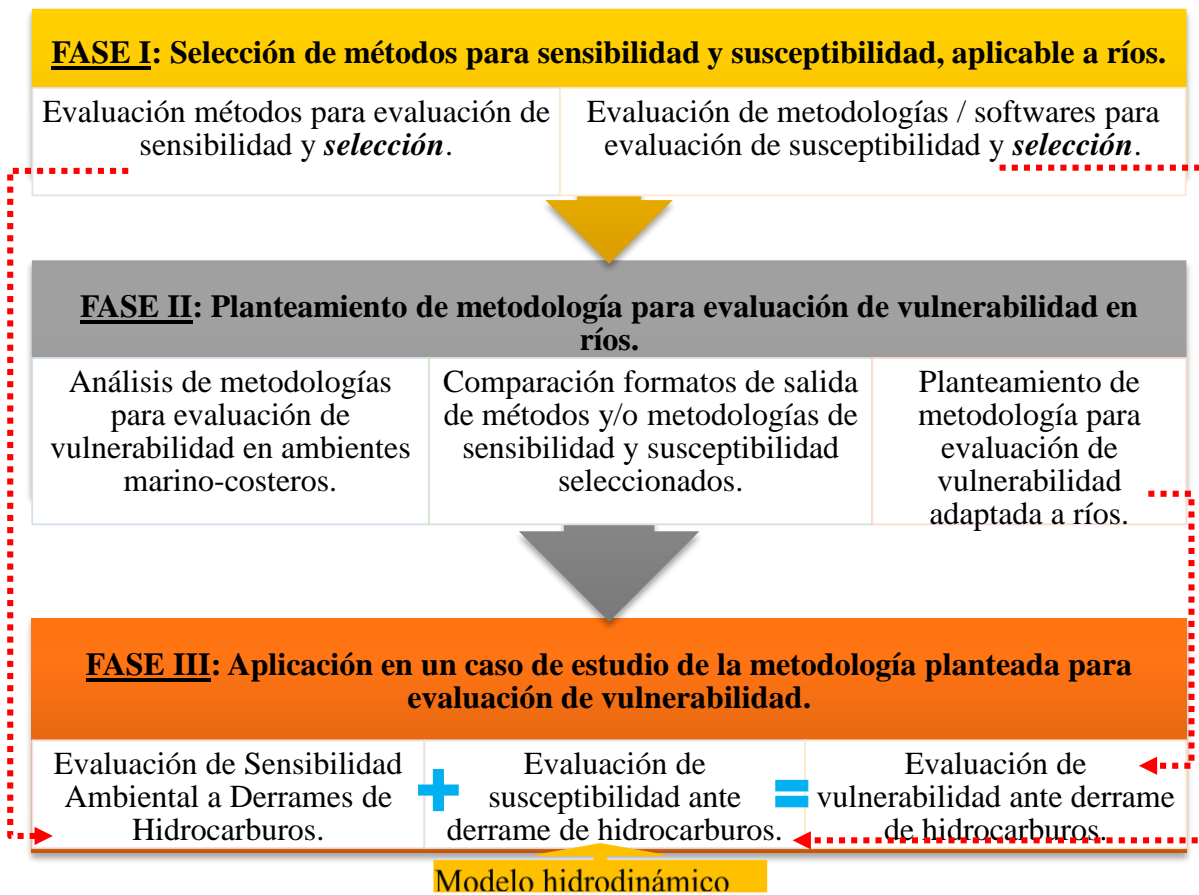


Figura 3-1. Metodología de ejecución del proyecto.

4. Resultados y análisis.

4.1. Fase I. Métodos y/o metodologías seleccionadas para evaluación de sensibilidad y susceptibilidad, aplicables a ríos.

4.1.1. Environmental Sensitivity Index, ESI-NOAA, para evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos. Como resultado de la revisión de literatura científica y documentos técnicos (artículos científicos, guías, documentos técnicos y casos de estudio), se recopilaron alrededor de 200 documentos con referencias a la aplicación del método ESI-NOAA para la evaluación de sensibilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en grandes ríos. En general, el método NOAA establece una escala de 1 a 10 (menor a mayor sensibilidad) de acuerdo al nivel de impacto esperado en los ecosistemas de ribera, teniendo en cuenta sus características físicas y la presencia relacionada de recursos biológicos (ver **Figura 4-1**).

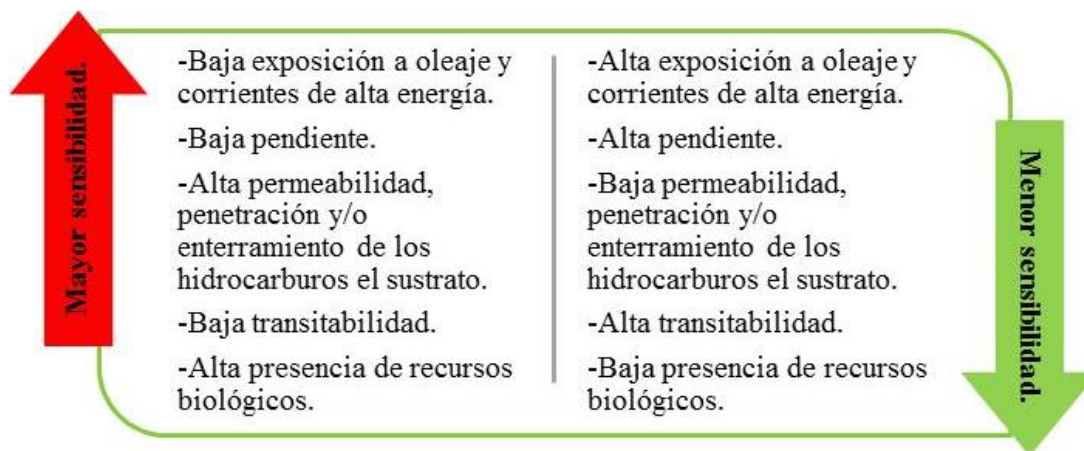


Figura 4-1. Características del medio para evaluación de sensibilidad.

En Latinoamérica se tiene como referente principal la adaptación del método ESI, a las condiciones del Río Amazonas (*Amazon Riverine Sensitivity*) desarrollado por PETROBRAS en el año 2006 (Solange Irene de Araújo & Santos, 2006), ver Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Comparación ESI-NOAA (fluvial) y Amazon Riverine Sensitivity (PETROBRAS).

	ESI-NOAA	AMAZON RIVERINE SENSITIVITY
1	Sustratos verticales impermeables expuestos*.	Estructuras hechas por el hombre.
2	Sustratos impermeables expuestos, no verticales.	Superficies planas rocosas
3	Substrato semi permeable, bajo potencial de penetración y enterramiento de hidrocarburos; infauna presente pero usualmente no abundante.	Rapidos / cascadas.
4	Permeabilidad media, potencial moderado de penetración y enterramiento de petróleo; infauna presente pero usualmente no abundante.	Escarpas / bancos altos en sedimentos no consolidados.
5	Permeabilidad media a alta, alto potencial de penetración y enterramiento de petróleo; infauna presente pero usualmente no abundante.	Playas expuestas y barras de arena / grava.
6	Alta permeabilidad, alto potencial de penetración de hidrocarburos y enterramiento.	Playas protegidas y barras de arena / grava.
7	Substrato plano expuesto, permeable; infauna generalmente abundante.	Playas y barras lodosas expuestas.
8	Substrato duro impermeable protegido; epibiota generalmente abundante.	Playas y barras lodosas protegidas.
9	Substrato protegido, plano, semipermeable, suave; infauna generalmente abundante.	Zonas de confluencia de ríos y lagos.
10	Humedales con vegetación emergente.	Bancos de macrófitas acuáticas. Humedales con vegetación emergente.

Al tratarse de una adaptación, el índice establecido para el Río Amazonas tiene en cuenta los mismos principios de análisis establecidos por la NOAA para ESI.

En Colombia no se cuenta actualmente con un método para evaluación de sensibilidad específica para derrames de hidrocarburos en ríos. Sin embargo durante la adaptación del método ESI para ambientes marino-costeros adelantado por el Instituto Colombiano del Petróleo de 2013 a 2015 (Gil-Agudelo et al., 2015), se evidenció la aprobación de algunos sectores interesados del país (expertos en manejo de derrames de hidrocarburos, entidades gubernamentales y academia) respecto a las características que rigen el nivel de sensibilidad de un ecosistema, según lo planteado por la NOAA.

Dado lo anterior, se seleccionó como método para análisis de sensibilidad ante derrames de hidrocarburos en ríos en método ESI-NOAA. Se consideró que a pesar de que la adaptación realizada para el río Amazonas implica un gran avance en el análisis de la sensibilidad de ríos de Latinoamérica, el Amazon Riverine Sensitivity podría presentar características muy específicas de este cuerpo de agua y limitar su aplicabilidad en otros ambientes fluviales.

4.1.2. SPILLCALC, modelo de trayectoria y degradación de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos. SPILLCALC fue seleccionado para el análisis de trayectoria y degradación de derrames en ríos. El modelo, desarrollado por Tetra Tech, ha sido usado principalmente en Norteamérica para el diseño de planes de contingencia, avalados por las autoridades pertinentes. SPILLCALC se encuentra codificado en Fortran. Los resultados son entregados en código binario y formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange), los cuales pueden ser procesados en Fortran y Matlab.

Para el análisis del comportamiento del derrame, el modelo comprende un módulo de trayectoria y un módulo de degradación. SPILLCALC asume los hidrocarburos derramados como una nube de partículas flotantes “slicklets”, a las cuales se atribuyen ubicación y características iniciales. La evaluación del comportamiento de la nube de partículas luego de ser vertidas en el agua, incluye:

- Advección (trayectoria), con base en las corrientes superficiales obtenidas a partir de un modelo hidrodinámico
- Influencia del viento, usando información de estaciones meteorológicas
- Difusión turbulenta (Eddy diffusion), simulada con el método Montecarlo con componentes de velocidad aleatoria
- Retención en las márgenes del cuerpo de agua
- Propiedades de los hidrocarburos, mediante pseudo-componentes
- Degradación

4.1.2.1. Diámetro inicial del derrame. Inicialmente el modelo establece el área de influencia de la mancha de hidrocarburos, calculando su diámetro. Si la velocidad de la corriente es baja (cuerpos de agua lenticos), el diámetro inicial del derrame es calculado en función del volumen vertido y un espesor teórico de 2 cm (Ecuación 1). Si la velocidad de la corriente es considerable (ríos), el diámetro es calculado en función del caudal de vertimiento de los hidrocarburos en el agua y la velocidad de la corriente (Ecuación 2).

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi t}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$D = \frac{Q}{U_t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

“D” (diámetro)

“V” (volumen derramado)

“t” (tiempo)

“Q” (caudal de derrame)

“U” (velocidad del agua)

4.1.2.2. Propiedades iniciales de las partículas. En el momento del derrame, las partículas son localizadas en una posición aleatoria dentro del radio inicial de la mancha calculado por el modelo (D/2). Para cada partícula el modelo atribuye características iniciales como:

- Ubicación (latitud, longitud)
- Estado (no derramada / en el agua / en tierra)
- Volumen (cantidad representada por cada partícula)
- Edad (tiempo transcurrido desde el derrame)
- Bola de alquitrán (formada o no)
- Densidad
- Profundidad
- Cantidad evaporada
- Volumen dispersado
- Seudo componentes (grupos de especies químicas con propiedades similares)

4.1.2.3. Cálculo de velocidad y posición de las partículas. Dependiendo del tamaño de la malla (grid) establecida para el modelo y la velocidad de la corriente de agua (proveniente del modelo hidrodinámico), la posición de las partículas es actualizado cada delta de tiempo. La nueva posición de cada partícula depende de la velocidad con la que se desplaza, la cual es representada por un vector de velocidad (\vec{V}) que resulta de la suma de la velocidad de la corriente, la velocidad y dirección del viento y la difusión, tal como se muestra en la ecuación 3. En ausencia de viento y difusión, la velocidad de la partícula sería la misma de la corriente.

$$\vec{V}_{Partícula(oil)} = \vec{V}_{Corriente (Advección)} + \vec{V}_{Viento} + \vec{V}_{Difusión} \quad Ecuación 3$$

El efecto del viento es analizado como la fuerza que ejerce sobre la superficie de la mancha, la cual es asumida como una fracción (1% a 3%) de la velocidad del viento (Ecuación 4).

$$\vec{V}_{viento} = (\%) \times \vec{V}_{viento\ real} \quad \text{Ecuación 4}$$

Finalmente, la velocidad de difusión es establecida aleatoriamente para cada partícula, tal como se muestra en la Ecuación 5, donde RAND es un número aleatorio de -1 a 1, “D” es el coeficiente de difusión establecido para el modelo y “dt” es el delta de tiempo.

$$RAND \times \sqrt{6D/dt} \quad \text{Ecuación 5}$$

Aunque el uso de estos tres factores en el cálculo de velocidades de desplazamiento de derrames de hidrocarburos es común en softwares comerciales TetraTech verificó los resultados arrojados por SPILLCALC, mediante comparación con resultados analíticos de casos simples (corrientes estables y viento constante).

En cuanto a la nueva posición de cada partícula, esta es calculada teniendo en cuenta su ubicación anterior, el vector de velocidad calculado ($\vec{V}_{Particula(oil)}$) y el delta de tiempo (dt), tal como se muestra en la Ecuación 6.

$$\vec{X}_{nueva} = \vec{X}_{anterior} + \vec{V}_{Particula(oil)} \cdot dt \quad \text{Ecuación 6}$$

Antes de mover la partícula, el modelo establece si en el recorrido a su nueva ubicación esta entrará en contacto con un margen del río u otra estructura sobre la lámina de agua. De ser así la partícula mantiene su posición y todo su volumen o parte de él, es transferido al margen o estructura de contacto (dependiendo de la retención del material). Si el recorrido de la partícula no presenta este tipo de obstáculos, es movida a su nueva posición.

4.1.2.4. Degradación de los hidrocarburos. Simultaneo al análisis de transporte de partículas, SPILLCALC evalúa la degradación del volumen de hidrocarburos que estas representan, tal como se describe a continuación.

4.1.2.5. Evaporación. SPILLCALC considera en primera instancia el “flux” másico desde la superficie de la mancha., aplicando el mismo método usado por la NOAA en el modelo ADIOS2. Cada pseudo-componente es tratado como una sustancia individual con una presión de vapor asociada y fracción molar relativa; la evaporación total de la mancha es la suma de la evaporación de cada pseudo-componente. La evaporación volumétrica en este modelo se establece según se expone en la Ecuación 7.

El volumen molar relativo, “ v ”, se calcula tratando cada pseudo-componentes como si fuera una colección de alcanos, para los cuales se dispone de una correlación empírica del volumen molar a su punto de ebullición. La presión de vapor “ P_v ” se basa en la ecuación de Antoine’s. (Lehr, Jones, Evans, Simecek-Beatty, & Overstreet, 2002).

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_j \propto \frac{U^{7/9} V (P_v v f_m)_j}{d} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

“ j ” (pseudo-componentes)

“ P_v ” (presión de vapor)

“ U ” (velocidad del viento)

“ v ” (volumen molar relativo)

“ f_m ” (variación de fracción molar en el tiempo)

“ d ” (espesor de la mancha)

“ V ” (volumen derramado)

Sin embargo, SPILLCALC incluye además la evaluación de la difusión molecular vertical a través del espesor de la mancha, la cual es responsable de transportar las fracciones de hidrocarburos más ligeras hacia la superficie de evaporación. En general se considera que la evaporación desde la superficie es considerablemente más rápida que la difusión interna, por lo que sería este último el proceso de control de la evaporación total.

4.1.2.6. Dispersión vertical y resuspensión. La turbulencia conduce pequeñas gotas de hidrocarburos hacia el interior de la columna de agua. El proceso de dispersión vertical es implementado en SPILLCALC mediante las ecuaciones desarrolladas por Delvigne and Sweeney en 1988 (citado por Guo & Wang, 2009) y Tkalich and Chan (Tkalich & Chan, 2002), asumiendo en ambos casos el diámetro de los glóbulos de hidrocarburos como constantes durante las simulaciones.

Según Tkalich and Chan (2002), en un proceso de dispersión natural, la tasa traslado de gotas de hidrocarburos hacia la columna de agua estaría dada según se muestra en la Ecuación 8

$$\lambda_{ow} = \frac{k_e \omega \gamma H}{16 \alpha L_{ow}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

“ λ_{ow} ” (tasa de enterramiento)	“ H ” (altura significativa de oleaje)
“ k_e ” (coeficiente experimentalmente, 0.3-0.5)	obtenido “ α ” (coeficiente de profundidad de mezcla de las partículas)
“ ω ” (frecuencia de oleaje)	“ L_{ow} ” (Parámetro de longitud-escala vertical)
“ γ ” (coeficiente de amortiguación)	

Con base en resultados experimentales obtenidos por Delvigne and Sweeney en 1988, la profundidad de enterramiento es asumida como:

$$Z_H = (1.5 + 0.35 * [R]_{-1}^1) H \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

“ $[R]_{-1}^1$ ” (número aleatorio de distribución uniforme en el Intervalo -1 a 1)

4.1.2.7. Retención de hidrocarburos en las riberas. Dependiendo de su estructura física y composición, cada segmento homogéneo de ribera puede retener un volumen específico de hidrocarburos. SPILLCALC evalúa la retención en las orillas con base en índices establecidos por Harper en 2013 (John R. Harper, 2013), el cual se basa en información recopilada por British Columbia and Washington State (Tabla 4-2).

4.1.2.8. Interacción con sedimentos. La formación de agregados de hidrocarburos-sedimentos en ríos es usualmente mayor que en ambientes marinos. SPILLCALC usa para este análisis la aproximación propuesta por Payne et. al. (Payne et al., 1987), en la que relaciona la formación de agregados con la velocidad de adherencia del aceite, la concentración de gotas de aceite, la concentración de sedimentos y la energía de disipación (ver Ecuación 10)

Tabla 4-2. Retención de hidrocarburos en riberas de acuerdo al tipo de material.

Descripción	Volumen hidrocarburos retenidos (l/m ²)
Roca	5
Cantos rodados	6
Arena o lodo	15
Rip Rap	35
Manglares	13
Madera	11
Arena y cantos rodados	8

Fuente: Adaptado de Harper, 2013.

SPILLCALC evalúa la energía de disipación en cada celda de cálculo; cuando la turbulencia es suficiente para generar la entrada de gotas de hidrocarburos en la columna de agua la probabilidad de unión de estas con las partículas de sedimentos aumenta.

$$Q_{sed} = k_a \sqrt{\frac{D_e f_{bw}}{H_{rms} \rho_w \nu_w}} C_0 C_{sed} \tag{Ecuación 10}$$

Donde:

- “ k_a ” (factor de adhesión, depende del tipo de material)
- “ D_e ” (Energía de disipación de olas)
- “ f_{bw} ” (fracción de olas por periodo, por unidad de tiempo)
- “ ρ_w ” (densidad del agua, kg/m³)
- “ H_{rms} ” (raíz cuadrada de la altura promedio de olas)
- “ ν_w ” (Viscosidad cinemática)
- “ C_0 ” (volumen de hidrocarburos en la columna de agua)
- “ C_{sed} ” (concentración de sedimentos)

4.1.2.9. Dilución. El potencial de disolución de algunos hidrocarburo livianos como el benceno, se encuentra en función de la solubilidad de la sustancia en estado puro, su fracción molar en el producto derramado y en el receptor (la superficie del agua), así como su coeficiente de transferencia de masa. SPILLCALC calcula la disolución de acuerdo a lo establecido por (Mackay & Leinonen, 1977) citado por (Lynch et al., 2014), tal como se ve en las ecuaciones .

$$[f_d] = A[K_d(S_e - C_w)]_j$$

$$S_e = SXE$$

Ecuación 11

Ecuación 12

Donde:

“ f_d ” (flux másico, moles/s)	“ S_e ” (solubilidad efectiva, moles/cm ³)
“ A ” (Área en el que el soluto se mueve)	“ X ” (fracción molar del componente j)
“ K_d ” (coeficiente de transferencia de masa, cm/s)	“ E ” (factor dependiente de solubilidad)
“ C_w ” (Concentración de soluto en la masa de agua)	“ S ” (solubilidad)

Cuando no se dispone de un coeficiente de transferencia específico para los componentes del producto derramado, el modelo usa el valor de $2,36 \cdot 10^{-6}$, propuesto por los mismos autores.

4.1.2.10. Sedimentación. SPILLCALC evalúa la densidad de cada partícula en cada delta de tiempo. Cuando la partícula adquiere mayor densidad que el agua, la partícula es transferida al lecho del cuerpo de agua.

4.1.2.11. Biodegradación. El modelo asume un proceso de desintegración bacteriana de primer orden, en el que la tasa de producto degradado es proporcional al volumen derramado y un coeficiente de degradación empírico de $1.0 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$.

La Figura 4-2 resume los módulos de SPILLCALC para la evaluación de trayectoria y degradación de derrames de hidrocarburos.

4.2. Fase II. Metodología para evaluación de vulnerabilidad en ríos.

La evaluación de vulnerabilidad comprende la integración de la valoración de sensibilidad y susceptibilidad (probabilidad). En la fase I del proyecto se seleccionó el método ESI (fluvial) para la evaluación de sensibilidad. Por otra parte, se estableció que SPILLCALC desarrollado por Tetra Tech permite el modelado numérico de la trayectoria y degradación de la mancha de hidrocarburos. Sin embargo, no se encontraron referencias para análisis de vulnerabilidad en ríos, por lo que se procedió a realizar una adaptación a partir de métodos aplicados en ambientes marino-costeros.

4.2.3. Adaptación de Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos (Environmental Vulnerability Index in Rivers, EVI-R). En Latinoamérica, los referentes más conocidos en cuanto al análisis de Vulnerabilidad (unión de sensibilidad y susceptibilidad) son los trabajos desarrollados por Romero y Da Silva. En el año 2013 los autores plantearon conjuntamente el “Index of Environmental Vulnerability to Oil (IEVO)” aplicable a ambientes marino-costeros (Romero A.F., Abessa D.M.S., Fontes R.F.C., 2013).

Para desarrollar el IEVO, inicialmente los autores establecieron un código de bajos a altos niveles de sensibilidad (ISL, Brasil) y probabilidad (Tabla 4-3). Con la integración de probabilidad y sensibilidad, se establecieron los niveles de IEVO en una escala de 1 a 5, tal como se muestra en la Tabla 4-4 y Tabla 4-5.

Tabla 4-3. Subclasificación sensibilidad y probabilidad, Romero et. al. 2013

ISL	Probabilidad (%)	Código	Descripción
1	1-10	-	Bajo
2	11-20		
3	21-30	+/-	Medio
4	31-40		
5	41-50	+	Alto
6	51-60		
7	61-70	++	Muy alto
8	71-80		
9	81-90		
10	91-100		

Tabla 4-4. Escala IEVO, Romero et. al. 2013.

Sensibilidad Vs Probabilidad	Vulnerabilidad	IEVO
(-)(-) ; (-)(+/-)	Bajo	2
(-)(+) ; (+/-)(+/-)	Medio	3
(+/-)(+) ; (+)(+) ; (+/-)(++) ; (-)(++)	Alto	4
(++)(++) ; (+)(++)	Muy alto	5

Sin embargo, The International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (IPIECA) sugiere una simplificación del Environmental Sensitivity Index, reagrupando el índice de 1 a 10 en 5 subclases de nivel bajo a alto (The global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues -IPIECA et al., 2011), tal como se muestra en la tabla (Tabla 4-6). Adicionalmente, Gil-Agudelo et. al. (2015) sugieren la similitud en el nivel de sensibilidad de ESI 1 y 2, 3 a 6, 7 y 8, 9 y 10.

Tabla 4-5. Matriz IEVO, Romero et. al. 2013.

ISL	Probabilidad (%)										
	0	1-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100
1	1	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4
2	1	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4
3	1	3	3	3	4	4	4	5	5	5	5
4	1	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5
5	1	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5
6	1	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5
7	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
8	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
9	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
10	1	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5

Tabla 4-6. ESI simplificado IPIECA.

ESI (1-10)	ESI simplificado (1-5)	Descripción
1	1	Muy bajo
2		
3	2	Bajo
4		
5		
6		
7	3	Medio
8	4	Alto
9	5	Muy alto
10		

Con base en el IEVO formulado por Romero et. al (2013), se propuso un Índice de Vulnerabilidad aplicable a ríos. Sin embargo, se realizaron modificaciones en la subclasificación

de sensibilidad y susceptibilidad (probabilidad), teniendo en cuenta la simplificación de ESI propuesta por IPIECA (2011) y el trabajo de adaptación de ESI para ambientes marino-costeros de Colombia desarrollada por Gil-Agudelo et. al. (2015), tal como se muestra en la **Tabla 4-7**.

Tabla 4-7. Subclasificación sensibilidad y probabilidad en ríos.

ESI	Probabilidad (%)	Código	Descripción
1	1-10	-	Bajo
2	11-20		
3	21-30		
4	31-40	+/-	Medio-bajo
5	41-50		
6	51-60	+	Medio -alto
7	61-70		
8	71-80		
9	81-90	++	Alto - Muy alto
10	91-100		

La combinatoria de sensibilidad y probabilidad fue establecida de acuerdo a lo sugerido por Romero et. el. (2013). Como resultado se obtuvo un nuevo Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos (Environmental Vulnerability Index in Rivers, EVI-R), tomando como base el ESI propuesto por NOAA para ambientes fluviales, tal como se muestra en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8. Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos, EVI-R

Environmental sensitivity Index ESI-NOAA, Ríos.		Probabilidad (%)											
		0-1	1-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	
		NA	(-)	(-)	(+/-)	(+/-)	(+/-)	(+)	(+)	(+)	(++)	(++)	
1	Sustratos verticales impermeables expuestos.	(-)	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
2	Sustratos impermeables expuestos, no verticales.	(-)	1	2	2	2	2	2	3	3	3	4	4
3	Substrato semi permeable, bajo potencial de penetración y enterramiento de hidrocarburos; infauna presente pero usualmente no abundante.	(+/-)	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4
4	Permeabilidad media, potencial moderado de penetración y enterramiento de petróleo; infauna presente pero usualmente no abundante.	(+/-)	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4
5	Permeabilidad media a alta, alto potencial de penetración y enterramiento de petróleo; infauna presente pero usualmente no abundante.	(+/-)	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4
6	Alta permeabilidad, alto potencial de penetración de hidrocarburos y enterramiento.	(+)	1	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
7	Substrato plano expuesto, permeable; infauna generalmente abundante.	(+)	1	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
8	Substrato duro impermeable protegido; epibiota generalmente abundante.	(+)	1	3	3	4	4	4	4	4	4	5	5
9	Substrato protegido, plano, semipermeable, suave; infauna generalmente abundante.	(++)	1	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
10	Humedales con vegetación emergente.	(++)	1	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5

La integración de evaluación de sensibilidad, susceptibilidad y vulnerabilidad se resume en la

Figura 4-3.

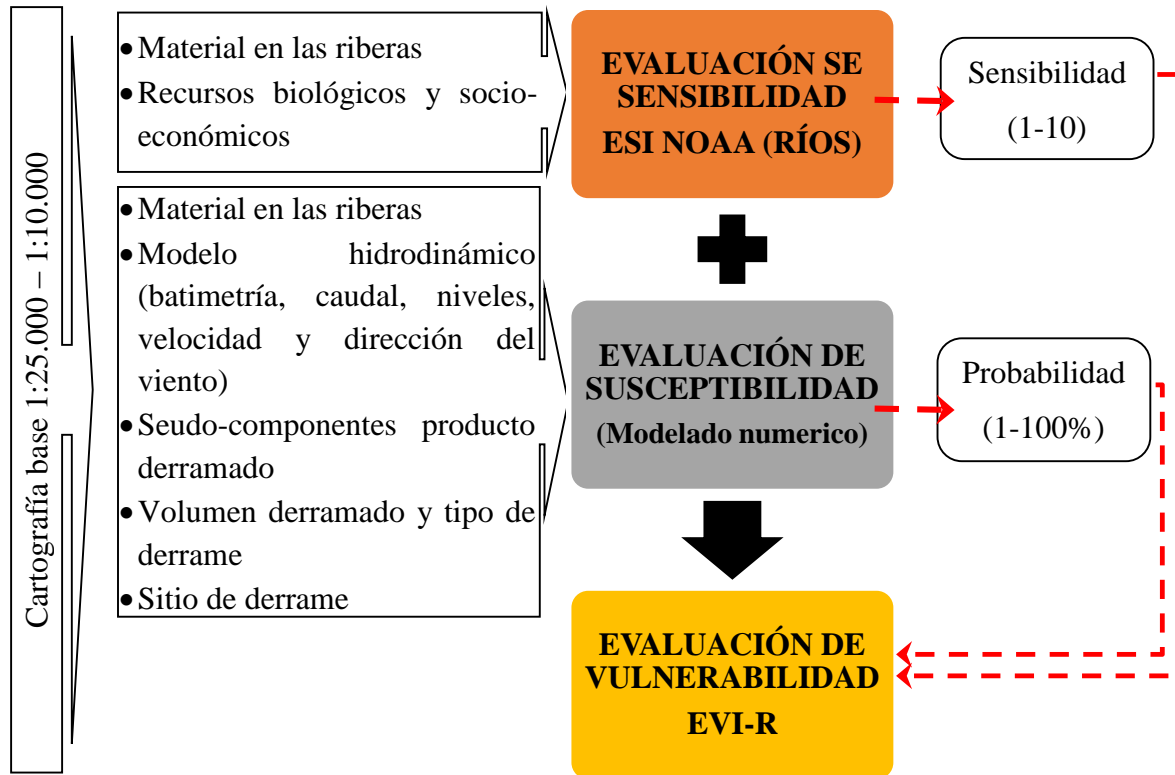


Figura 4-3. Propuesta metodológica para evaluación de derrames de hidrocarburos en ríos.

4.3. Fase III. Aplicación en un caso de estudio de la metodología planteada para evaluación de vulnerabilidad.

4.3.1. Área de estudio. El área de estudio seleccionada comprende aproximadamente 200 km del río Magdalena, en el sector comprendido entre Barrancabermeja (Santander) y La Gloria (Cesar). De acuerdo con información suministrada por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, entre el año 2004 y 2016 se presentaron en esta área alrededor de 30 incidentes de derrames de hidrocarburos.

4.3.2. Evaluación de sensibilidad. Para la evaluación de sensibilidad se recopiló cartografía base escala 1:25,000, información de las características de las riberas y área de inundación, provenientes de la Cartilla de Navegación del Río Magdalena, desarrollado por La Corporación

Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena –CORMAGDALENA y la Universidad Nacional de Colombia (Seccional Bogotá) en el año 2002. Con base en esta información y la escala ESI -NOAA para ríos, se estableció el nivel de sensibilidad las riberas normales de río, usando los softwares AutoCad y ArcGis.

Según la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra -Corine Land Cover (IDEAM, 2010), las áreas de inundación del río comprenden pastizales, vegetación alta, cultivos y cuerpos de agua dulce, por lo que se estableció un ESI con el nivel más alto (10), tal como se muestra en la Figura 4-4 y en los mapas consignados en el apéndice A.

La mayor parte de las riberas en condiciones normales del río corresponden a ESI 4 (55%), mientras que en condiciones de inundación corresponden a zonas de alta sensibilidad ESI 10 (86%), tal como se ve en el Gráfico 4-1.

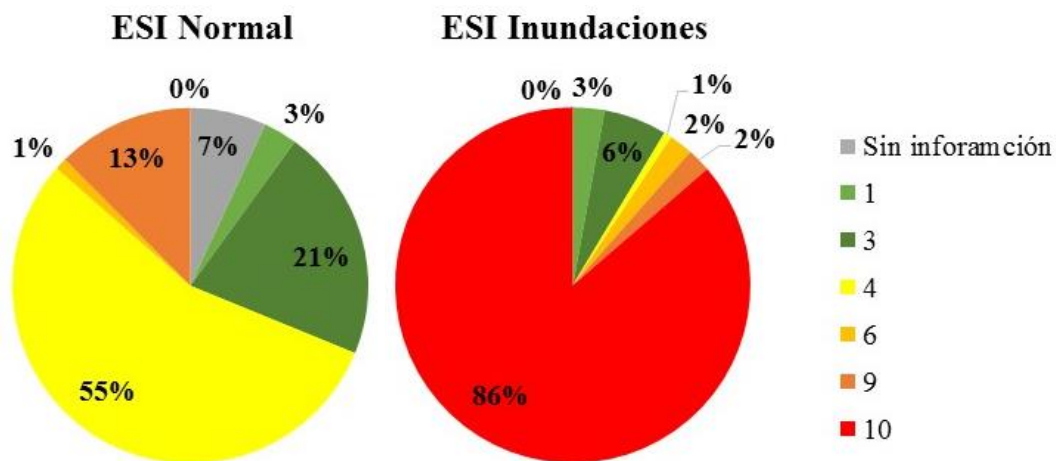


Gráfico 4-1. Distribución de sensibilidad periodo normal y de inundación.

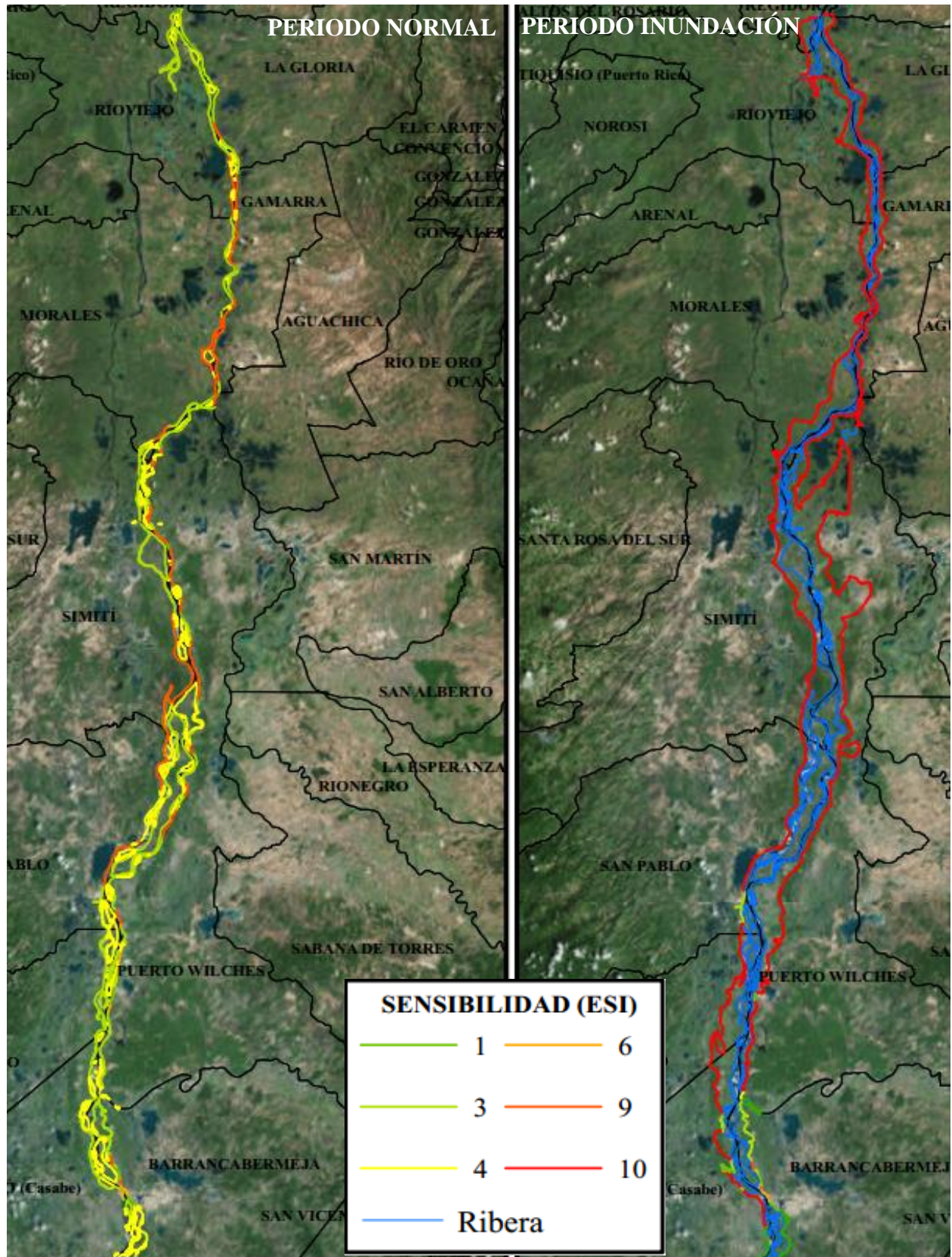


Figura 4-4. ESI en el sector de estudio, condiciones normales y de inundación.

4.3.3. Evaluación de susceptibilidad.

4.3.3.1. Modelo hidrodinámico. El modelo hidrodinámico fue elaborado con el software Delft3D-FLOW. La batimetría del sector de estudio, requerida para el modelo fue obtenida de la cartilla de navegación del río, referenciada anteriormente. La información de caudales, niveles de lámina de agua, velocidad y dirección del viento fue obtenida de estaciones meteorológicas e hidrológicas del Instituto de Estudios de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales de Colombia -IDEAM.

Aunque en el área de estudio fueron encontradas 23 estaciones del IDEAM, solo 2 de ellas (Maldonado cerca de Barracabermeja y El Contenido cerca de La Gloria) disponen de información histórica (superior a 20 años) de caudales y niveles del río. La información de velocidad y dirección del viento fue obtenida de la estación Aeropuerto Yariguíes ubicada en Barracabermeja.

El análisis histórico de la información de niveles y caudales (1979-2001) evidenció que el río responde al comportamiento bimodal climático del país, con un periodo de sequía (aprox. 2 meses) y un periodo de lluvias abundantes (aprox. 2 meses) con un periodo transitorio de aproximadamente 2 meses entre ellos. Este ciclo que se repite cada 6 meses tal como se muestra en la Gráfico 4-2.

Para el desarrollo del modelo se seleccionó el año 1999 como el más representativo de las condiciones del río, según resultados obtenidos de un análisis de error medio cuadrático de caudales y niveles mes a mes, en el periodo 1979 - 2001.

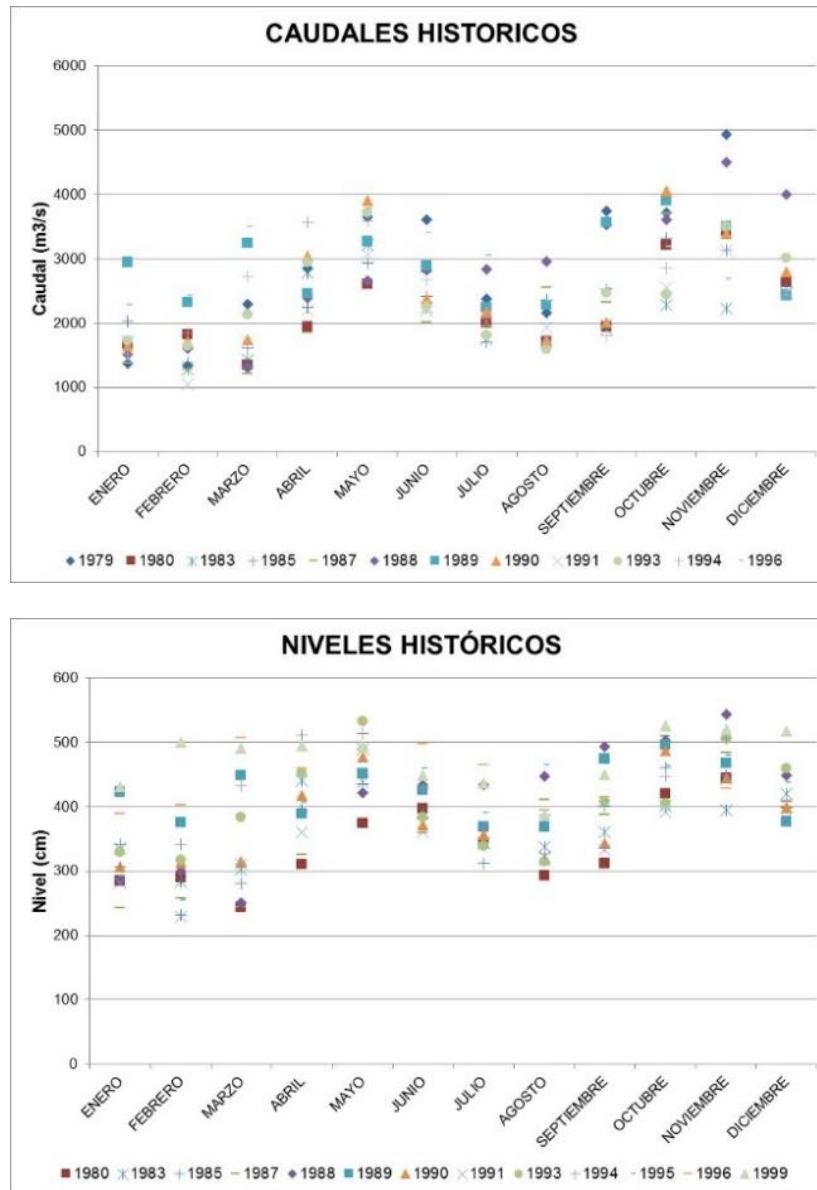


Gráfico 4-2. Caudales y niveles históricos del río Magdalena en el sector de estudio.

Finalmente, se establecieron dos modelos hidrodinámicos del sector de estudio. Uno para el periodo de caudales y niveles normales o transitorios (periodo de transición o normal, marzo – abril) y otro para periodo de caudales y niveles altos (periodo de inundaciones, mayo-junio). El periodo de sequía no fue incluido en el estudio puesto que no se contó con cartografía que describiera las márgenes del río en esta época. En la Figura 4-5 se muestran las velocidades de corriente obtenidas en un sector del área de estudio durante el mes de junio del año 1999.

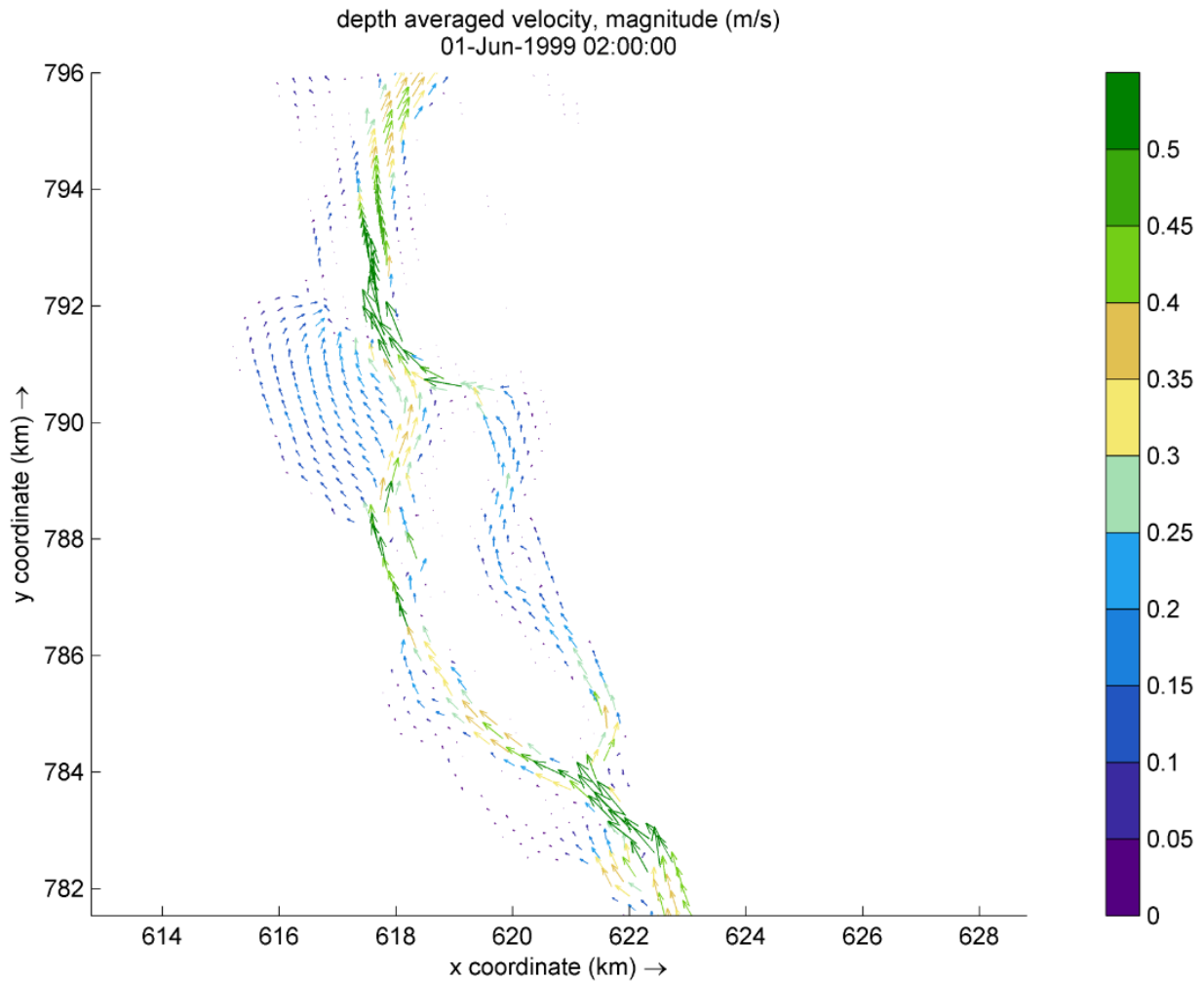


Figura 4-5. Velocidad de corriente en un sector de estudio del río Magdalena.

4.3.3.2. Modelo de trayectoria y degradación de un escenario de derrame. El modelo de trayectoria fue desarrollado con SPILLCALC. Inicialmente, se llevaron a cabo simulaciones separadas, en donde se varió de una a otra las condiciones del ambiente de acuerdo al periodo climático evaluado (normal o de inundaciones), tomando como base la información diaria obtenida de las estaciones del IDEAM. En total, fueron desarrolladas 61 simulaciones independientes por cada temporada, para un total de 122.

Finalmente, usando SPILLCALC se integraron los resultados de modelos individuales para obtener un modelo probabilístico de la posible extensión del derrame, la probabilidad de que el

derrame haga contacto con un área específica y el tiempo que le tomaría llegar a este sitio (primer contacto).

El tipo de producto vertido fue el mismo en todos los escenarios, sin embargo, para evaluar el comportamiento del derrame en función de la cantidad derramada se establecieron tres volúmenes referencia para descargas instantáneas pequeñas (1,5 m³ o 9.4 bbl), medias (8.5 m³ o 53.5 bbl) y mayores (200 m³ o 1258 bbl) de acuerdo a lo establecido en la RESOLUÇÃO CONAMA no 398 (Brasil, 2008).

4.3.3.3. Propiedades del producto derramando. Las características del producto derramado presentan gran influencia en el destino y degradación del derrame. Para el estudio fue seleccionado inicialmente el Crudo Magdalena⁵ (ECOPETROL S.A., n.d.). Para el desarrollo del modelo, SPILLCALC requiere información de la composición del producto derramado, de acuerdo a sus pseudo-componentes, los cuales son el agrupamiento de los componentes del producto derramado, en conjuntos con propiedades similares. Sin embargo, al no contar esta información específica, se seleccionó el Western Canadian Select Type Oil, como producto sustituto, teniendo en cuenta sus similitudes en cuanto a densidad y curvas de destilación.

El Western Canadian Select Type Oil presenta densidad relativa de 926.6 kg/m³ (15°C) y 17 pseudo-componentes (ver Tabla 4-9). Por cada pseudo-componente SPILLCALC relaciona peso molar, densidad, presión de vapor y solubilidad. La información requerida fue obtenida de la base de datos de Tetra Tech Canadá.

4.3.3.4. Mapas probabilísticos de diferentes escenarios de derrame. Con los resultados obtenidos se elaboraron mapas de los modelos probabilísticos de presencia de hidrocarburos en la lámina de agua y tiempo de primer contacto hidrocarburos-riberas.

⁵ Mezcla de algunas corrientes de crudo agrío producido en la cuenca del Magdalena Medio y el crudo de Castilla, producido en la cuenca de los Llanos Orientales.

Tabla 4-9. Seudocomponentes Western Canadian Select Type Oil.

Seudo- Componente	Volátiles	Benzene	TEX	Aromatics >C8-C10	Aromatics >C10-C12
Concentración (mg/kg)	58,800	1,100	3,760	3,000	7,700
Seudo- Componente	Aromatics >C12-C16	Aromatics >C16-C21	Aliphatics C6-C8	Aliphatics >C8-C10	Aliphatics >C10-C12
Concentración (mg/kg)	14,000	27,000	23,000	6,400	26,000
Seudo- Componente	Aliphatics >C12-C16	Aliphatics >C16-C21	Aliphatics >C21-C34	F4 (>C34-C50)	Resins
Concentración (mg/kg)	62,000	72,000	110,000	110,000	335,240

El análisis de resultados de derrames de hidrocarburos para la temporada normal evidenció que aún en el peor escenario de derrame (200 m³), el alcance de la mancha no superaría los 13 km aguas abajo del punto de derrame. La mayor probabilidad (superior al 50%) de presencia de hidrocarburos sobre la lámina estaría en los primeros 3.5, 4 y 13 km para un derrame pequeño, medio y mayor respectivamente (ver Figura 4-6).

Por otra parte, en el escenario de temporada de inundaciones se evidenció la probabilidad de presencia de hidrocarburos superior al 50% incluso 36 km aguas abajo del sitio del derrame, durante el derrame de mayor magnitud. En este mismo escenario un derrame medio tendría la probabilidad del 50% de presencia de hidrocarburos en los primeros 12 km y en los primeros 4,2

km para un derrame pequeño, tal como se ve en la Figura 4-6. Los mapas correspondientes se encuentran consignados en el apéndice B.

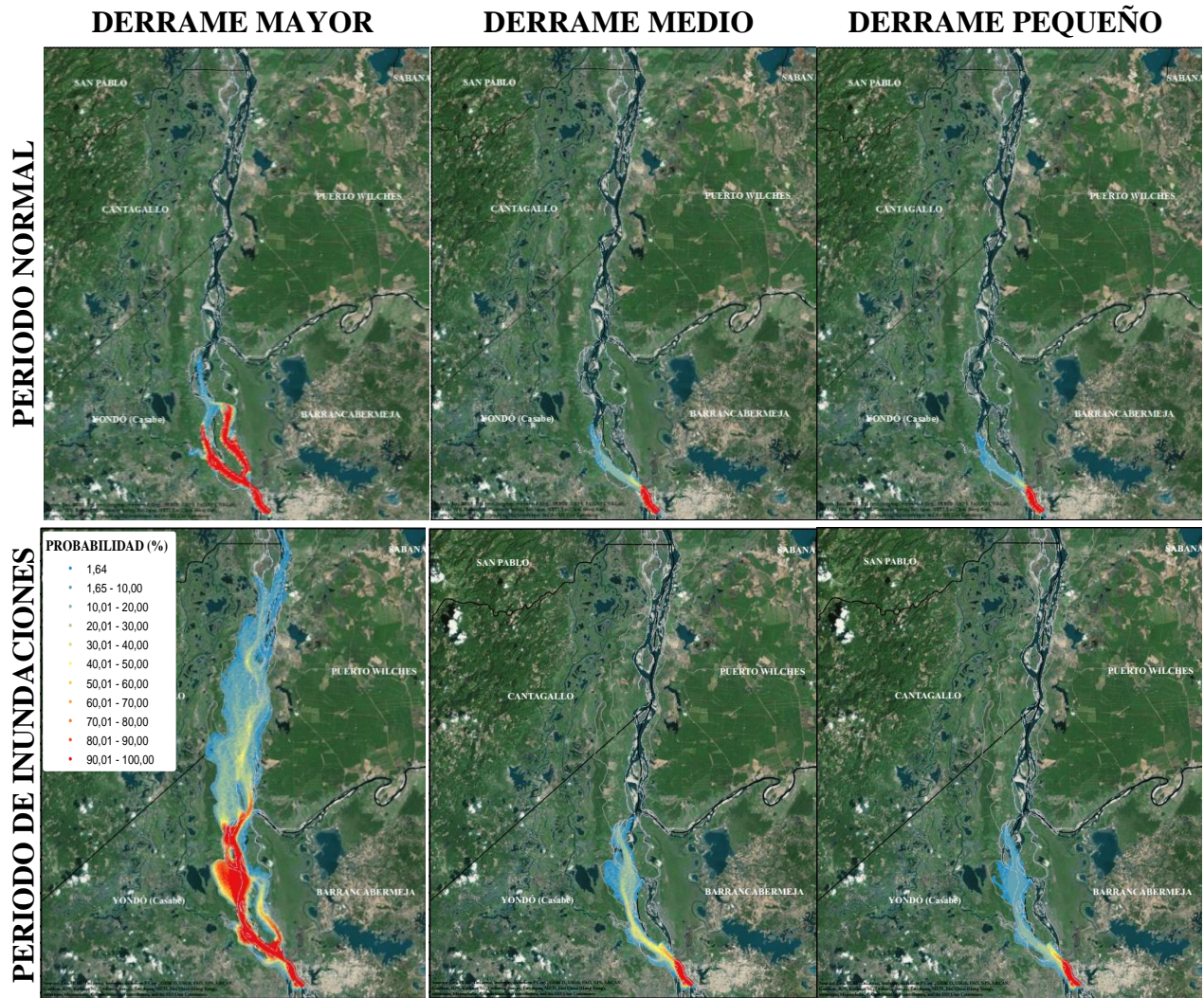


Figura 4-6. Resultados presencia de hidrocarburos en superficie de lámina de agua.

El balance de masas de los modelos evidenció que la mayor parte de hidrocarburos vertidos se adhieren en las riberas, independientemente del periodo climático, con retenciones superiores al 50 % en todos escenarios evaluados, tal como se muestra en la Tabla 4-10.

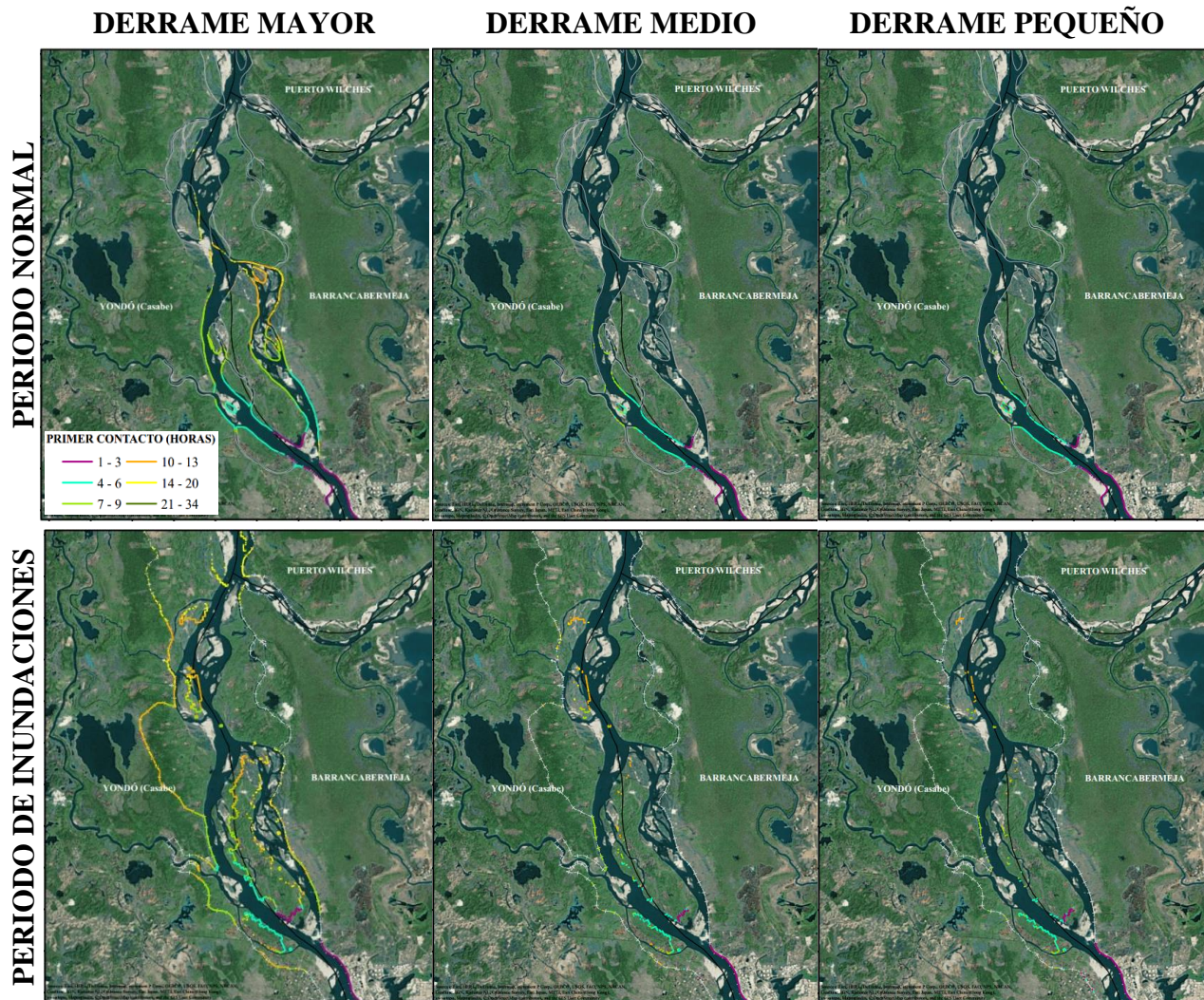


Figura 4-7. Resultados tiempo de primer contacto hidrocarburos – ribera.

La mayor retención hidrocarburos en las riberas fue reportada durante el periodo de inundaciones (hasta el 90%, derrame de 8,5 m³). Esto podría deberse a que en las áreas de inundación se estableció la predominancia de zonas con vegetación (pastizales, cultivos y zonas con vegetación alta), las cuales retienen más hidrocarburos que las laderas y playas de arena predominantes a lo largo del cauce normal del río.

Tabla 4-10. Resumen balance de masas modelos probabilísticos.

	Ítem	Normal		Inundación	
		m ³	%	m ³	%
200 m ³	Cantidad de hidrocarburos retenidos en las riberas	108,3	54	122,6	61
	Cantidad de hidrocarburos evaporados	79,0	40	68,4	34
	Cantidad de hidrocarburos disueltos y biodegradados	6,4	3	5,5	3
	Cantidad de hidrocarburos remanentes en el agua luego de 3 días	6,3	3	3,5	2
8,5 m ³	Cantidad de hidrocarburos retenidos en las riberas	7,5	89	7,6	90
	Cantidad de hidrocarburos evaporados	0,5	6	0,6	7
	Cantidad de hidrocarburos disueltos y biodegradados	0,3	3	0,3	3
	Cantidad de hidrocarburos remanentes en el agua luego de 3 días	0,2	2	0,0	0
1,5 m ³	Cantidad de hidrocarburos retenidos en las riberas	1,27	84	1,29	85
	Cantidad de hidrocarburos evaporados	0,08	5	0,08	5
	Cantidad de hidrocarburos disueltos y biodegradados	0,10	7	0,11	7
	Cantidad de hidrocarburos remanentes en el agua luego de 3 días	0,06	4	0,03	2

4.3.3.5. Susceptibilidad a presencia de hidrocarburos en las riberas. La susceptibilidad fue establecida para todos los escenarios de derrame teniendo en cuenta la probabilidad de que se encuentren hidrocarburos en las riberas. Los resultados de los modelos probabilísticos fueron agrupados por niveles de acuerdo a los rangos establecidos en la Tabla 4-7, tal como se muestra en la Figura 4-8. Los mapas de susceptibilidad se encuentran consignados en el apéndice D.

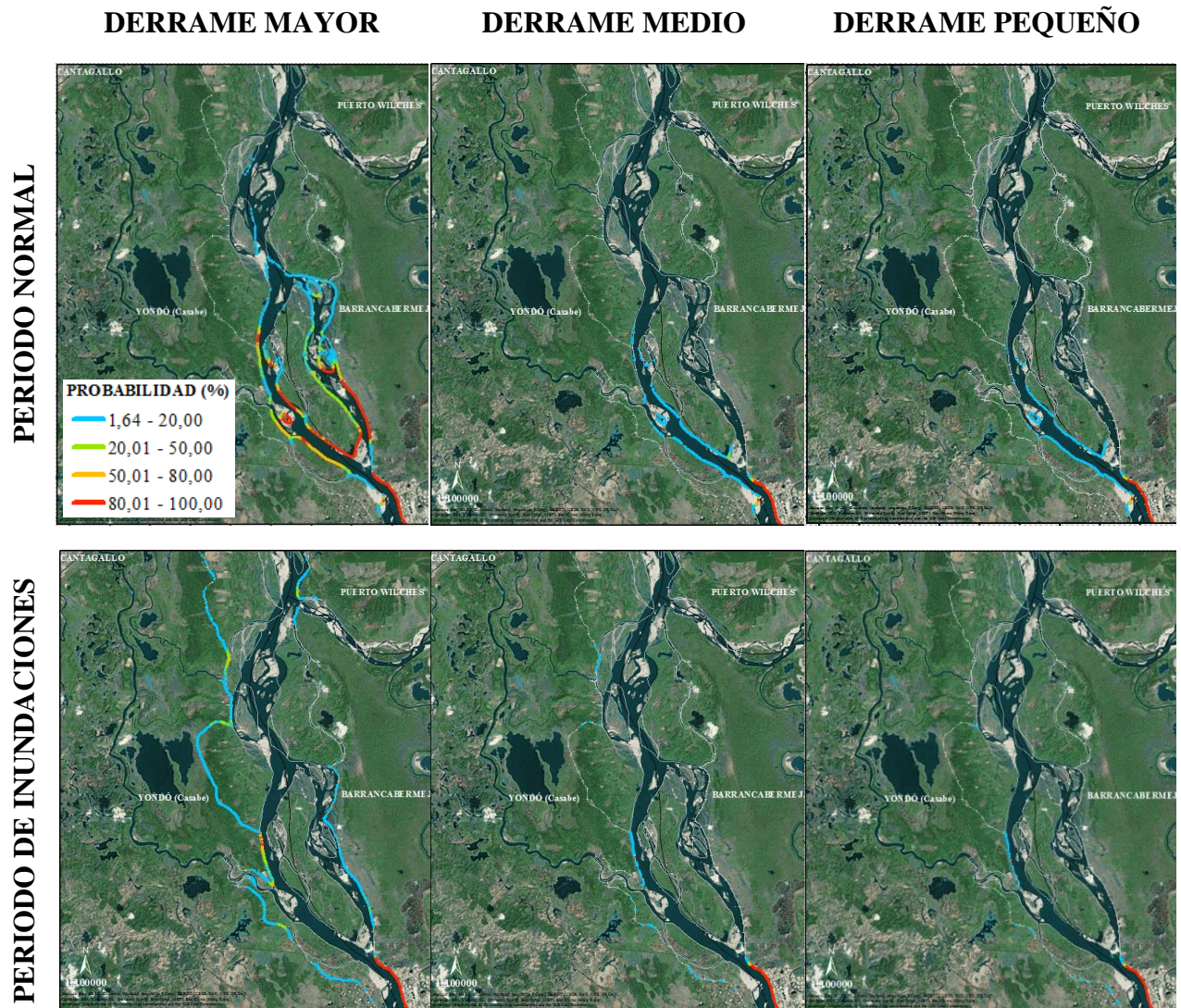


Figura 4-8. Probabilidad de presencia de hidrocarburos en la ribera.

Aunque los resultados muestran mayor probabilidad de presencia de hidrocarburos en las riberas de temporada de comportamiento normal del río, se debe tener en cuenta que en la temporada de inundaciones se presenta hasta el 90% de retención de los mismos en las áreas con vegetación anegadas, por lo que se reduce la probabilidad final de presencia de hidrocarburos al límite de la inundación (lo que SPILLCAL identifica como ribera). Estas áreas resultan de especial importancia puesto que como se mencionó antes, en ellas predominan área de cultivos y vegetación (ver Figura 4-9). En este sentido, los resultados sugieren la necesidad de realizar la

adaptación de un índice de sensibilidad para áreas de inundación que permita establecer polígonos con vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos. Puesto que no se cuentan con antecedentes de este tipo no información específica del tipo de material en las áreas de inundación del río Magdalena, esta adaptación no fue abordada en este trabajo.

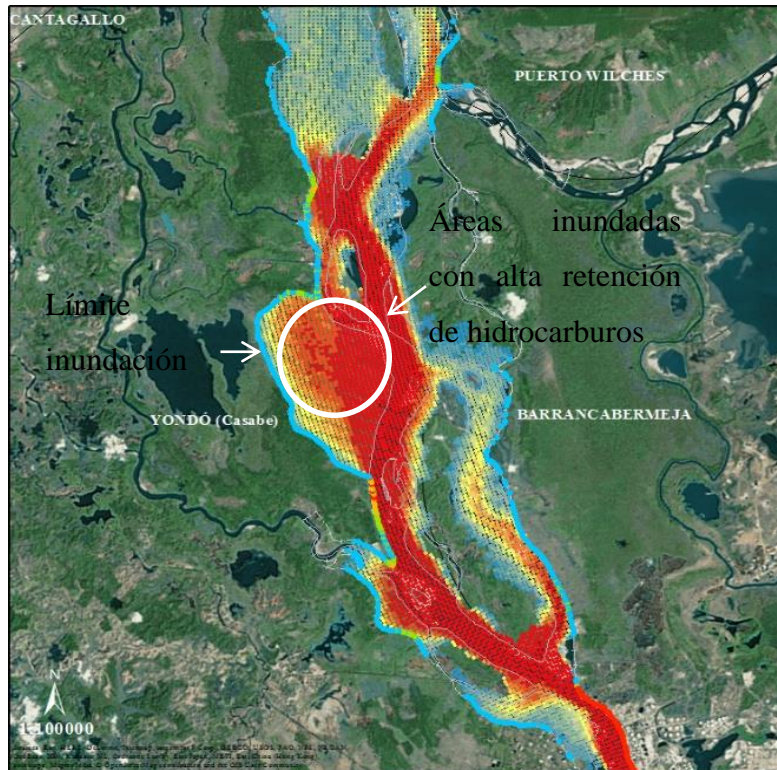


Figura 4-9. Áreas inundadas con alta retención de hidrocarburos

4.3.3.5. Evaluación de vulnerabilidad. Los mapas de vulnerabilidad para el sector de estudio fueron elaborados mediante la integración de resultados obtenidos de sensibilidad y la susceptibilidad en las riberas, implementando el Environmental Vulnerability Index in Rivers, EVI-R propuesto en la fase II de este proyecto (ver Figura 4-10). Los mapas de vulnerabilidad se encuentran consignados en el apéndice E.

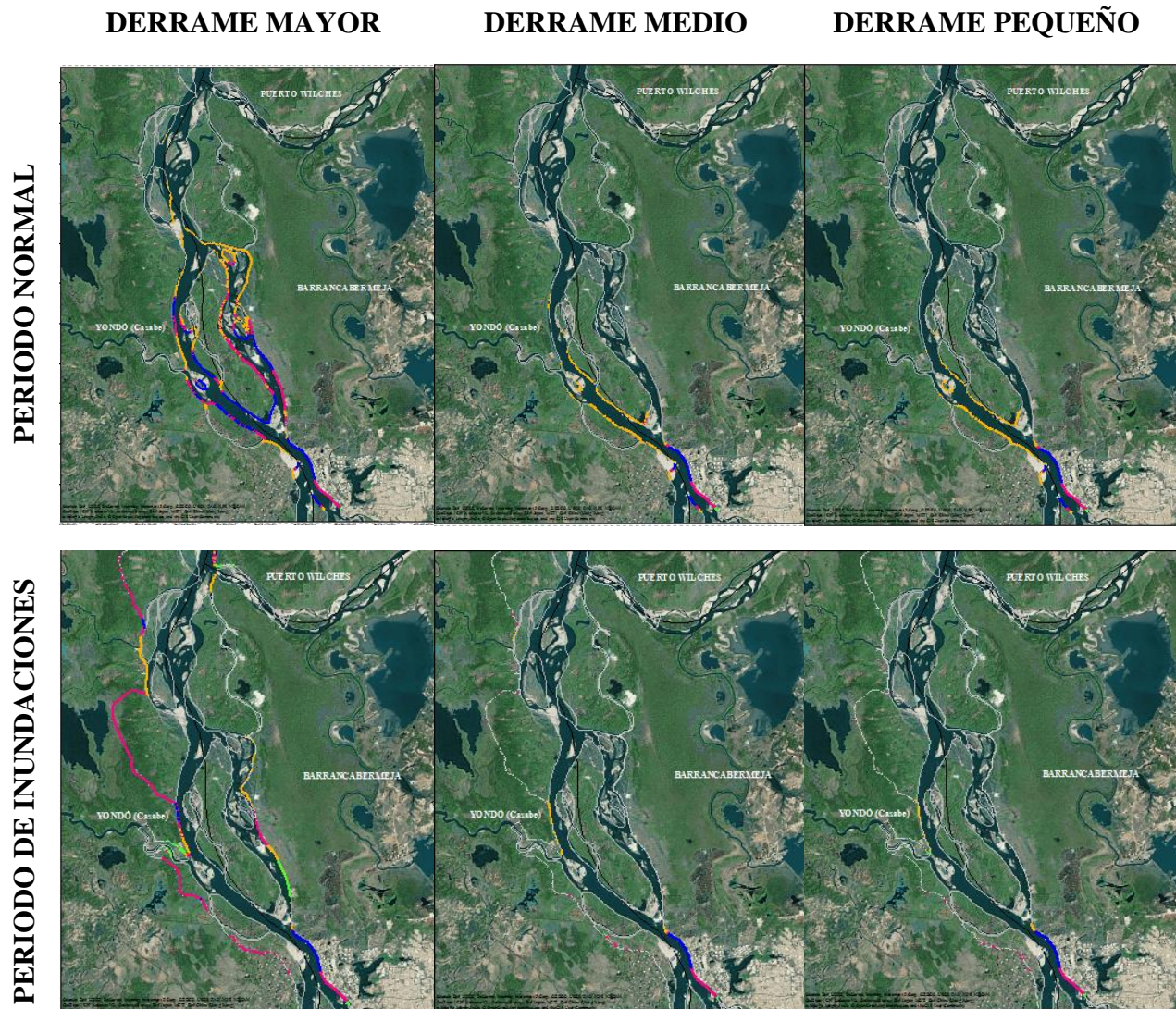


Figura 4-10. Vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos (riberas).

Nuevamente se evidencian más zonas de alta vulnerabilidad en las riberas bajo condiciones normales de niveles del río. Sin embargo, se deben tener en cuenta en la interpretación la presencia de zonas de inundación durante periodos de niveles altos del río, con alta retención de hidrocarburos y sensibilidad, que nos están categorizados en la metodología propuesta, tal como se mencionó anteriormente.

Sin embargo la aplicación del EVI-R establecer zonas prioritarias de atención ante derrames de hidrocarburos, reduciendo el área de impacto esperada del derrame de 200 km (considerados

inicialmente), hasta alrededor de 50 km aguas abajo del sitio de derrame, según el alcance máximo calculado para el peor escenario (200 m³, periodo de inundaciones), tal como se muestra en la Figura 4-11.

Durante la atención real de contingencias, la delimitación del área de impacto más probable podría implicar la reducción de efectos negativos socio-ambientales, puesto que se tendría la oportunidad de establecer sitios de retención o recuperación de hidrocarburos en áreas prioritarios, ya sea para controlar el avance del derrame o para la protección de zonas de alta sensibilidad ambiental o de importancia socio-económica.

Adicionalmente, el direccionamiento apropiado de los equipos de respuesta podría implicar beneficios financieros, no solo por el uso proporcional de recursos operativos (equipos y personal), sino por la reducción de la inversión posterior en la recuperación de áreas afectadas por el derrame y/ indemnizaciones a los afectados.

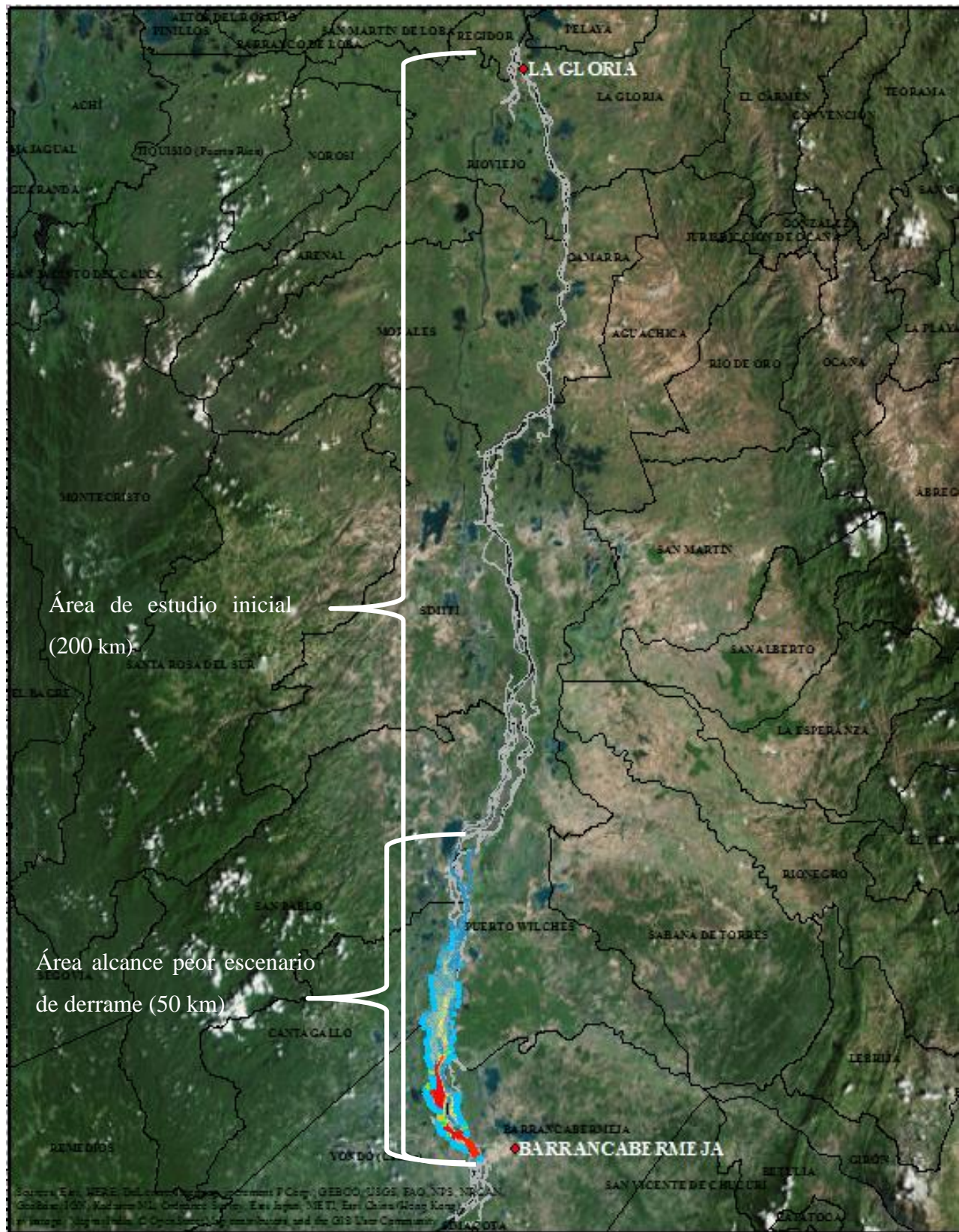


Figura 4-11. Reducción de área de influencia inicial.

5. Conclusiones.

En la actualidad no se conocen metodologías específicas para evaluación de vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos en ríos. El Índice de Vulnerabilidad Ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos (Environmental Vulnerability Index in Rivers, EVI-R) propuesto a través de este trabajo, sería el primer desarrollo de este tipo.

La metodología desarrollada para evaluación de vulnerabilidad en ríos (EIV-R) no se restringe al uso de un software específico para el modelado de trayectoria y degradación de derrames de hidrocarburos (SPILLCALC). Sin embargo, durante la selección de otra herramienta debe tenerse en cuenta que esta permita el análisis de trayectoria y degradación de derrames considerando procesos de advección, adhesión a las orillas, dispersión mecánica, evaporación, disolución y mezcla vertical.

La aplicación en un sector del río Magdalena de la metodología EVI-R, evidenció que el comportamiento y alcance de un derrame de hidrocarburos en estos ambientes varía en función de las condiciones ambientales. Por tanto, la evaluación de vulnerabilidad ante derrames de hidrocarburos en ríos debe comprender las diferentes épocas climáticas que se presentan en el área de estudio.

Según los resultados obtenidos para el río Magdalena, más del 50% de los hidrocarburos vertidos son retenidos en las riberas en cualquier época climática. La presencia de vegetación en las áreas de inundación del río podría ser responsable de la elevada retención de hidrocarburos en

las riberas durante este periodo climático periodos de altos niveles de los ríos (hasta 90% en el caso de estudio).

De acuerdo al caso de estudio, durante los periodos de inundación de los ríos la interpretación de resultados de la evaluación de vulnerabilidad no debe restringirse a la línea límite de inundación (asumido en el modelo como ribera), puesto que gran parte de estas sustancias son retenidas antes de llegar a este punto, ya sea por la vegetación presente en las áreas anegadas o porque se adhieren al suelo debido a la poca profundidad de las aguas. En este sentido, resulta necesario considerar la pertinencia de desarrollar índices de sensibilidad y vulnerabilidad específicos para las áreas de inundación.

La evaluación de vulnerabilidad permitió reducir entre un 75% y 95% la extensión del área de influencia probable inicialmente considerada para diferentes escenarios de derrames de hidrocarburos en el río Magdalena. En la atención de contingencias esto podría implicar reducción de impactos socio-ambientales, así como de costos por uso pertinente de recursos operativos en atención de la emergencia, indemnizaciones por afectación a terceros e inversión para recuperación ambiental de áreas afectadas.

6. Divulgación de resultados.

Participación en congresos internacionales:

- **Environmental sensitivity and vulnerability for oil spills in rivers (Review).** *Poster.* V CONGRESO DE EFICIENCIA Y GESTIÓN ENERGÉTICA. Febrero 3-5 de 2016, Cartagena.

Diana M. Ibarra-Mojica, Crisóstomo Barajas Ferreira, Viatcheslav Kafarov.

- **Effect of Oil Spills on Aquatic Ecosystems (Review).** *Poster.* XIV Congresso Brasileiro de **Ecotoxicologia** – ECOTOX 2016. Septiembre 7-10 de 2016.

Diana M. Ibarra-Mojica, Ágata Fernandes Romero, Crisóstomo Barajas Ferreira, Viatcheslav Kafarov.

- **Methodological proposal for evaluation of oil spills environmental vulnerability in rivers.** *Presentación oral,* INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE -IOSC17. Mayo 15-18 de 2017. Long Beach, CA.

Viatcheslav Kafarov, Crisóstomo Barajas Ferreira, Ágata Fernandes Romero, Crisóstomo Barajas-Solano, Diana M. Ibarra-Mojica.

- **Analysis of the Behaviour of Oil Spills in a Sector of the Magdalena River (Colombia).**

Presentación oral. 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING. Mayo 28-31 de 2017, Milan -Italia.

Viatcheslav Kafarov, Crisóstomo Barajas Ferreira, Ágata Fernandes Romero, Ana Carolina da Rocha Lammardo, Aurelien Hospital, Natalia LeonBarrios, Lara Conti Ansanelli, Diana M. Ibarra-Mojica.

Publicaciones en revistas científicas:

- **Kafarov V., Barajas Ferreira C., Fernandes Romero A., Da Rocha Lammardo A.C., Hospital A., Leonbarrios N., Ansanelli Conti L., Ibarra-Mojica D.M., 2017, Analysis of the behavior of oil spills in a sector of the magdalena river (colombia), Chemical Engineering Transactions, 57, 349-354 DOI: 10.3303/CET1757059**

Codirección tesis de pregrado y conformación de semillero de investigación:

A partir del desarrollo de este trabajo se ha iniciado una línea de investigación en el tema y se registró un semillero de investigaciones ante la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad. Actualmente se desarrollan 3 tesis de pregrado, a través de las cuales se está evaluando trayectoria y degradación de derrames de hidrocarburos en ríos, usando software de acceso libre de entidades como NOAA y US Army Corps of Engenners.

Referencias Bibliográficas

Araújo, S. I., Silva, G. H., Muehe, D. C. E. H., & Pereira, T. A. A. (2002). Adaptação do Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo da National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA às Feições Fluviais Amazônicas. *CT BIO*. 44p.

Araujo, S. I. de, Silva, G. H. da, & Muehe, D. C. E. H. (2001). Manual Básico para Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Sistema Petrobras. PETROBRAS.

Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica -ARPEL. (1997). Guidelines for the development of environmental sensitivity maps for oil spill planning and response.

de Araújo, S. I., & Santos, N. M. (2006). Mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. Petrobrás.

ECOPETROL S.A. (n.d.). *Especificaciones del crudo de Magdalena*. Retrieved from http://www.ecopetrol.com.co/documentos/upload/Especificaciones_Crudo_Magdalena_Medio.pdf

Environmental Protection Agency -USEPA. (1994). Sensitivity Mapping of Inland Areas: Technicka Support to the Inland Area Planning Committee Working Group. USEPA Region 5.

- Fay, J. A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. In *International Oil Spill Conference Proceedings* (Vol. 1971, pp. 463–467). American Petroleum Institute. Retrieved from <http://www.ioscproceedings.org/doi/pdf/10.7901/2169-3358-1971-1-463>
- French-McCay, D. P., Rowe, J. J., Whittier, N., Sankaranarayanan, S., Etkin, D. S., & Pilkey-Jarvis, L. (2005). Evaluation of the Consequences of Various Response Options Using Modeling of Fate, Effects and Nrd Costs of Oil Spills Into Washington Waters. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2005(1), 457–461. <http://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-457>
- French, D. P., & Rines, H. M. (1997). Validation and use of spill impact modeling for impact assessment. *International Oil Spill Conference*, 1997(1), 829–834. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1997-1-829>
- Gerritsen, H., de Goede, E. D., Platzek, F. W., Genseberger, M., van Kester, J. A. T. M., & Uittenbogaard, R. E. (2007). Validation Document Delft3D-FLOW: a software system for 3D flow simulations, 266.
- Gil-Agudelo, D. L., Nieto-Bernal, R.-A., Ibarra-Mojica, D.-M., Guevara-Vargas, A.-M., & Gundlach, E. (2015). Environmental Sensitivity Index for Oil Spills in Marine and Coastal Areas in Colombia. *CT&F - Ciencia, Tecnología Y Futuro*, 6, 17–28. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832015000100002
-

- Giwa, A., & Jimoh, A. (2010). Development of Models for the Spreading of Crude Oil. *Journalauedu*, 14(1), 66–71. Retrieved from http://www.journal.au.edu/au techno/2010/jul2010/journal141_article09.pdf
- Green, J., & Trett, M. W. (2012). The fate and effects of oil in freshwater. *Springer Science & Business Media*. http://doi.org/10.1163/_q3_SIM_00374
- Gundlach, E. R. (1987). Oil-holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters. *1987 International Oil Spill Conference*, 451–457. <http://doi.org/10.7901/2169-3358-1987-1-451>
- Gundlach, E. R., & Hayes, M. O. (1978). Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. *Marine Technology Society Journal*. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/255538772_Vulnerability_of_coastal_environments_to_oil_spill_impacts._Mar._Technol._Soc._J
- Guo, W. J., & Wang, Y. X. (2009). A numerical oil spill model based on a hybrid method. *Marine Pollution Bulletin*, 58(5), 726–734. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.12.015>
- Hayes, M. O., Michel, J., Montello, T. M., & Street, P. (1997). The Reach Sensitivity Index (RSI) for mapping rivers and streams. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1997(1), 343–350. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1997-1-343>
- Hibbs, D. E., Chen, Y.-F., Gulliver, J. S., & Voller, V. R. (1997). a Two-Phase Riverine Spill Model. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1997(1), 567–571. <http://doi.org/10.7901/2169-3358-1997-1-567>
-

Hospital, A., Henderson, J., Mazzocco, P., & St-amand, A. (2016). No Title, 35–57.

IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1: 100.000. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), and Corporación Aotónoma Regional del Magdalena (CORMAGDALENA), Bogotá, Colombia.

IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014. Estudio Nacional del Agua 2010*. Retrieved from <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>

John R. Harper. (2013). HARPER. Methods for Estimating Shoreline Oil Retention (Vol. 1).

Lehr, W., Jones, R., Evans, M., Simecek-Beatty, D., & Overstreet, R. (2002). Revisions of the ADIOS oil spill model. *Environmental Modelling & Software*, 17, 191–199. Retrieved from www.elsevier.com/locate/envsoft

Lynch, D. R., Greenberg, D. A., Bilgili, A., McGillicuddy, D. J., Manning, J. P., & Aretxabaleta, A. L. (2014). *Particles in the coastal ocean : theory and applications*. Cambridge University Press.

Mackay, D., & Leinonen, P. J. (1977). Mathematical model of the behavior of oil spills on water with natural and chemical dispersion.

Ministerio de Medio Ambiente-Brasil. (2002). Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo (Cartas SAO).

Ministerio del Interior -República de Colombia. (1999). Decreto 321 de 1999. Plan nacional contra derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas.

Miranda, D., & Restrepo, R. (2002). Los Derrames de Petroleo en Ecosistemas Tropicales, Un Atentado Contra el Futuro. *Innovation Y Ciencia*, X(1), 45–51.

Miranda, D., & Restrepo, R. (2005). Los derrames de petróleo en ecosistemas tropicales - Impactos, consecuencias y prevención. La experiencia de Colombia. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2005(1), 5. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-571>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (200AD). Sensitivity of Coastal and Inland Resources to Spilled Oil, Puerto Rico Atlas. *Hazardous Materials Response and Assessment Division*, NOAA. Retrieved from <http://response.restoration.noaa.gov/maps-and-spatial-data/download-esi-maps-and-gis-data.html>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2002). GNOME General NOAA Oil Modeling Environment User ' s Manual, 94. Retrieved from http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/GNOME_Manual.pdf

Payne, J. R., Kirstein, B. E., Clayton, J. R., Clary, C., Redding, R., McNabb, D., & Farmer, G. (1987). *Integration of Suspended Particulate Matter and Oil Transportation Study*.

Per S. Daling, Frode Leirvik, Inger Kjersti Almåsa, Brandvik, P. J., Hansen, B. H., Lewis, A., & Reed, M. (2014). Surface weathering and dispersibility of MC252 crude oil. *Marine Pollution Bulletin*, 87(1–2), 300–310. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.07.005>

Petersen, J., Michel, J., Zengel, S., White, M., Lord, C., & Plank, C. (2002). Environmental Sensitivity Index Guidelines. Version 3.0. *NOAA Technical Memorandum NOS OR&R, 11*, 1–192. Retrieved from http://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ESI_Guidelines.pdf

República de Colombia. (2002). Decreto 1609 de 2002.

Rocha-Oliveira, T.C.; Klein, A.H.F. ; Petermann, R. M.; Menezes, J.T. & Sperb, R. M. (2008). Determinação do índice de sensibilidade do litoral (ISL) ao derramamento de óleo , para região sudeste e sul do estado de Santa Catarina. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 2008, 12(2):91-114, 12(2), 91–114.

Romero, Á. F. (2009). *Mapa de vulnerabilidade ambiental ao óleo e cartas*. Universidade Estadual Paulista.

Romero, Á. F., Riedel, P. S., Carlos, J., Milanelli, C., & Carolina, A. (2011). Mapa de Vulnerabilidade Ambiental ao Óleo – Um estudo de caso na Bacia de Santos, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(3), 315–332. Retrieved from <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php?journal=rbc&page=article&op=view&path%5B%5D=383>

Romero A.F., Abessa D.M.S., Fontes R.F.C., S. G. H. (2013). Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: Case study for the Santos Basin region, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 74(1), 156–164. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.012>

RPI -Louisiana. (2005). Reach Sensitivity Index Classification of Louisiana Coastal Rivers : A Tool for Watershed Restoration Reach Sensitivity Index Classification of Louisiana Coastal Rivers : A Tool for Watershed Restoration. The Pontchartrain Restoration Program. Retrieved from http://archives.datapages.com/data/gcags/data/055/055001/854_gcags550854.htm

Silva, G. H. da, Lima, S. de O. F., Araújo, S. I., & Gomes, C. C. (2011). Mapeamento da Vulnerabilidade Ambiental a Derrames de Óleo em Ambientes Costeiros. *2ª Conferência Da REDE de Língua Portuguesa de Avaliação de Impactos 1º Congresso Brasileiro de Avaliação de Impacto*, 1–10. Retrieved from http://avaliacaodeimpacto.org.br/wp-content/uploads/2012/10/085_impact_petroleo.pdf

The global Oil and Gas Industry Association for Environmental and Social Issues -IPIECA, International Maritime Organization -IMO, & -OGP, I. A. of O. & G. P. (2011). *Sensitivity Mapping for oil spill response*. Retrieved from <http://www.ipieca.org/resources/good-practice/sensitivity-mapping-for-oil-spill-response/>

Tkalich, P., & Chan, E. S. (2002). Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. *Marine Pollution Bulletin*, 44(11), 1219–1229. [http://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00178-9](http://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00178-9)

Wu, W. (2010). *Computational River Dynamics*. (T. & F. Group, Ed.) Taylor & Francis Group. Taylor & Francis Group.

Yapa, P. D., Shen, H. T., & Angammana, K. S. (1994). Modeling oil spills in a river—lake system. *Journal of Marine Systems*, 4(6), 453–471. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1016/0924-7963\(94\)90021-3](http://dx.doi.org/10.1016/0924-7963(94)90021-3)

Yapa, P. D., Shen, H. T., Wang, D., & Angamma, K. (1992). An Integrated Computer Model for Simulating Oil Spills in the Upper St. Lawrence River. *Journal of Great Lakes Research*, 18(2), 340–351. [http://doi.org/10.1016/S0380-1330\(92\)71301-X](http://doi.org/10.1016/S0380-1330(92)71301-X)

Zapata, C. H., Calle, E. A., & Parra, L. F. (2002). Simulación del comportamiento fisicoquímico de derrames de hidrocarburos en ríos. *Avances En Recursos Hidráulicos*, 9. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/6085/>