

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DEL
ASERRÍN EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO PARA
CONTINGENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN
AMBIENTES ACUÁTICOS.**

**ALLISON FERNANDA CASTRO CARDOZO
JHON SEBASTIAN PINILLA PRADILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DEL
ASERRÍN EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO PARA
CONTINGENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN
AMBIENTES ACUÁTICOS.**

**ALLISON FERNANDA CASTRO CARDOZO
JHON SEBASTIAN PINILLA PRADILLA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:
Ingeniero de Petróleos e Ingeniera Química**

Director:

**Crisóstomo Barajas Ferreira
M.Sc. Ingeniería Química**

Codirector:

**Diana Marcela Ibarra Mojica
M.Sc. Ingeniería Química
Ingeniera Sanitaria y Ambiental**

Codirector:

**Crisóstomo Alberto Barajas Solano
M.Sc. Ingeniería de Sistemas e Informática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A mi mamá por enseñarme cada día a ser una guerrera, a no rendirme ante cualquier obstáculo y dar lo mejor de mí en todo momento. Por su amor y apoyo incondicional durante estos años.

A mi papá por su motivación, por ser un gran ejemplo en mi vida y por estar siempre ahí cuando más te necesito. Por su comprensión y amor.

A mis nonitos Olinda y Mario por sus oraciones, palabras de sabiduría y enseñanzas. Gracias por ser mis guías, ser unos guerreros y por el amor tan inmenso que me brindan.

A mi nonito Luis que desde el cielo me cuida y me protege. Sé que estas orgulloso y celebras este logro junto a mí.

A mis hermanos y primos que, con su amor, ternura, y alegría hacen que me esfuerce por ser un gran ejemplo para todos ellos.

A mis tías y tíos por ser ejemplos en mi vida y brindarme un amor de padres.

A mi compañero de proyecto y compañero de vida, por su gran amor y paciencia. Sé que es el primero de muchos logros juntos y siempre estaré a tu lado para apoyarte, amarte y luchar por nuestros sueños. Te amo inmensamente.

Allison

DEDICATORIA

A mis papas por siempre darme la fortaleza de seguir adelante, por apoyarme en cada decisión y cada momento de mi vida; y por todo el esfuerzo y amor que todos los días ponen para sacarnos adelante. Esté donde esté siempre estaré con ustedes. Gracias por ser los mejores padres del universo. Los amo mucho.

A mis hermanas quienes ven en mí un ejemplo para su vida, siempre podrán contar conmigo y sé que van a lograr todos sus sueños y metas.

A mis nonos Gilberto y Teresa quienes me aguantaron durante estos años de carrera. Gracias nona por preocuparte y estar siempre pendiente de mí; y gracias nono porque junto a mi papá son el mejor ejemplo de hombres que puedo tener de entrega a su familia, responsabilidad y rectitud. Sé que desde el cielo estarás orgulloso de mí.

A mi nona Belén por ser ejemplo de una mujer guerrera y luchadora.

A mi tía Claudia quien también estuvo pendiente de mí durante estos años.

A ti amor de mi vida por ser la mejor compañera de grado, gracias por ir a Minneapolis. Cada segundo junto a ti es maravilloso; espero este sea el primer logro de todos los que nos esperan juntos por la eternidad. Te amo inmensamente.

Sebastián

AGRADECIMIENTOS

A Dios por llenarnos de bendiciones, sabiduría e inteligencia para culminar con éxito esta etapa de nuestras vidas.

A nuestros padres quienes con su amor y paciencia nos formaron y nos guiaron durante todo este camino.

A nuestros familiares por su apoyo y compañía en el transcurso de esta etapa.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira y nuestros codirectores Diana Ibarra y Crisóstomo Barajas Solano por su gran dedicación y esfuerzo durante la realización del proyecto. Gracias por su paciencia y enseñanzas para nuestra vida profesional.

A Diana por acompañarnos durante todo este tiempo, por su apoyo incondicional y su entrega. Gracias por acogernos como hijos y guiarnos a lo largo de este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	18
1.1. COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN CUERPOS DE AGUA	18
1.2. Métodos convencionales para control y respuesta a derrames	20
1.2.1. Métodos mecánicos..	20
1.2.2. Métodos físicos.	20
1.2.3. Métodos químicos.	21
1.2.4. Métodos biológicos.	21
1.3. Manejo de derrames de hidrocarburos según sus características	21
1.4. Materiales adsorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos	22
2. OBJETIVO GENERAL	24
2.1. Objetivos específicos	24
3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	25
3.1. Procedimiento experimental.....	25
3.1.1. Prueba en condiciones dinámicas.	25
3.1.2. Pruebas de adsorción de hidrocarburo de corta (15min) y larga duración (24h)	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
4.1. Análisis de panorama nacional de derrames de hidrocarburos.....	28
4.1.1. Número de casos.....	28
4.1.2. Volumen.....	28
4.1.3. Productos con mayor incidencia en derrames de hidrocarburos.....	30

4.1.4. Costos de atención a derrames de hidrocarburos	31
4.1.5. Causas de derrames de hidrocarburos en el país.	31
4.1.6. Etapa del proceso.	33
4.1.7. Recursos físicos, bióticos y socioeconómicos afectados por derrames de hidrocarburos.....	34
4.1.8. Escenario de mayor ocurrencia.	35
4.2. Determinación de la capacidad de adsorción del aserrín en diferentes tamaños de grano	38
4.2.1. Granulometría de aserrín.....	38
4.2.2. Evaluación de la capacidad de adsorción del aserrín según la norma ASTM 726-06.....	38
4.2.3. Análisis de las propiedades del aserrín en condiciones hidrofílicas	39
4.2.4. Balance de masa.	40
5. CONCLUSIONES	42
6. RECOMENDACIONES	43
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
BIBLIOGRAFIA.....	50
ANEXOS	55

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Comportamiento de los hidrocarburos en cuerpos de agua	19
Figura 2. Clasificación de tipos de aceites en respuesta a derrames de hidrocarburos.....	22
Figura 3. Tipos de materiales adsorbentes.....	23
Figura 4. Esquema de la metodología desarrollada en el presente trabajo	25
Figura 5. Metodología empleada para la prueba en condiciones dinámicas.	26
Figura 6. Metodología empleada para las pruebas de adsorción de hidrocarburo.	27
Figura 7. Número de casos totales de derrames de hidrocarburos por año	29
Figura 8. Volumen de barriles de hidrocarburos derramados por año.....	29
Figura 9. Casos totales y volumen derramado por departamento.	30
Figura 10. Productos líquidos con mayor incidencia y costos totales de atención.	32
Figura 11. Número total de casos por causa durante el periodo de estudio	33
Figura 12. Causas más frecuentes y etapas de mayor afectación.....	34
Figura 13. Etiquetas de escenarios de mayor ocurrencia.	35
Figura 14. Afectación a recursos físicos, bióticos y socioeconómicos.....	36
Figura 15. Escenario de mayor ocurrencia por departamento.	37
Figura 16. Rendimiento de adsorción del aserrín sobre diesel en diferentes tamaños de grano.....	39
Figura 17. Curva de volatilidad de diesel a 25°C	41

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Clasificación de los hidrocarburos y los compuestos derramados.....	30
Tabla 2. Causas de derrames de hidrocarburos	32
Tabla 3. Asignación de códigos numéricos para evaluación de escenarios.	37
Tabla 4. Tamaños de mallas utilizados durante las pruebas	38
Tabla 5. Flotabilidad en agua de los diferentes tamaños de grano de aserrín.....	39
Tabla 6. Rendimiento de adsorción del aserrín en agua en diferentes tamaños de grano.....	40
Tabla 7. Balance de masa de diesel durante la prueba de corta duración	40
Tabla 8. Balance de masa de diesel durante la prueba de larga duración	41

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo A. Información detallada “Análisis de derrames de hidrocarburos en Colombia (2004-2017)”	55
Anexo B. Mapas temáticos “Análisis de derrames de hidrocarburos en Colombia (2004-2017)”	66
Anexo C. Registro de pruebas de adsorción en condiciones oleofílicas	71

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE ADSORCIÓN DEL ASERRÍN EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO PARA CONTINGENCIA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS EN AMBIENTES ACUÁTICOS*.

AUTOR: ALLISON FERNANDA CASTRO CARDOZO, JHON SEBASTIAN PINILLA PRADILLA**.

PALABRAS CLAVE: ADSORCIÓN, HIDROCARBUROS, DERRAMES, ASERRÍN.

DESCRIPCIÓN:

Colombia uno de los países con mayor biodiversidad presenta una de las estadísticas más altas de derrames de hidrocarburos en el mundo. Para el año 2005 Miranda y Restrepo estimaron que el 70% de los derrames de hidrocarburos en el país afectaban cuerpos de agua dulce; desde entonces, no se conoce ningún trabajo de actualización de esta estadística, ni datos de afectación a otros recursos. Mediante consulta a la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA, se obtuvo información de alrededor de 6300 derrames de hidrocarburos en el territorio nacional, ocurridos entre 2004 y 2017. A partir de esta base de datos, se procedió a elaborar mapas temáticos (30 en total), mediante los cuales se evidenciaron los departamentos con mayor afectación por derrames de hidrocarburos y escenarios de mayor ocurrencia. Se identificó que el diesel fue el producto refinado con mayor incidencia en casos de derrames y se utilizó como hidrocarburo de prueba para determinar el rendimiento de adsorción del aserrín en diferentes tamaños de grano. La metodología se realizó en base a la norma ASTM F726-06 (*Standard Test Method For Sorbent Performance of Adsorbents*) y se determinó que el tamaño de grano de 4,75 mm cumple con los criterios de selección para ser utilizado como material adsorbente en respuesta a derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Escuela de Ingeniería Química. Director M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectores M.Sc. Diana Marcela Ibarra Mojica; M.Sc. Crisóstomo Alberto Barajas Solano.

ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF SAWDUST ADSORPTION PERFORMANCE IN DIFFERENT PARTICLE SIZES FOR CONTINGENCY OF OIL SPILLS IN AQUATIC ENVIRONMENTS. *.

AUTHOR: ALLISON FERNANDA CASTRO CARDOZO, JHON SEBASTIAN PINILLA PRADILLA**

KEYWORDS: ADSORPTION, OIL SPILLS, SAWDUST.

DESCRIPTION:

Colombia, one of the countries with the greatest biodiversity, has one of the highest statistics of oil spills in the world. For the year 2005, Miranda and Restrepo estimated that 70% of the oil spills in the country affected fresh water bodies; since then, there is no known an update work on this statistic, nor data of affectation of other resources. In consultation with Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA, information was obtained from around 6300 oil spills in the national territory, occurred between 2004 and 2017. From this database, the information was selected to create thematic maps (30 in total), which showed the departments with the greatest impact due to oil spills and the scenarios of greater occurrence. It was identified that diesel was the refined product of the highest incidence and it was used to test the adsorption capacity of sawdust in different grain sizes. The methodology was based on the standard ASTM F726-06 (*Standard Test Method For Sorbent Performance of Adsorbents*) and it was determined that the grain size of 4.75 mm meets the selection criteria to be used as adsorbent material in response of oil spills in aquatic environments.

* Bachelor thesis

** Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Escuela de Ingeniería Química. Director M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectores: M.Sc. Diana Marcela Ibarra Mojica; M.Sc. Crisóstomo Alberto Barajas Solano.

INTRODUCCIÓN

El manejo inadecuado de materiales y residuos peligrosos han generado a nivel mundial un problema de contaminación sobre los recursos naturales. Entre estas formas de contaminación se encuentran los derrames de petróleo como consecuencia de actividades humanas e incidentes naturales, los cuales se consideran de elevada persistencia y afectan el equilibrio de los ecosistemas [1]. En el mundo, este tipo de incidentes se han presentado de forma constante [2] desastres como el derrame de petróleo de Deepwater Horizon proporciona evidencia de que los derrames de hidrocarburos representan un peligro para la economía y los recursos naturales.

Diversos aspectos de este tipo de eventos han sido materia de investigación para la prevención y mitigación de impactos negativos de carácter ambiental, social y económico. La contaminación generada por derrames de hidrocarburos en Colombia ha afectado gravemente las cuencas y los ecosistemas tropicales [3]. Entre 1986 y 1998 actos terroristas ocasionaron el vertimiento de aproximadamente 2 millones de barriles de hidrocarburos, 7,6 veces el petróleo que se derramo en el desastre de Exxon Valdés en Alaska en 1989 [1]. Para el año 2005 Miranda y Restrepo estimaron que el 70% de los derrames de hidrocarburos en el país afectaban cuerpos de agua dulce; desde entonces, no se conoce ningún trabajo de actualización de esta estadística, ni datos de afectación a otros recursos.

A raíz de este tipo de incidentes, nuevos métodos de respuesta a derrames se han venido desarrollando gracias al estudio de las interacciones fisicoquímicas que se presentan entre los hidrocarburos y el medio ambiente [4]. El análisis y evaluación de estas interacciones ha permitido comprender el comportamiento y buscar mecanismos de respuesta para el control de derrames y recuperación de productos. Los métodos de respuesta se suelen clasificar según el principio de funcionamiento

en mecánicos, físicos, químicos y biológicos; actualmente se están desarrollando nuevas alternativas a partir de la nanotecnología [5].

Frecuentemente, los métodos mecánicos son usados en la primera fase de atención, para extraer la mayor parte posible de la sustancia vertida y en etapas finales para la limpieza y remoción de películas de hidrocarburos en columnas de agua [6]; siendo los materiales adsorbentes uno de los más comúnmente usados en esta última fase. Los adsorbentes permiten retirar hidrocarburos en situaciones que no son adecuadas para otras técnicas proporcionando un recurso útil en la respuesta a derrames [7]. Estos materiales se clasifican en orgánicos, inorgánicos y sintéticos, sobre los cuales se evalúan la capacidad de retención de hidrocarburos, flotabilidad y propiedades oleofílicas e hidrofóbicas [8].

Mediante el presente trabajo, se evaluó el rendimiento de adsorción del aserrín para la remoción de hidrocarburos teniendo en cuenta el efecto que se puede generar al usar diferentes tamaños de grano. Además, se procedió a recopilar información de incidentes de derrames de hidrocarburos ocurridos en Colombia durante los últimos años; con el fin de identificar los escenarios de mayor afectación a recursos físicos, biológicos y socioeconómicos, como herramienta para la formulación de Planes de Contingencia en el país.

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

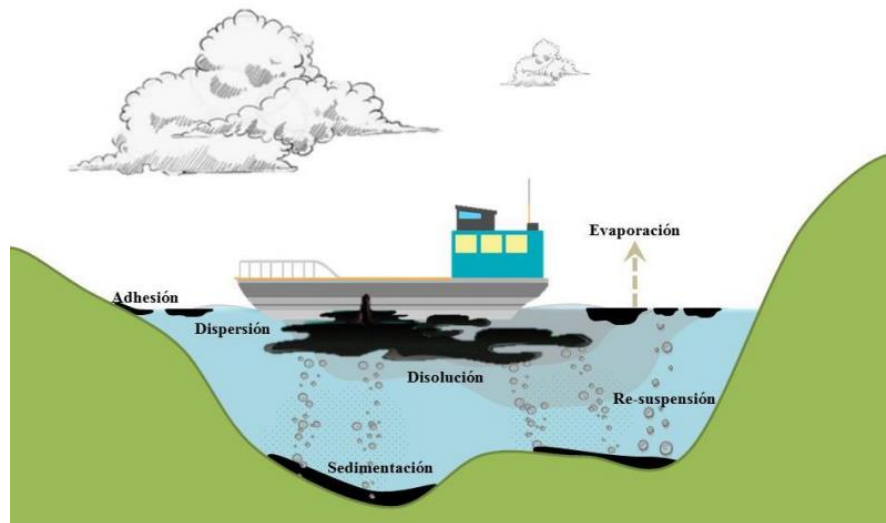
El petróleo crudo es una mezcla compleja de hidrocarburos y contiene trazas de algunos componentes como oxígeno, vanadio, níquel, azufre y nitrógeno [9]. Los principales tipos de hidrocarburos presentes en el petróleo crudo son los denominados parafinas, naftenos y aromáticos. Las parafinas son hidrocarburos saturados de cadena lineal o con ramificaciones, los naftenos son estructuras saturadas en forma de anillo y los compuestos aromáticos son hidrocarburos no saturados constituidos por uno o más anillos de benceno [10].

1.1. COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS EN CUERPOS DE AGUA

Los derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua ocasionan una serie de cambios físicos y químicos que llevan a la descomposición de hidrocarburos en sus componentes tóxicos y volátiles [11]. El destino y la degradación de los hidrocarburos en este tipo de incidentes se encuentran relacionados con procesos de dispersión, adhesión, evaporación, disolución, re-suspensión y sedimentación tal como se representa en la *Figura 1*. Estos procesos ocurren a diferentes velocidades y la mayoría dependen altamente de la temperatura del ambiente y de las características fisicoquímicas de los hidrocarburos derramados [13]. A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

Adhesión: Se considera un proceso ambiental que cambia el comportamiento y las propiedades físicas de los hidrocarburos en una columna de agua. Los componentes del aceite que no se evaporan, se adhieren a superficies como la vegetación acuática sumergida y flotante, escombros que proporcionan superficies de adhesión y especies animales que pueden recubrirse con aceite. Este proceso dificulta e impide los esfuerzos de recuperación y limpieza de hidrocarburos [14].

Figura 1. Comportamiento de los hidrocarburos en cuerpos de agua



Fuente: IBARRA MOJICA, Diana Marcela. Metodología para evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos, 2017. [12]

Dispersión: Este proceso consiste en la disgregación de una mancha de aceite por medio de la incorporación de pequeñas gotas de aceite en la columna de agua por acción de ondas; depende altamente de la tensión superficial, la viscosidad del aceite y la energía de mezcla (acción de viento, corrientes, mareas) [14]. La distribución del tamaño de las gotas de aceite juega un papel importante en la degradación, destino y toxicidad del aceite derramado [14] [15]; por lo cual se considera un proceso significativo durante las primeras 10 h del derrame [16].

Evaporación: Es considerado como el proceso más importante en la degradación de hidrocarburos en cuerpos de agua [17]; los componentes volátiles del aceite derramado se evaporan a diferentes velocidades y son transportados y diluidos por procesos atmosféricos [15]. La tasa de evaporación de los componentes depende de las propiedades de los hidrocarburos, la temperatura del agua, la velocidad del viento y del área de contacto del aceite con la atmósfera [14].

Sedimentación: Es el proceso por el cual el aceite se deposita en el fondo de la columna de agua [17]. La sedimentación puede ocurrir por varias rutas, incluyendo un aumento en la densidad del aceite a través de proceso fisicoquímicos, la adhesión de gotas dispersas de aceite y la formación de agregados de aceite y partículas de suficiente densidad para sumergirse [14].

Disolución: La disolución es el proceso de estabilización química de los componentes del aceite en el agua [18]; durante el cual los hidrocarburos de bajo peso molecular y componentes polares se disuelven fácilmente en la columna de agua [16]. La disolución solo representa una pequeña porción de la pérdida de aceite, pero se considera un parámetro de comportamiento importante debido a que los componentes solubles son altamente tóxicos para el entorno [17].

1.2. MÉTODOS CONVENCIONALES PARA CONTROL Y RESPUESTA A DERRAMES

1.2.1. Métodos mecánicos. Los métodos mecánicos se consideran como las primeras acciones de respuesta a derrames de hidrocarburos con el fin de mantener el aceite en un lugar determinado, dirigir el derrame hacia un punto específico, remover y almacenar la mayor cantidad posible de producto [6]. Los equipos de contención y recuperación incluyen una amplia variedad de barreras, bombas, elementos recolectores (*skimmers*) y materiales sorbentes [19]. El uso de estos equipos está limitado por las condiciones meteorológicas y los procesos de degradación de hidrocarburos en cuerpos de agua [20].

1.2.2. Métodos físicos. Los métodos físicos se utilizan para la limpieza y eliminación de hidrocarburos en cortos periodos de tiempo [6]; cuando la aplicación de métodos mecánicos es inviable, ineficaz y/o insuficiente [20]. Dentro de estos métodos se incluye la quema in-situ, la cual consiste en la combustión controlada de hidrocarburos en una superficie de agua con el fin de evitar que los recursos

entren en contacto con el aceite derramado, reducir el tamaño del derrame y permitir que los recursos naturales se recuperen en un menor tiempo [5]. Su aplicación depende del espesor de la mancha, la composición del aceite (emulsificación) y las condiciones climáticas [21].

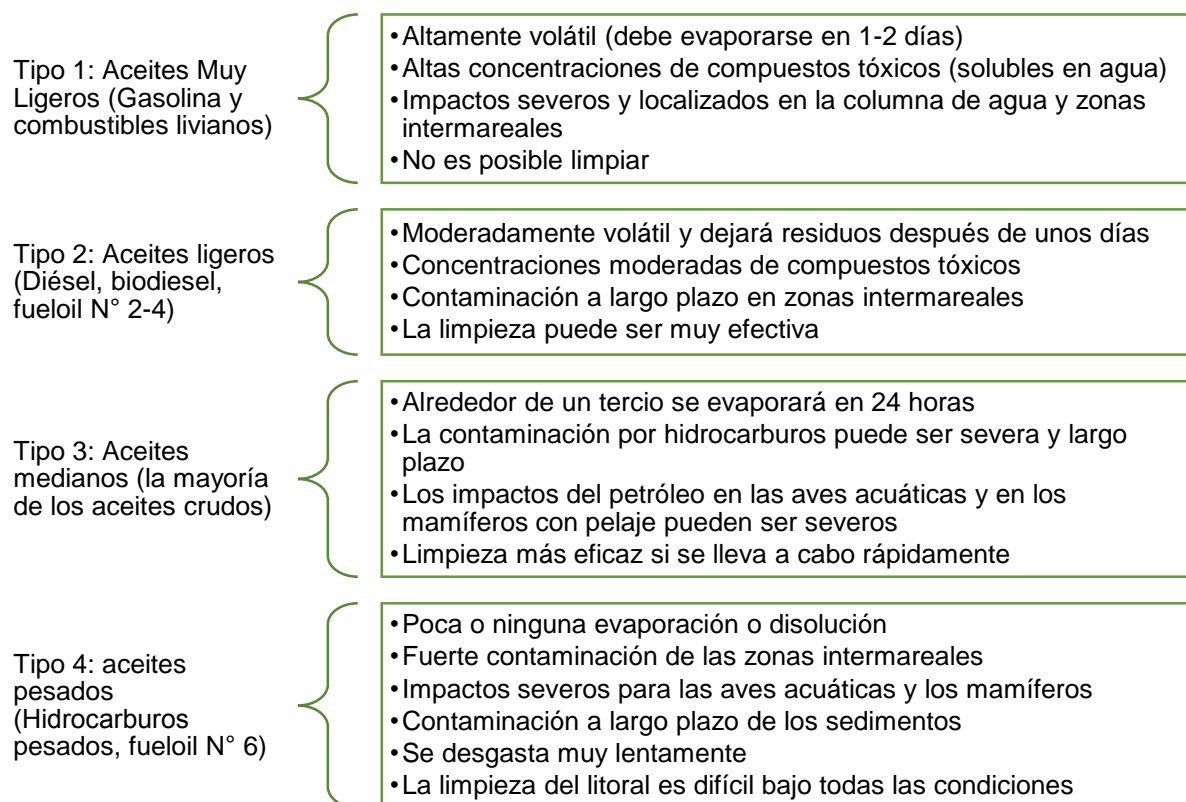
1.2.3. Métodos químicos. Los métodos químicos consisten en la aplicación de agentes dispersantes y gelificantes para limpieza y control de derrames; evitando que los hidrocarburos se desplacen por acción del viento o corrientes de agua [22]. Los dispersantes químicos disgregan una mancha de aceite en pequeñas gotas, promoviendo la mezcla de aceite en la columna de agua y acelerando los procesos de dispersión natural y degradación [23]. La eficacia de este tipo de agentes se da en base a las características del hidrocarburo (viscosidad), la temperatura del agua, acción de las olas y la dosificación del dispersante [14].

1.2.4. Métodos biológicos. Los métodos biológicos como la biorremediación, la bioconversión y la fitorremediación se utilizan en la etapa final de limpieza, en aquellas zonas donde no se recomienda o no es posible el uso de otros métodos. Estas técnicas permiten remover hidrocarburos gracias a la acción de los microorganismos y plantas para la recuperación de los ecosistemas afectados [6].

1.3. MANEJO DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS

Los encargados de respuesta a derrames de petróleo clasifican los aceites en cuatro grupos principales de acuerdo con las propiedades fisicoquímicas y el nivel de afectación en el medio ambiente [24]. Esta clasificación proporciona una herramienta para la selección de métodos de respuesta y recuperación de hidrocarburos derramados en ambientes acuáticos. Ver *Figura 2*.

Figura 2. Clasificación de tipos de aceites en respuesta a derrames de hidrocarburos.



Fuente: NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Oil Types. [En línea]. Disponible en: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/oil-types.htm>.

1.4. MATERIALES ADSORBENTES PARA LA LIMPIEZA DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS

Los materiales adsorbentes permiten retirar hidrocarburos en situaciones que no resultan adecuadas para otras técnicas y, por lo tanto, pueden proporcionar un recurso útil en la respuesta a un derrame de hidrocarburos [25]. Los adsorbentes se clasifican en tres categorías básicas, que incluyen productos minerales inorgánicos, productos sintéticos orgánicos y productos vegetales orgánicos [26]. El criterio de selección para el uso de materiales adsorbentes en derrames de hidrocarburos en

ambientes acuáticos se basa en la evaluación de sus propiedades de flotabilidad, capacidad de adsorción de hidrocarburo y capacidad de adsorción de agua. De acuerdo con la norma ASTM F726-06 (*Standard Test Method For Sorbent Performance of Adsorbents*) [27] los materiales adsorbentes se clasifican en Tipo I, Tipo II, Tipo III y Tipo IV. Ver *Figura 3*.

Figura 3. Tipos de materiales adsorbentes.

Material adsorbente Tipo I	Rollos, películas, hojas, mantas, tejidos o placas que tienen suficiente resistencia para ser levantados y manejados sin romperse cuando se saturan.
Material adsorbente Tipo II (suelos o a granel)	Material no consolidado, en partículas sin forma ni resistencia, que puede ser manipulado con palas y/o equipos dispersantes.
Material adsorbente Tipo III (contenidos)	Material adsorbente contenido por un tejido o red exterior que tiene permeabilidad al hidrocarburo, pero con aberturas lo suficientemente pequeñas para retener sustancialmente el material adsorbente dentro del textil o red.
Material Tipo IV (unidades aglomeradas)	Es un ensamble de hilos, redes abiertas u otras formas físicas, dadas a una estructura abierta que mínimamente impide la intrusión en sí misma de aceites de alta viscosidad

Fuente: Adaptado de norma ASTM F726-06. [27]

Una amplia variedad de adsorbentes orgánicos han sido probados para la remoción de hidrocarburos de agua, entre ellos el aserrín [28], bagazo de caña [29], plumas de pollo [30], fibra de coco, fibra de caña, buchón de agua [31], cascara de mazorca de cacao [32], turba, lirio acuático [33], harina de madera [34], cabello humano [35], ceniza de cáscara de arroz [36], aserrín de pino, aserrín de palma, vástago de plátano, musgo y pelo canino [37].

Una de las grandes ventajas que posee el aserrín como material adsorbente es su abundancia en la naturaleza ya que se considera un subproducto de residuo en la industria maderera; además de su bajo costo y propiedades de biodegradabilidad [8] [25]. Además, se ha demostrado su utilidad en la eliminación de iones de metales pesados en aguas residuales y la remoción de hidrocarburos en derrames [38].

2. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el rendimiento de adsorción del aserrín en diferentes tamaños de grano para contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.

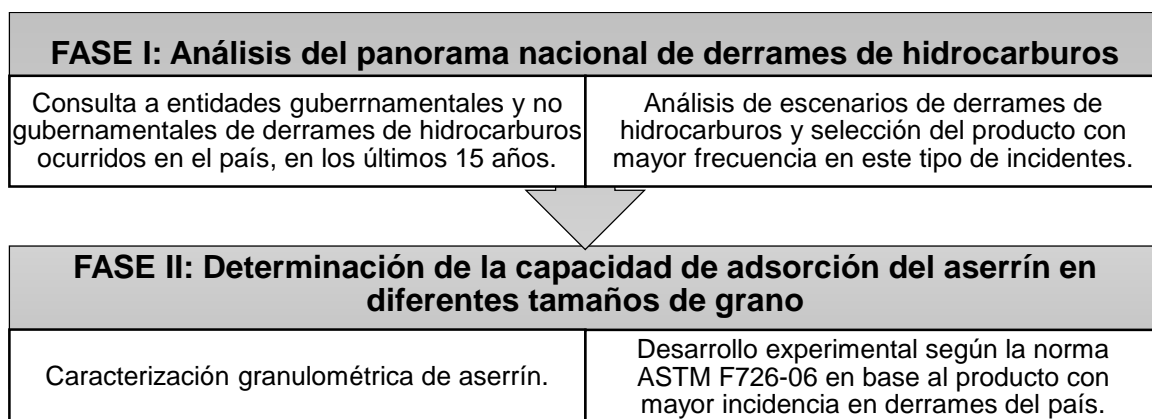
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el panorama nacional de derrames de hidrocarburos para identificar los productos más frecuentemente derramados en ríos de Colombia.
- Determinar la capacidad de adsorción del aserrín en diferentes tamaños de grano teniendo en cuenta uno de los productos con mayor incidencia en casos de derrames en Colombia.

3. DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

La metodología establecida para el desarrollo del proyecto se describe de manera general en la *Figura 4*.

Figura 4. Esquema de la metodología desarrollada en el presente trabajo

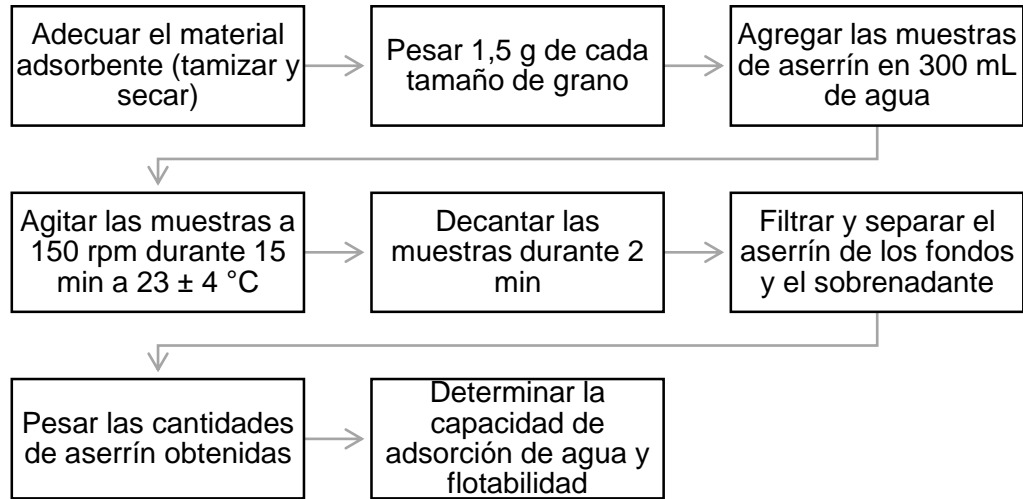


3.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental se realizó en base a la metodología establecida para materiales adsorbentes tipo II (materiales sueltos) de la norma ASTM F726-06; realizando pruebas por triplicado para cada uno de los tamaños de grano obtenidos a partir de la caracterización granulométrica del aserrín.

3.1.1. Prueba en condiciones dinámicas. La prueba en condiciones dinámicas evalúa el desempeño de un material adsorbente cuando se encuentra en una fase acuosa en movimiento (condiciones hidrofílicas). El procedimiento de los ensayos se muestra en la *Figura 5*.

Figura 5. Metodología empleada para la prueba en condiciones dinámicas.



A partir de esto, se calcula el rendimiento de adsorción de agua, tal como se establece en la ecuación 1.

$$\text{Rendimiento de adsorción de agua} = S_w / S_o \quad (1)$$

$$S_w = S_{WT} - S_o \quad (2)$$

Donde:

S_o : Masa inicial del adsorbente seco [g]

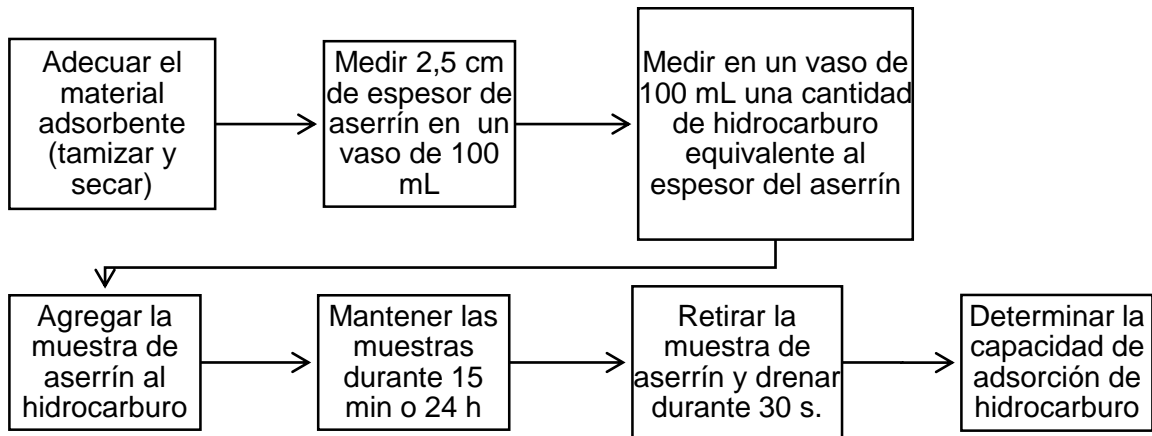
S_w : Cantidad de agua adsorbida por el aserrín [g]

S_{WT} : Masa de adsorbente al final de la prueba [g]

3.1.2. Pruebas de adsorción de hidrocarburo de corta (15min) y larga duración (24h). Las pruebas de adsorción de hidrocarburo de corta y larga duración corresponden a la máxima cantidad de hidrocarburo adsorbido en un tiempo de 15 min y 24 h. El procedimiento de los ensayos se muestra en la *Figura 6*.

A partir de esto, se calcula el rendimiento de adsorción de hidrocarburo, tal como se establece en la ecuación 3.

Figura 6. Metodología empleada para las pruebas de adsorción de hidrocarburo.



El rendimiento de adsorción de hidrocarburo es el parámetro que se utiliza para medir el desempeño del material y se determina a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Rendimiento de adsorción de hidrocarburo} = S_s / S_0 \quad (3)$$

$$S_s = (S_{ST} - S_0) \quad (4)$$

Donde:

S_0 : Masa inicial del adsorbente seco [g]

S_s : Cantidad de hidrocarburo adsorbido por el aserrín [g]

S_{ST} : Masa de adsorbente al final de la prueba [g]

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. ANÁLISIS DE PANORAMA NACIONAL DE DERRAMES DE HIDROCARBUROS

A partir de la base de datos suministrada por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA , la cual se alimenta con la información que envían los usuarios y empresas ante la ocurrencia de derrames en los diferentes proyectos petroleros, se procedió a clasificar la información de número total de casos, la etapa del proceso en donde más frecuentemente ocurren incidentes, el volumen total vertido, las causas más frecuentes de este tipo de incidentes, la afectación a recursos físicos, bióticos y socioeconómicos; así como la estimación de los costos de atención de contingencias. La información detallada se encuentra consignada en el anexo A.

4.1.1. Número de casos Alrededor de 6300 casos de derrames de hidrocarburos se reportaron en el periodo del 2004 a 2017 en el país. En la *Figura 7* se observa el número de casos por año; con un incremento constante del número de incidentes, como se evidencia del 2004 hasta el 2014. Durante el periodo de 2011 a 2014 se presentaron el mayor número de derrames, alcanzando su valor máximo en el año 2014 (974 casos), más de dos veces el número presentado en 2009. El mayor número de casos de derrames de hidrocarburos por departamento se reportaron en Santander con alrededor de 1400 casos (23%), seguido de Putumayo con 1000 casos (16%) y Antioquia con 828 casos (13%). En la *Figura 9 (a)* se presenta la distribución del número de casos por departamento.

4.1.2. Volumen El volumen total de hidrocarburos derramados en el país durante los últimos 14 años fue aproximadamente 3,6 millones de barriles. En la *Figura 8* se observa claramente que la mayor cantidad de barriles vertidos durante el periodo 2004-2017, ocurrió en el 2005 con un 52% del volumen total, una gran diferencia respecto al 2006 donde se reportó un 16% y a los demás años donde se registraron

cantidades menores al 6%. Los departamentos donde se registró la mayor cantidad de volumen de hidrocarburos derramados fueron: Tolima con un 47,9 % del volumen total, Cundinamarca con un 13%, Norte de Santander con un 12%, Putumayo con un 8% y Nariño con un 4%. En la *Figura B.1 (a)* del anexo B, se encuentra consignado el mapa correspondiente volumen total anual de derrames de hidrocarburos por departamento.

Figura 7. Número de casos totales de derrames de hidrocarburos por año

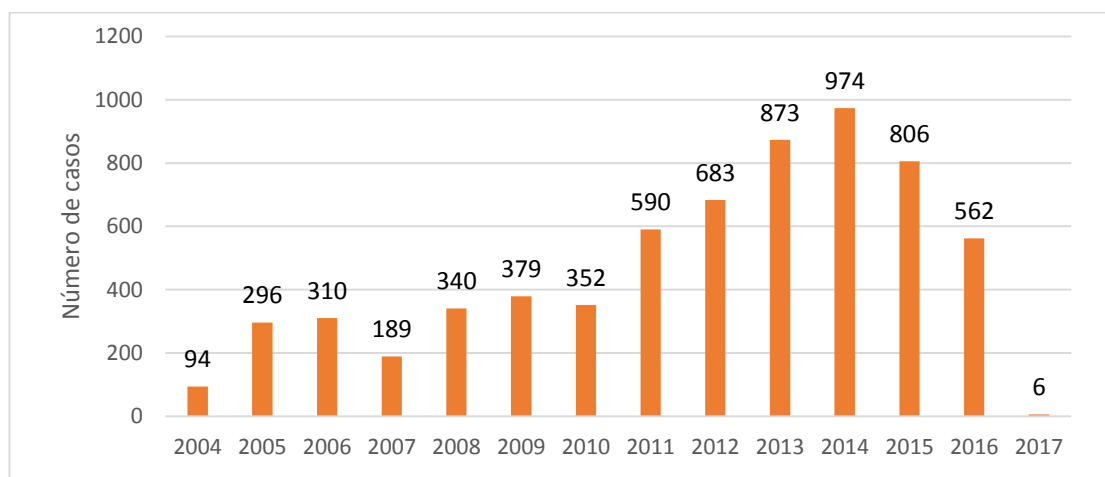


Figura 8. Volumen de barriles de hidrocarburos derramados por año.

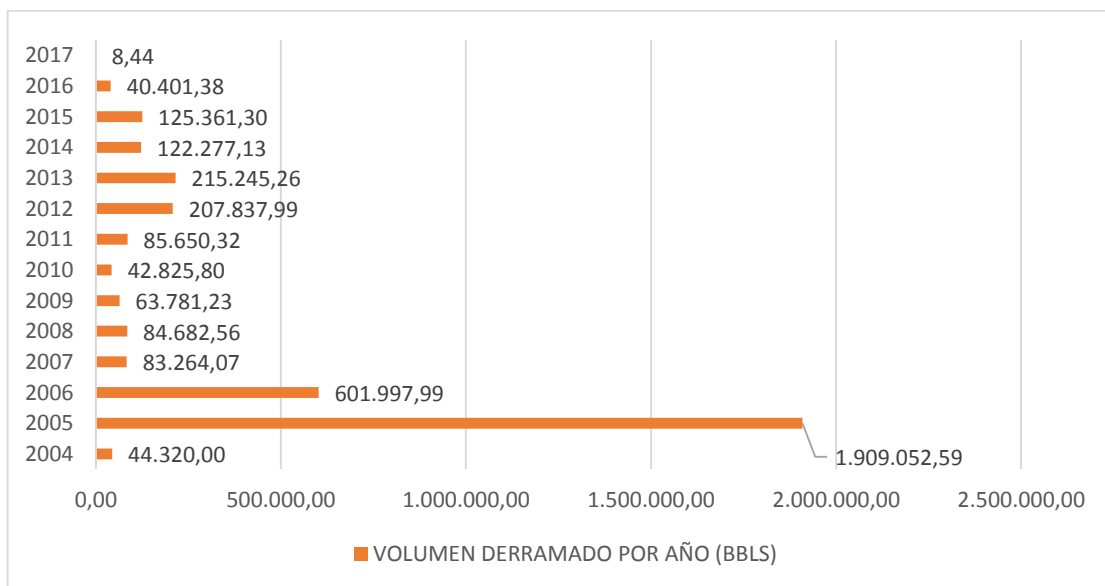
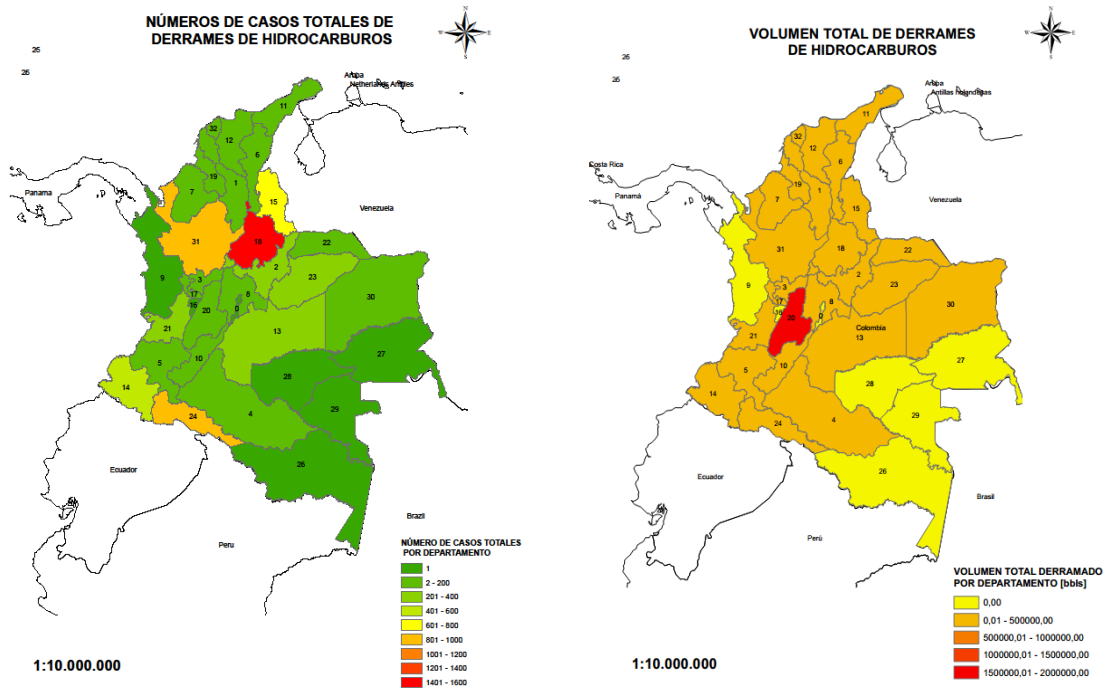


Figura 9. Casos totales y volumen derramado por departamento.



(a) Número de casos totales de derrames de hidrocarburos por departamento (b) Volumen total de derrames de hidrocarburos por departamento

4.1.3. Productos con mayor incidencia en derrames de hidrocarburos

Teniendo en cuenta la clasificación de tipos de hidrocarburos en respuesta a derrames y la información suministrada por la base de datos se clasificaron los productos derramados en el país como se observa en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Clasificación de los hidrocarburos y los compuestos derramados.

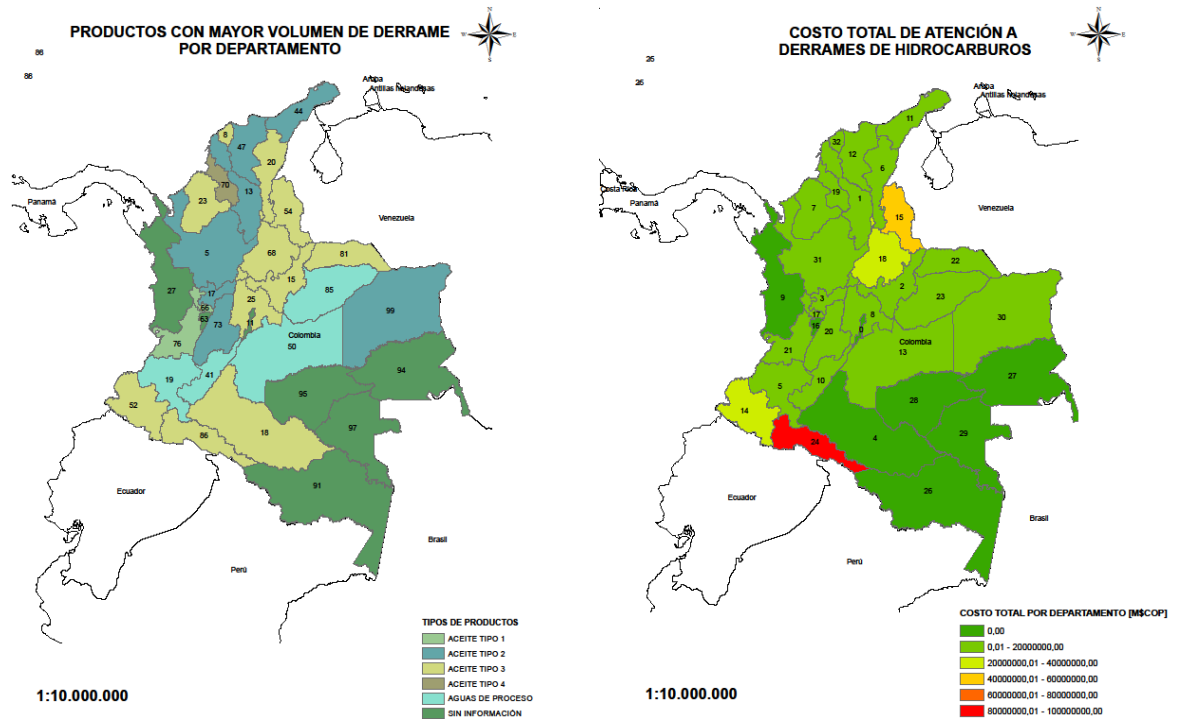
Aceites tipo 1	Gasolina, combustibles livianos.
Aceites tipo 2	Diésel, biodiesel, fuel oil no 2-4.
Aceites tipo 3	Petróleo crudo, hidrocarburos medianos
Aceites tipo 4	Crudos pesados, fuel oil no 6.
Aguas de proceso	Aguas con trazas de aceite, de formación, procesos (producción e inyección), industrial (tratada y residual),
Gas	GLP, metano, propano
Fluidos de proceso	Formación, perforación, producción.
Otros	Químicos, cortes de perforación.

Los hidrocarburos líquidos con más incidentes en derrames fueron los aceites tipo 3 (petróleo crudo, hidrocarburos medianos), seguido por los aceites tipo 2 (diésel, biodiesel). El producto de aceite tipo 2 más frecuentemente derramado fue el diésel; los departamentos con mayor afectación por derrames de diésel al medio ambiente fueron: Santander con aproximadamente 20.500 bbls derramados, seguido por Bolívar con cerca de 12.500 bbls y Caldas con 12.000 bbls. La información detallada del volumen de diésel derramado por departamento se encuentra consignada en la *Tabla A.6*.

4.1.4. Costos de atención a derrames de hidrocarburos. La estimación de los costos totales de atención de contingencias a nivel nacional fue de aproximadamente \$COP 300 mil millones durante el periodo de estudio establecido. Los departamentos que presentaron una mayor inversión para contingencia de derrames, recuperación de productos y remediación de zonas afectadas fueron Putumayo, Norte de Santander y Nariño como se observa en la *Figura 10 (b)*. En la *Figura B.1 (b)* del anexo B se encuentra consignado el mapa correspondiente al costo promedio anual de atención a derrames de hidrocarburos por departamento.

4.1.5. Causas de derrames de hidrocarburos en el país. De acuerdo con la información suministrada por la base de datos las causas de derrames de hidrocarburos se clasificaron en 5 categorías (ver *Tabla 2*). Se estableció que entre los años 2004 a 2011 la causa con mayor número de incidencias fue acción de terceros con 1237 casos. Sin embargo, a partir del 2011 las fallas mecánicas o técnicas presentaron un aumento del 50% en incidentes de derrames de hidrocarburos, tal como se muestra en la *Figura 11*.

Figura 10. Productos líquidos con mayor incidencia y costos totales de atención.

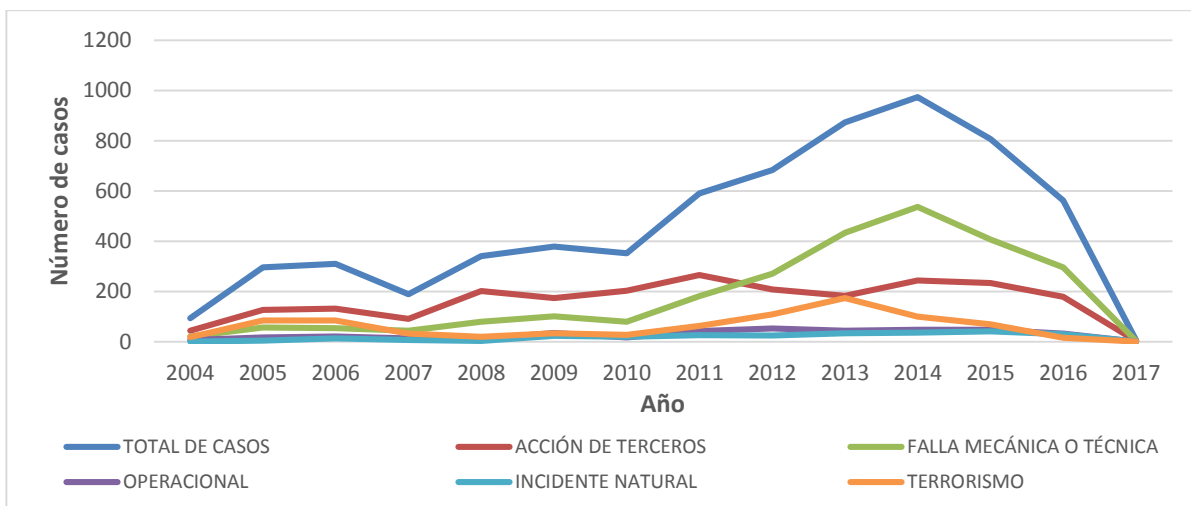


(a) Productos líquidos con mayor incidencia en casos de derrames. (b) Costos totales de atención de contingencias por departamento.

Tabla 2. Causas de derrames de hidrocarburos

Acción de terceros	<ul style="list-style-type: none"> Perforación ilícita. Alteración de equipos por persona desconocidas Hurto de equipos.
Falla mecánica o técnica	<ul style="list-style-type: none"> Roturas o fallos de material. Rebose de fluidos por taponamiento. Daño de equipos.
Falla operacional	<ul style="list-style-type: none"> Volcamientos de carro tanque. Daños por golpes de máquinas en operaciones. Error en el manejo de válvulas.
Incidente natural	<ul style="list-style-type: none"> Fuertes precipitaciones o lluvias. Deslizamiento de tierras y fenómenos de erosión. Sismos, terremotos o fenómenos naturales
Terrorismo	<ul style="list-style-type: none"> Atentados con cargas explosivas. Impactos de proyectil a las tuberías.

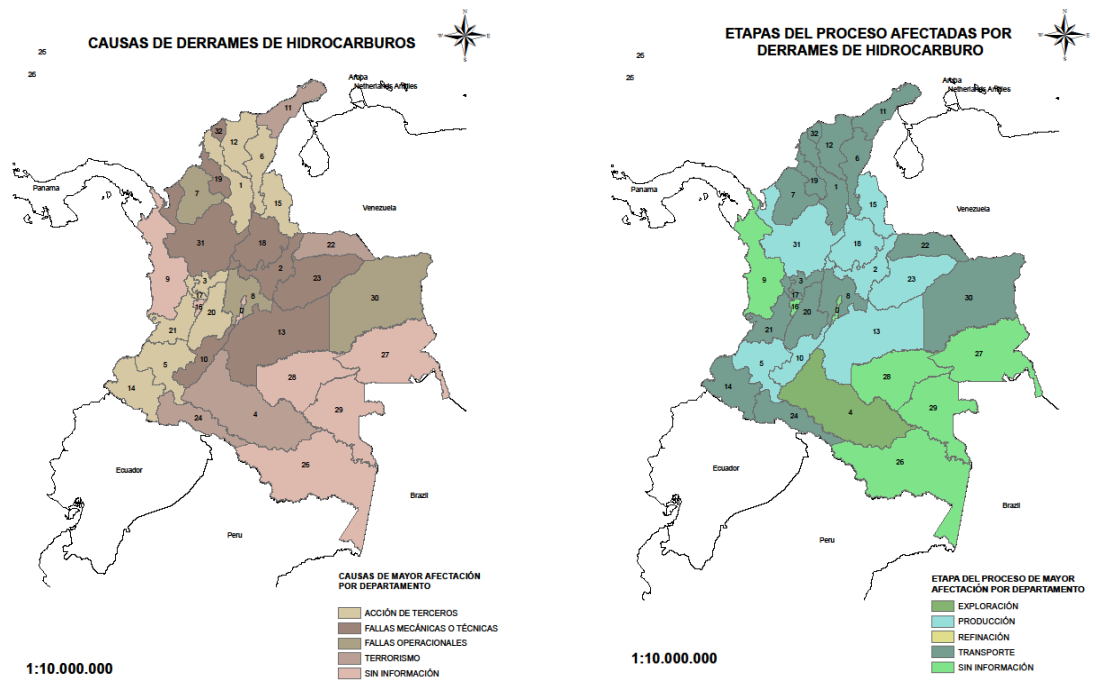
Figura 11. Número total de casos por causa durante el periodo de estudio



Durante el periodo de estudio las causas más frecuentes de este tipo de incidentes correspondieron a fallas mecánicas o técnicas con aproximadamente el 40% de los casos totales, seguido por acción de terceros con cerca del 35%, terrorismo con alrededor de 13%, fallas operacionales con 6% y finalmente incidentes naturales con un 4% de los casos totales. En la *Figura 12 (a)* se presentan las causas más comunes de este tipo de incidentes por departamento. En la *Figura B.1 (c),(d)* y *Figura B.2 (a),(b),(c)* del anexo B se encuentran consignados los mapas correspondientes a derrames de hidrocarburos ocurridos por fallas mecánicas o técnicas, acción de terceros, terrorismo, fallas operacionales e incidentes naturales por departamento.

4.1.6. Etapa del proceso. La etapa del proceso durante la cual se presentaron un mayor número de incidentes fue en producción con aproximadamente el 51% de los casos totales, seguido de transporte con aproximadamente 45%, y finalmente exploración y refinación con aproximadamente 1,7% y 1,3% respectivamente. Las etapas donde frecuentemente ocurrieron los incidentes por departamentos se presentan en la *Figura 12 (b)*.

Figura 12. Causas más frecuentes y etapas de mayor afectación



(a) Causa más frecuentes por departamento. (b) Etapa con mayor afectación por departamento.

En la *Figura B.2* (d) y *Figura B.3* (a),(b),(c) del anexo B se encuentran consignados los mapas correspondientes a derrames ocurridos en las etapas de exploración-explotación, producción, transporte, y refinación por departamento.

4.1.7. Recursos físicos, bióticos y socioeconómicos afectados por derrames de hidrocarburos. Los recursos afectados por derrames de hidrocarburos en Colombia para el periodo establecido se clasificaron en recursos físicos (suelo, agua, aire), bióticos (fauna y flora) y socioeconómicos (propiedad privada, comunidad y cultivos).

Recursos físicos. El recurso físico de mayor afectación fue el suelo con aproximadamente el 85% de los casos totales, seguido por el recurso agua con un 40% de los casos totales y aire con un 5% de los casos totales.

Recursos bióticos. El recurso biótico de mayor afectación en el país fue la flora con aproximadamente el 37% de los casos totales, seguido por fauna con aproximadamente el 2%. En general se observa que en el 39% de los casos totales fue afectado el factor biótico y un 61% no tuvo afectación.

Recursos socioeconómicos. Los recursos socioeconómicos con mayor afectación fueron los daños a la propiedad privada con aproximadamente 18% de los casos totales, seguido de los daños a la comunidad con aproximadamente 5% y finalmente daño a cultivos con un 2%. En general, en el 25% de los casos totales se afectaron los recursos socioeconómicos.

En la Figura B.3 (d), Figura B.4 (a),(b),(c),(d) y Figura B.5 (a),(b),(c) del anexo B se encuentran consignados los mapas correspondientes a la afectación de recursos físicos (suelo, agua, aire), bióticos (flora, fauna) y socioeconómicos (propiedad privada, comunidad, cultivos) por departamento.

4.1.8. Escenario de mayor ocurrencia. Para la selección del escenario de mayor ocurrencia se asignaron diferentes valores numéricos, a las causas, etapas y recursos mencionados anteriormente. A cada escenario se le atribuyó un código numérico de un dígito, tal como se muestra en la *Tabla 3*. Luego se procedió a hacer la combinación de los diferentes datos de acuerdo con la información, usando en cada caso el código numérico correspondiente para formar etiquetas de 3 dígitos, tal como se muestra en la *Figura 13*; como resultado se obtuvieron 78 combinaciones, correspondientes a diferentes tipos de escenarios (ver anexo *Tabla A.11*).

Figura 13. Etiquetas de escenarios de mayor ocurrencia.

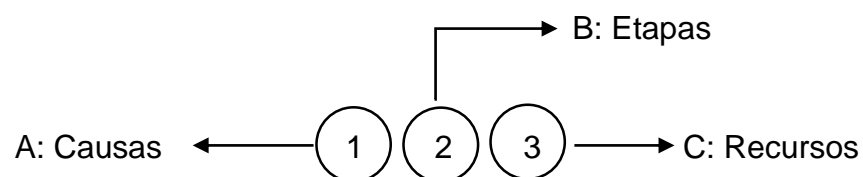
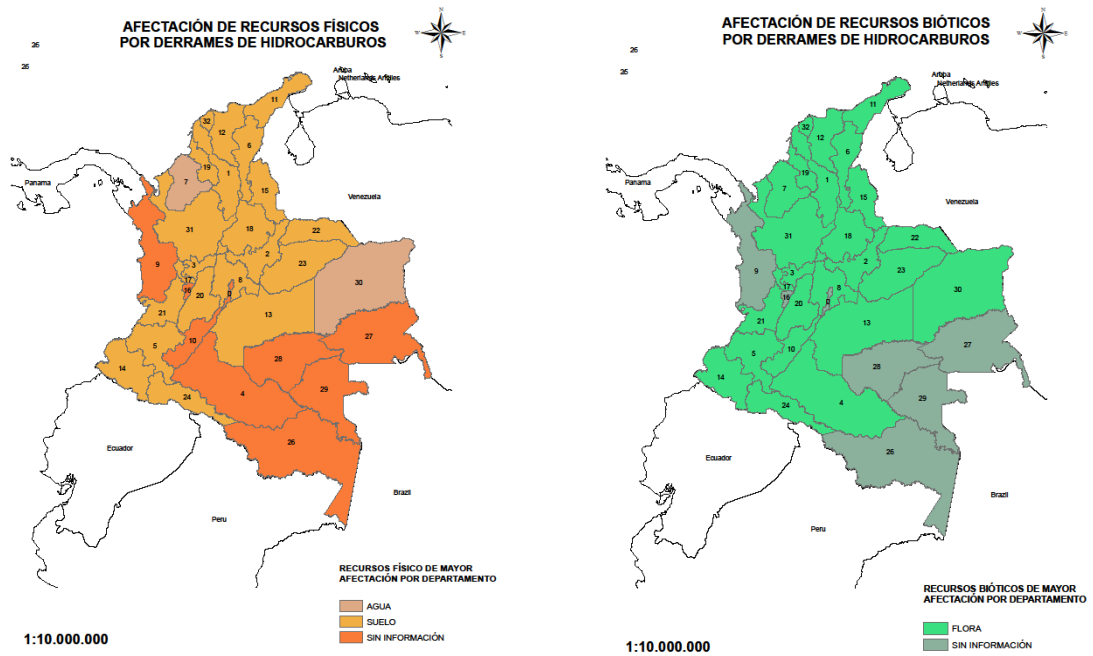
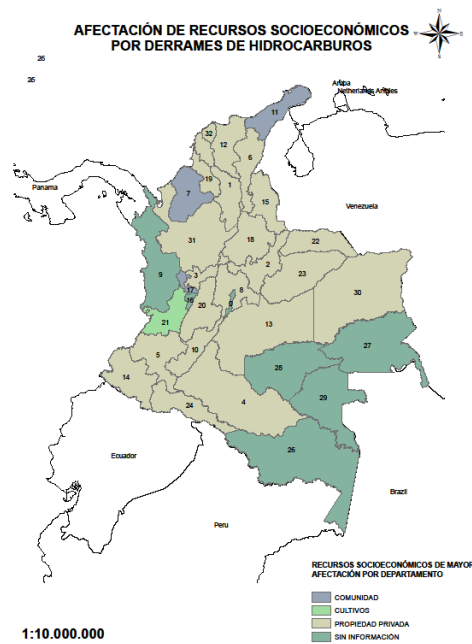


Figura 14. Afectación a recursos físicos, bióticos y socioeconómicos.



(a) Recurso físico con mayor afectación por departamento.

(b) Recurso biótico con mayor afectación por departamento.



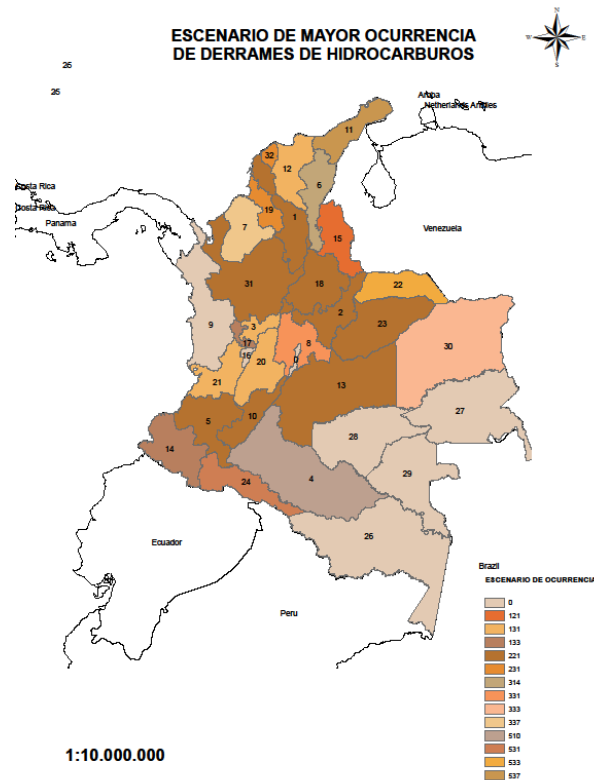
(c) Recurso socioeconómico de mayor afectación por departamento.

Tabla 3. Asignación de códigos numéricos para evaluación de escenarios.

A: Causas		B: Etapas		C: Recursos	
0	Sin información	0	Sin información	0	Sin información
1	Acción de terceros	1	Exploración	1	Físico
2	Falla mecánica o técnica	2	Producción	2	Biótico
3	Operacional	3	Transporte	3	Físico + Biótico
4	Incidente natural	4	Refinación	4	Socioeconómico
5	Terrorismo			5	Socioeconómico + Físico
				6	Socioeconómico + Biótico
				7	Socioeconómico + Físico + Biótico

En el 18% del total de casos de derrames de hidrocarburos coincidió que este tipo de incidentes se presentaron debido a fallas mecánicas o técnicas, durante la etapa de producción, registrando la mayor afectación sobre los recursos naturales del medio físico (agua, suelo y aire), etiqueta 221. Ver *Figura 15*.

Figura 15. Escenario de mayor ocurrencia por departamento.



4.2. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL ASERRÍN EN DIFERENTES TAMAÑOS DE GRANO

4.2.1. Granulometría de aserrín. El tipo de aserrín empleado en el presente estudio fue una combinación de las especies cedro y moncoro el cual se adquirió en un aserradero local. Inicialmente, se llevaron a cabo los procesos de tamizado y secado para la adecuación de las muestras y su respectiva caracterización granulométrica. Las muestras de aserrín se colocaron en el sistema de tamizado y se sometieron a un proceso de vibraciones durante 10 min, posteriormente se recogieron las fracciones depositadas en cada tamiz y se determinó el rendimiento de cada una de ellas respecto al total procesado. El secado de las muestras se realizó en un horno de laboratorio durante 24 h a 40°C.

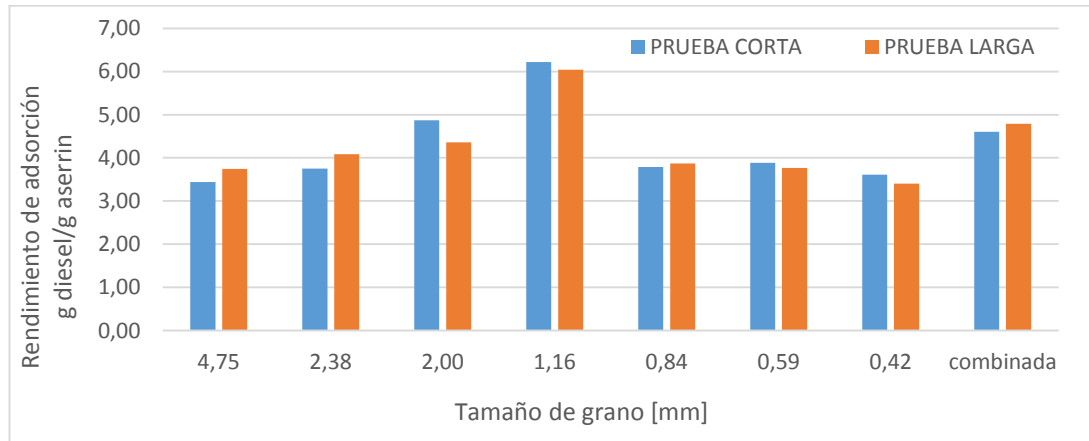
Tabla 4. Tamaños de mallas utilizados durante las pruebas

	Muestra 1: Grano grueso				Muestra 2: Grano fino		
Malla	4	8	10	16	20	30	40
Tamaño de grano [in]	0,187	0,0937	0,0787	0,0456	0,0331	0,0234	0,00165
Tamaño de grano [mm]	4,75	2,38	2	1,16	0,84	0,59	0,42
Cantidad obtenida [g]	98	68	75	87	120	100	110
%	29,88	20,73	22,87	26,52	36,36%	30,30%	33,33%

4.2.2. Evaluación de la capacidad de adsorción del aserrín según la norma ASTM 726-06. En la *Figura 16* se observa el rendimiento de adsorción promedio obtenida para cada tamaño de grano durante las pruebas de corta (15 min) y larga duración (24 h). La granulometría que presentó un mayor rendimiento durante las dos pruebas fue el tamaño de grano 1,16 mm con 6,22 g diesel/ g aserrín (prueba corta) y 6,04 g diesel/ g aserrín (prueba larga), seguida por el tamaño 2,00 mm el cual presentó un rendimiento de adsorción de 4,87 g diesel/ g aserrín (prueba corta) y 4,36 g diesel/ g aserrín (prueba larga). Estos resultados corresponden al estudio presentado por Annunciado, Sydenstricker & Amico en el cual se demuestra la importancia de establecer un rango de tamaños de grano adecuado para el control

de derrames de hidrocarburos y la disponibilidad de área de superficie de contacto con el objetivo de mejorar el proceso de adsorción [39].

Figura 16. Rendimiento de adsorción del aserrín sobre diesel en diferentes tamaños de grano.



4.2.3. Análisis de las propiedades del aserrín en condiciones hidrofílicas

En la *Tabla 5* se observa que existe una relación directa entre el tamaño de grano y la flotabilidad. El tamaño de grano más grande (4,75 mm) es el único que presenta un porcentaje de flotabilidad superior o igual al 90%; lo cual indica que solamente este tamaño podría usarse como material suelto para contingencia de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos según lo establecido en la norma ASTM F726-06.

Tabla 5. Flotabilidad en agua de los diferentes tamaños de grano de aserrín.

Tamaño grano [mm]	4,75	2,38	2,00	1,16	0,84	0,59	0,42	Combinada
Flotabilidad (%)	90,16	76,39	66,35	40,42	6,41	3,52	0,16	53,11

Las paredes celulares de aserrín consisten principalmente en celulosa y lignina, y muchos grupos hidroxilo, como los taninos u otros compuestos fenólicos [40]. Algunos de estos componentes presentan propiedades de atracción a moléculas de agua, lo cual hace que el aserrín presente una alta capacidad de adsorción al ser

aplicado en cuerpos de agua. En la *Tabla 6* se presentan los rendimientos de adsorción de los diferentes tamaños de grano al estar en contacto con una fase acuosa. Los tamaños de grano intermedio (1,16 mm y 2,00 mm) presentaron el mayor rendimiento de adsorción de 9,91 g agua/g aserrín.

Tabla 6. Rendimiento de adsorción del aserrín en agua en diferentes tamaños de grano.

Tamaño de grano [mm]	4,75	2,38	2,00	1,16	0,84	0,59	0,42	Combinada
Rendimiento de adsorción [g agua/g aserrín]	7,33	8,69	9,91	9,91	6,84	6,67	8,23	8,94

4.2.4. Balance de masa. El balance global del proceso para las pruebas de corta y larga duración (condiciones oleofílicas) se determinó a partir de la ecuación 5 y los resultados promedios obtenidos de los ensayos se presentan en la *Tabla 7* y *Tabla 8*.

$$\text{Peso diesel total} = \text{Peso diesel adsorbido} + \text{Peso diesel remanente} + \text{Pérdidas} \quad (5)$$

Tabla 7. Balance de masa de diesel durante la prueba de corta duración

CORTA DURACIÓN					
Tamaño de malla [mm]	Diesel inicial [g]	Diesel remanente [g]	Diesel removido por el adsorbente [g]	Diesel Removido + Remanente [g]	Pérdidas (%)
4,75	40,71	25,88	14,72	40,60	0,28
2,38	40,03	24,60	15,33	39,93	0,24
2,00	38,36	18,32	19,99	38,32	0,12
1,16	33,37	3,04	29,95	32,99	1,14
0,84	32,74	1,08	31,36	32,44	0,92
0,59	33,36	0,33	32,17	32,50	2,58
0,42	33,33	2,87	29,84	32,72	1,83
Combinada	39,33	19,84	19,39	39,23	0,24

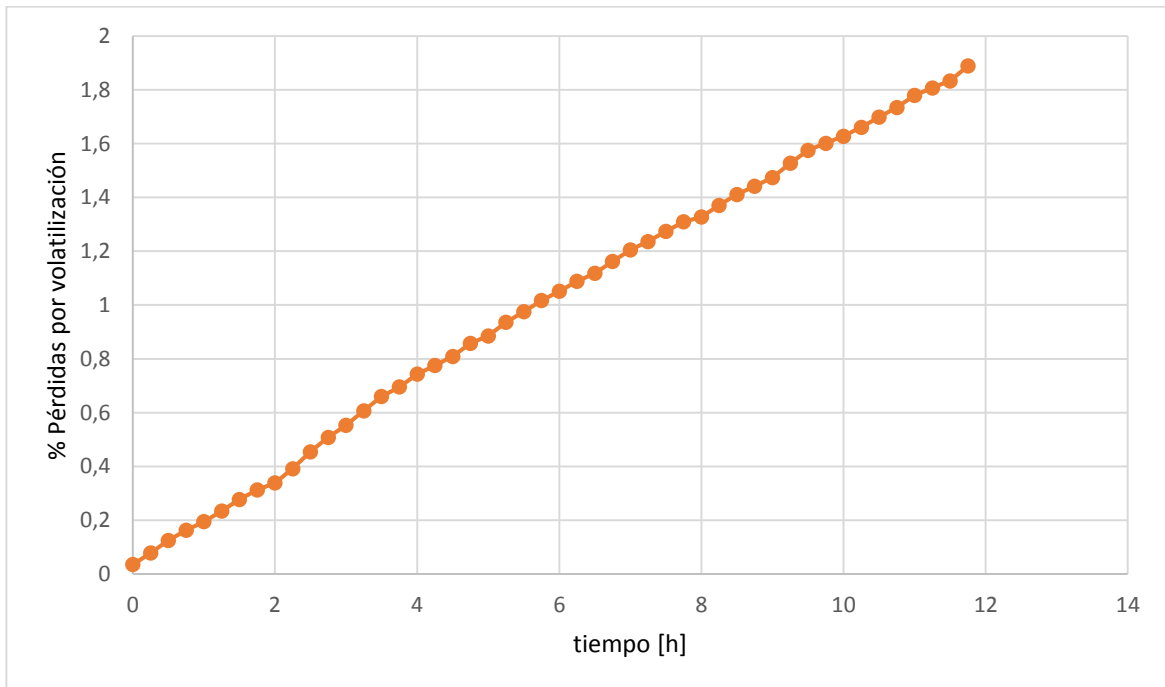
Las diferencias entre el peso inicial y la suma de las cantidades de diesel adsorbido y remanente pueden ser atribuidas a volatilización del producto y/o pérdidas por manipulación de las muestras. Se procedió a elaborar una curva de volatilización

del producto durante 12 horas. Como resultado de la curva se encontró que en 12 horas (720 min) se pierde máximo 3,79% de la cantidad inicial de diesel por volatilización.

Tabla 8. Balance de masa de diesel durante la prueba de larga duración

LARGA DURACIÓN					
Malla	<i>Diesel inicial [g]</i>	<i>Diesel remanente [g]</i>	<i>Diesel removido por el adsorbente [g]</i>	<i>Diesel Removido + Remanente [g]</i>	<i>Pérdidas (%)</i>
4,75	39,32	22,58	15,99	38,57	1,90
2,38	40,25	23,02	16,73	39,75	1,25
2,00	42,10	23,59	17,91	41,50	1,42
1,16	33,49	3,07	29,06	32,13	4,08
0,84	33,53	1,05	32,03	33,08	1,34
0,59	32,99	1,39	31,15	32,54	1,36
0,42	32,96	3,99	28,14	32,13	2,50
Combinada	40,80	19,62	20,18	39,80	2,45

Figura 17. Curva de volatilidad de diesel a 25°C



5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos del análisis del panorama nacional de derrames de hidrocarburos evidenciaron diferencia respecto al estudio desarrollado por Miranda y Restrepo en el 2005, donde se estimaba que el 70% de derrames afectaban cuerpos de agua dulce, mientras que en los últimos 15 años (2004-2017) el recurso físico con mayor afectación fue suelo (85%) y no agua (30%). Además, las causas más frecuentes de derrames en los últimos años (2011-2017) se atribuyen a fallas mecánicas o técnicas (40%) y no al terrorismo (13%).
- Se registró durante el periodo de estudio que el volumen total de hidrocarburos vertidos fue aproximadamente 3,6 millones de barriles, con 6374 casos y mayor incidencia en la etapa de producción (51%).
- Para el material evaluado, no se evidenció una relación directa entre el tamaño de grano y el rendimiento de adsorción de hidrocarburo; puesto que fue el tamaño de grano intermedio (1,16mm) el que presentó la mayor capacidad de adsorción de agua e hidrocarburo.
- De acuerdo con los parámetros contemplados en la norma ASTM F726-06 se evidenció que no necesariamente el material de mejor adsorción es el más adecuado, puesto que además debe ser capaz de mantenerse sobre la lámina de agua. En el caso de estudio, a pesar de que el tamaño de grano grueso (4,75 mm) presentó uno de los menores rendimientos de adsorción, fue el único que mantuvo flotabilidad superior o igual al 90% y por tanto sería el único apto para aplicación en una contingencia.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas experimentales utilizando otros materiales adsorbentes y diferentes productos de hidrocarburos para su uso en la remoción y recuperación de aceites en las etapas finales de limpieza.
- Evaluar la cinética de adsorción con el fin de establecer el tiempo de saturación de los materiales y determinar un tiempo óptimo de contacto hidrocarburo-adsorbente.
- Adelantar trabajos de investigación para la búsqueda de tratamientos que permitan mejorar la flotabilidad de materiales que presentan una alta capacidad de adsorción.
- Proponer acciones de mejora para los planes de contingencia con el fin de efectuar mantenimiento y control constante de los equipos para la prevención de derrames de hidrocarburos debido a fallas mecánicas o técnicas causa de mayor afectación de este tipo de incidentes.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. LOZANO P, Nelly Patricia. Biorremediación de ambientes contaminados con petróleo. *Tecnogestión*. 2005, Volumen 1, Número 1.
- [2]. BENAVIDEZ LOPEZ DE MESA, Joaquín. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *Nova*, junio de 2016, Vol. 4, No 5.
- [3]. 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. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-571>
- [4]. MICHEL Jacqueline, SHIGENAKA Gary, HOFF Rebecca. *Oil Spill Response and Cleanup Techniques*. Seattle: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1992.
- [5]. CAÑIZALES TORRES Christian Andrés, REY CALA Julián Ricardo. *Remediación de derrames de hidrocarburos utilizando la tecnología de nano partículas*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [6]. CARVAJAL ORTIZ Luis Enrique; JARA GUTIERREZ Fredy. *Aspectos técnicos sobre derrames de crudo*. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2005
- [7]. THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED. *Uso de materiales adsorbentes en la respuesta a derrames de hidrocarburos*. Londres, UK, 2011.

- [8]. FATE AND EFFECTS OF SPILLED OIL. General Oil Spill Response Plan. Septiembre 1999, section 4, p.1-18.
- [9]. THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre. Maryland: 24 octubre del 2011.
- [10]. OVERSTREET R, GALT J.A. Physical processes affecting the movement and spreading of oils in inland waters. Chicago: The U.S. Environmental Protection Agency, Region V, September 1995.
- [11]. THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED. Destino de los derrames de hidrocarburos en el medio marino. Londres, UK, 2011.
- [12]. IBARRA MOJICA Diana Marcela. Metodología para evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2017
- [13]. LA ASOCIACIÓN DE LA INDUSTRIA GLOBAL DEL PETRÓLEO Y DEL GAS PARA CUESTIONES MEDIOAMBIENTALES Y SOCIALES IPIECA; ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE PRODUCTORES DE PETRÓLEO Y GAS IOGP. Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina. Londres: 2015.
- [14]. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS. Spills of Diluted Bitumen from Pipelines: A Comparative Study of Environmental Fate, Effects, and Response. Washington: Committee on the Effects of Diluted Bitumen on the Environment Board on Chemical Sciences and Technology Division on Earth and Life Studies, 2016.

- [15]. FATE AND EFFECTS OF SPILLED OIL. General Oil Spill Response Plan. September 1999, pag. 1-18.
- [16]. WESTERN CANADA MARINE RESPONSE CORPORATION. The Basics of Marine Oil Spill Response.
- [17]. FINGAS, Merv. Behaviour of oil in the environment and spill modelling. Chapter 8.
- [18]. Transportation Research Board and National Research Council. 2003. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10388>.
- [19]. THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED. Oil Spill Response-Experience, Trends and Challenges. 2001
- [20]. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. Seattle: U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. 2013
- [21]. ALASKA DEPT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION; U.S. COAST GUARD SEVENTEENTH DISTRICT. In Situ Burning Guidelines for Alaska. Alaska: August 2008.
- [22]. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Response to Hazardous Substance Releases.(En línea). Disponible en <https://www.epa.gov/emergency-response/epas-response-techniques>.
- [23]. ALASKA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION. Oil Spill Dispersants.

- [24]. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Oil Types. [En línea]. Disponible en: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/oil-types.htm>.
- [25]. THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED. Uso de dispersantes para el tratamiento de derrames de hidrocarburos. Londres, UK, 2011.
- [26]. BEHNOD Reza, et al. Application of Natural Sorbents in Crude Oil Adsorption. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, Vol. 2 (2013), No. 4, pp. 01-11.
- [27]. ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents. West Conshohocken: ASTM F726-06.
- [28]. ISMAIL, A.S. Preparation and Evaluation of Fatty-Sawdust as a Natural Biopolymer for Oil Spill Sorption. Chemistry Journal (2015), Vol. 05, Issue 5, 80-85.
- [29]. MARTINEZ NODAL, Pastora de la Concepción. Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos. Villa Clara: Universidad Central de Las Villas, 2013.
- [30]. SALAZAR HERNÁNDEZ Elizabeth. Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula. San Luis de Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Agosto 2012.
- [31]. ORTIZ GONZALES, D.P, et al. Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C. Colombia.

- [32]. ARDILA SUAREZ, Carolina; CARREÑO JEREZ, Silvia Juliana. Aprovechamiento de la cáscara de mazorca de cacao como adsorbente. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [33]. Méndez-Tovar, Marcela; Machado-Soberanes, J.A. y Guerra Sánchez, R. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de hidrocarburos sobre cinco materiales adsorbentes tipo II utilizando un método estandarizado internacional. Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 27, núm. 2, julio-diciembre, 2012, pp. 94-100.
- [34]. REATEGUI D.R; HERNANDEZ D.E.H; SANTANA R.M.C. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de compuestos de pp/harina de madera y de sus componentes. Cuiabá: CBECIMAT, 09 al 13 de noviembre de 2014.
- [35]. JADHAV A.S, et al. Study of adsorbtion of oil from oily water using human hair. Pune: International Journal of Advanced Engineering Technology, April-June, 2011, Vol.II, Issue II, p.37-51.
- [36]. VLAEV L, et al. Cleanup of water polluted with crude oil or diesel fuel using rice husks ash. [En línea]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. November 2011. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107011000319>.
- [37]. CERVANTES LEZAMA C, et al. Capacidad de retención de hidrocarburos empleando subproductos industriales. Manzanillo: Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 8, p.21-29, 2012.
- [38]. JIMENEZ VILLADIEGO, María Elvira; PADILLA GONZALES, Gustavo Adolfo. Evaluación del potencial de adsorción del aserrín para remover aceites pesados en cuerpos de agua a escala laboratorio. Cartagena de Indias, D.T y C: Universidad de Cartagena, 2012.

[39]. . ANNUNCIADO T.R, SYDENSTRICKER T.H.D, AMICO S.C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. [En línea]. Marine Pollution Bulletin, November 2005. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X05002018>

BIBLIOGRAFIA

ARDILA SUAREZ, Carolina; CARREÑO JEREZ, Silvia Juliana. Aprovechamiento de la cáscara de mazorca de cacao como adsorbente. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.

ANNUNCIADO T.R, SYDENSTRICKER T.H.D, AMICO S.C. Experimental investigation of various vegetable fibers as sorbent materials for oil spills. [En línea]. Marine Pollution Bulletin, November 2005. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025326X05002018>

ALASKA DEPT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION; U.S. COAST GUARD SEVENTEENTH DISTRICT. In Situ Burning Guidelines for Alaska. Alaska: August 2008

ALASKA DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL CONSERVATION. Oil Spill Dispersants

ASTM INTERNATIONAL. Standard Test Method for Sorbent Performance of Adsorbents. West Conshohocken: ASTM F726-06.

BENAVIDEZ LOPEZ DE MESA, Joaquín. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. Nova, junio de 2016, Vol. 4, No 5.

BEHNOD Reza, et al. Application of Natural Sorbents in Crude Oil Adsorption. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, Vol. 2 (2013), No. 4, pp. 01-11.

CAÑIZALES TORRES Christian Andrés, REY CALA Julián Ricardo. Remediación de derrames de hidrocarburos utilizando la tecnología de nano partículas. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2014.

CARVAJAL ORTIZ Luis Enrique; JARA GUTIERREZ Fredy. Aspectos técnicos sobre derrames de crudo. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2005

CERVANTES LEZAMA C, et al. Capacidad de retención de hidrocarburos empleando subproductos industriales. Manzanillo: Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 8, p.21-29, 2012.

FATE AND EFFECTS OF SPILLED OIL. General Oil Spill Response Plan. Septiembre 1999, section 4, p.1-18.

FATE AND EFFECTS OF SPILLED OIL. General Oil Spill Response Plan. September 1999, pag. 1-18.

IBARRA MOJICA Diana Marcela. Metodología para evaluación de vulnerabilidad ambiental ante derrames de hidrocarburos en ríos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2017

ISMAIL, A.S. Preparation and Evaluation of Fatty-Sawdust as a Natural Biopolymer for Oil Spill Sorption. Chemistry Journal (2015), Vol. 05, Issue 5, 80-85.

JADHAV A.S, et al. Study of adsorbtion of oil from oily water using human hair. Pune: International Journal of Advanced Engineering Technology, April-June, 2011, Vol.II, Issue II, p.37-51.

JIMENEZ VILLADIEGO, María Elvira; PADILLA GONZALES, Gustavo Adolfo. Evaluación del potencial de adsorción del aserrín para remover aceites pesados en

cuerpos de agua a escala laboratorio. Cartagena de Indias, D.T y C: Universidad de Cartagena, 2012.

LOZANO P, Nelly Patricia. Biorremediación de ambientes contaminados con petróleo. Tecnogestión. 2005, Volumen 1, Número 1.

LA ASOCIACIÓN DE LA INDUSTRIA GLOBAL DEL PETRÓLEO Y DEL GAS PARA CUESTIONES MEDIOAMBIENTALES Y SOCIALES IPIECA; ASOCIACIÓN INTERNACIONAL DE PRODUCTORES DE PETRÓLEO Y GAS IOGP. Impactos de los derrames de hidrocarburos sobre la ecología marina. Londres: 2015.

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. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2005-1-571>

MICHEL Jacqueline, SHIGENAKA Gary, HOFF Rebecca. Oil Spill Response and Cleanup Techniques. Seattle: National Oceanic and Atmospheric Administration.

MARTINEZ NODAL, Pastora de la Concepción. Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos. Villa Clara: Universidad Central de Las Villas, 2013

MÉNDEZ-Tovar, Marcela; MACHADO-Soberanes, J.A. y Guerra Sánchez, R. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de hidrocarburos sobre cinco materiales adsorbentes tipo II utilizando un método estandarizado internacional. Tecnología, Ciencia, Educación, vol. 27, núm. 2, julio-diciembre, 2012, pp. 94-100.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. Seattle: U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. 2013

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Oil Types. [En línea]. Disponible en: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/oil-types.htm>.

OVERSTREET R, GALT J.A. Physical processes affecting the movement and spreading of oils in inland waters. Chicago: The U.S. Environmental Protection Agency, Region V, September 1995.

ORTIZ GONZALES, D.P, et al. Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C. Colombia

REATEGUI D.R; HERNANDEZ D.E.H; SANTANA R.M.C. Estudio comparativo de la capacidad de adsorción de compuestos de pp/harina de madera y de sus componentes. Cuiabá: CBECIMAT, 09 al 13 de noviembre de 2014.

SALAZAR HERNÁNDEZ Elizabeth. Remoción de hidrocarburos mediante biopolímeros naturales: efecto del tamaño de partícula. San Luis de Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Agosto 2012

THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED. Uso de materiales adsorbentes en la respuesta a derrames de hidrocarburos. Londres, UK, 2011.

THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre. Maryland: 24 octubre del 2011.

THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED.
Destino de los derrames de hidrocarburos en el medio marino. Londres, UK, 2011.

THE NATIONAL ACADEMIES PRESS. Spills of Diluted Bitumen from Pipelines: A Comparative Study of Environmental Fate, Effects, and Response. Washington: Committee on the Effects of Diluted Bitumen on the Environment Board on Chemical Sciences and Technology Division on Earth and Life Studies, 2016.

Transportation Research Board and National Research Council. 2003. Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10388>.

THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED.
Oil Spill Response-Experience, Trends and Challenges. 2001

THE INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION GENERATION LIMITED.
Uso de dispersantes para el tratamiento de derrames de hidrocarburos. Londres, UK, 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Response to Hazardous Substance Releases.(En línea). Disponible en <https://www.epa.gov/emergency-response/epas-response-techniques>.

VLAEV L, et al. Cleanup of water polluted with crude oil or diesel fuel using rice husks ash. [En línea]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. November 2011. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107011000319>.

WESTERN CANADA MARINE RESPONSE CORPORATION. The Basics of Marine Oil Spill Response.G

ANEXOS

Anexo A. Información detallada “Análisis de derrames de hidrocarburos en Colombia (2004-2017)”.

Tabla A.1. Ubicación de los departamentos en los mapas

BOLIVAR	1	RISARALDA	17
BOYACA	2	SANTANDER	18
CALDAS	3	SUCRE	19
CAQUETÁ	4	TOLIMA	20
CAUCA	5	VALLE DEL CAUCA	21
CESAR	6	ARAUCA	22
CÓRDOBA	7	CASANARE	23
CUNDINAMARCA	8	PUTUMAYO	24
CHOCÓ	9	SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA	25
HUILA	10	AMAZONAS	26
GUAJIRA	11	GUAINIA	27
MAGDALENA	12	GUAVIARE	28
META	13	VAUPÉS	29
NARIÑO	14	VICHADA	30
NORTE DE SANTANDER	15	ANTIOQUIA	31
QUINDIO	16	ATLANTICO	32

Tabla A. 2. Número total de casos reportados por departamento

DEPARTAMENTO	N° DE CASOS	GUAJIRA	13
AMAZONAS	0	HUILA	148
ANTIOQUIA	828	MAGDALENA	57
ARAUCA	68	META	270
ATLÁNTICO	21	NARIÑO	418
BOLÍVAR	89	NORTE DE SANTANDER	734
BOYACÁ	240	PUTUMAYO	1000
CALDAS	30	QUINDIO	0
CAQUETÁ	13	RISARALDA	42
CASANARE	303	SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0
CAUCA	6	SANTANDER	1456
CESAR	136	SUCRE	47
CHOCÓ	0	TOLIMA	120
CÓRDOBA	4	VALLE DEL CAUCA	202
CUNDINAMARCA	127	VAUPÉS	0
GUAINÍA	0	VICHADA	2
GUAVIARE	0	TOTAL	6374

Tabla A.3. Número total de casos reportados por año.

AÑO	CASOS TOTALES	2011	590
2004	94	2012	683
2005	296	2013	873
2006	310	2014	974
2007	189	2015	806
2008	340	2016	562
2009	379	2017	6
2010	352	TOTAL	6454

Tabla A.4. Volumen total de hidrocarburos derramados por departamento.

DEPARTAMENTO	VOLUMEN DERRAMADO (bbls)	VOLUMEN TOTAL ANUAL (bbls)
AMAZONAS	0,00	0,00
ANTIOQUIA	30.152,16	2.153,73
ARAUCA	118.941,42	8.495,82
ATLANTICO	2.146,66	153,33
BOGOTÁ	0,00	0,00
BOLÍVAR	25.916,98	1.851,21
BOYACÁ	42.630,25	3.045,02
CALDAS	19.814,10	1.415,29
CAQUETÁ	110,66	7,90
CASANARE	12.925,05	923,22
CAUCA	45,55	3,25
CESAR	14.257,63	1.018,40
CHOCÓ	0,00	0,00
CÓRDOBA	5.070,57	362,18
CUNDINAMARCA	474.946,68	33.924,76
GUAINIA	0,00	0,00
GUAVIARE	0,00	0,00
HUILA	3.451,00	246,50
LA GUAJIRA	141,00	10,07
MAGDALENA	2.537,93	181,28
META	22.424,28	1.601,73
NARIÑO	147.870,45	10.562,17
NORTE DE SANTANDER	465.663,41	33.261,67
PUTUMAYO	305.533,71	21.823,84
QUINDIO	0,00	0,00
RISARALDA	3.390,32	242,17
SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0	0

Continuación Tabla A.4. Volumen total de hidrocarburos derramados por departamento.

SANTANDER	93.885,23	6.706,09
SUCRE	1.045,86	74,70
TOLIMA	1.793.719,64	128.122,83
VALLE DEL CAUCA	19.678,75	1.405,62
VAUPES	0,00	0,00
VICHADA	295,00	21,07
TOTAL	3.606.594,28	257.613,88

Tabla A.5. Volumen de productos derramados por departamento.

Departamento \ Tipo de aceite	Aceite tipo 1 (bbls)	Aceite tipo 2 (bbls)	Aceite tipo 3 (bbls)	Aceite tipo 4 (bbls)	Aguas de proceso (bbls)	Fluidos de proceso (bbls)	Gas (bbls)	Otros (bbls)	No indica (bbls)
AMAZONAS	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ANTIOQUIA	7.883,27	9.814,10	6.593,41	3,8	5.355,70	20,52	1,6	4,77	475
ARAUCA	0	0	118.875,05	0	66,37	0	0	0	0
ATLÁNTICO	103,74	2,42	2.000,00	0	0	0	40	0,5	0
BOLÍVAR	205,16	12.569,36	11.411,00	1.186,03	61,3	0	447,12	32	5
BOYACÁ	459,79	964,26	39.385,28	2,25	557,67	5	1.256,00	0	0
CALDAS	2.811,50	11.999,07	4.996,00	0	0	0	7,53	0	0
CAQUETÁ	0	0,24	110,3	0	0,12	0	0	0	0
CASANARE	45,91	17,42	5.126,11	0	7.245,70	415,08	0	74,82	0
CAUCA	0	0	20	0	25,55	0	0	0	0
CESAR	0	2.947,68	6.884,69	2.902,00	315,22	0,7	0	1.186,83	20,52
CHOCÓ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CÓRDOBA	0	0	5.069,07	0	1,5	0	0	0	0
CUNDINAMARCA	1.152,02	6.272,24	19.603,08	0	5	0	446.956,84	957,5	0
GUAINÍA	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Continuación Tabla A.5. Volumen de productos derramados por departamento.

GUAVIARE	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GUAJIRA	0	118	22	0	1	0	0	0	0
HUILA	84	624,63	483,81	120,93	2.135,21	2,42	0	0	0
MAGDALENA	30,59	2.125,87	81,17	3,5	0	0	0	291,8	5
META	2,02	5.676,92	5.372,82	110,43	8.448,49	417,91	2.293,32	89,38	13
NARIÑO	0	1,5	143.755,90	0	4.003,05	0	0	0	110
NORTE DE SANTANDER	21,1	0,24	457.627,69	0	7.531,04	479,27	0,57	1,2	2,3
PUTUMAYO	0	3.583,06	274.356,34	0	27.413,84	0,98	36,1	15,86	127,53
QUINDIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RISARALDA	1.541,60	1.502,57	110,1	0	0	0	236,05	0	0
SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SANTANDER	8.883,26	20.489,91	50.071,55	792,12	0	14,16	7.408,38	5.630,36	595,48
SUCRE	0	0	53,51	984,16	8,19	0	0	0	0
TOLIMA	5.426,80	6.327,43	536,41	0	0	201	1.781.188,00	0	40
VALLE DEL CAUCA	8.372,24	7.483,40	13,35	166,33	691,28	0	2.098,14	2	852
VAPUÉS									
VICHADA	0	295	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	28.371,04	69.465,18	974.293,90	5.079,47	57.825,19	1.531,51	2.240.224,94	8.249,75	1.765,83

Tabla A.6. Volumen de diesel derramado por departamento

DEPARTAMENTO	VOLUMEN DE DIESEL DERRAMADO (bbls)	GUAJIRA	118
AMAZONAS	0	HUILA	624,63
ANTIOQUIA	9.814,10	MAGDALENA	2.125,87
ARAUCA	0	META	5.676,92
ATLÁNTICO	2,42	NARIÑO	1,5
BOLÍVAR	12.569,36	NORTE DE SANTANDER	0,24
BOYACÁ	964,26	PUTUMAYO	3.583,06
CALDAS	11.999,07	QUINDIO	0
CAQUETÁ	0,24	RISARALDA	1.502,57
CASANARE	17,42	SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0

Continuación Tabla A.6. Volumen de diesel derramado por departamento

CAUCA	0	SANTANDER	20.489,91
CESAR	2.947,68	SUCRE	0
CHOCÓ	0	TOLIMA	6.327,43
CÓRDOBA	0	VALLE DEL CAUCA	7.483,40
CUNDINAMARCA	6.272,24	VAUPÉS	0,00
GUAINÍA	0	VICHADA	295
GUAVIARE	0	TOTAL	69.465,18

Tabla A.7. Costos totales y anuales de contingencia por departamento

DEPARTAMENTO	COSTO TOTAL (\$COP)	COSTO TOTAL ANUAL (\$COP)
AMAZONAS	0	0
ANTIOQUIA	4.026.719.585,77	287.622.827,55
ARAUCA	12.598.741.556,00	899.910.111,14
ATLÁNTICO	1.740.169.463,00	124.297.818,79
BOLÍVAR	5.350.273.383,00	382.162.384,50
BOYACÁ	7.765.679.826,00	554.691.416,14
CALDAS	1.318.939.366,00	94.209.954,71
CAQUETÁ	0	0
CASANARE	3.069.176.606,00	219.226.900,43
CAUCA	320.000,00	22.857,14
CESAR	14.262.512.113,00	1.018.750.865,21
CHOCÓ	0	0
CÓRDOBA	2.688.700,00	192.050,00
CUNDINAMARCA	12.844.410.355,12	917.457.882,51
GUAINÍA	0	0
GUAVIARE	0	0
GUAJIRA	1.581.986.000,00	112.999.000,00
HUILA	2.307.189.154,60	164.799.225,33
MAGDALENA	2.381.362.903,00	170.097.350,21
META	6.498.651.178,79	464.189.369,91
NARIÑO	37.053.532.539,95	2.646.680.895,71
NORTE DE SANTANDER	44.001.924.619,00	3.142.994.615,64
PUTUMAYO	99.923.126.476,86	7.137.366.176,92
QUINDIO	0	0
RISARALDA	674.946.500,66	48.210.464,33
SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0	0

Continuación Tabla A.7. Costos totales y anuales de contingencia por departamento

SANTANDER	28.003.240.358,96	2.000.231.454,21
SUCRE	3.462.123.016,00	247294501,14
TOLIMA	7.085.007.575,00	506.071.969,64
VALLE DEL CAUCA	3.392.468.936,00	242.319.209,71
VAUPÉS	0	0
VICHADA	98.540.409,00	7.038.600,64
TOTAL	299.443.730.621,71	21.388.837.901,55

Tabla A.8 Causas de derrames de hidrocarburos por departamento

Causa Dpto.	Acción de terceros	Falla mecánica o técnica	Operacional	Incidente natural	Terrorismo	Sin información
AMAZONA	0	0	0	0	0	0
ANTIOQUIA	250	525	26	16	3	8
ARAUCA	7	4	0	1	54	2
ATLÁNTICO	6	10	2	1	1	1
BOLÍVAR	40	35	7	1	3	3
BOYACÁ	39	163	13	6	13	6
CALDAS	13	4	4	6	0	3
CAQUETÁ	1	4	2	0	6	0
CASANARE	12	203	61	9	4	14
CAUCA	3	2	1	0	0	0
CESAR	85	33	7	3	3	5
CHOCÓ	0	0	0	0	0	0
CÓRDOBA	1	1	1	0	0	1
CUNDINAMARCA	34	16	61	8	2	6
GUAINÍA	0	0	0	0	0	0
GUAVIARE	0	0	0	0	0	0
GUAJIRA	3	3	2	0	5	0
HUILA	26	100	17	3	2	0
MAGDALENA	32	12	7	4	0	2
META	24	151	66	17	2	10
NARIÑO	304	11	2	9	85	7
NORTE DE SANTANDER	335	160	13	63	149	14
PUTUMAYO	290	184	22	15	475	14
QUINDIO	0	0	0	0	0	0

Continuación Tabla A.8 Causas de derrames de hidrocarburos por departamento

RISARALDA	37	1	0	1	1	2
SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0	0	0	0	0	0
SANTANDER	452	852	33	91	9	19
SUCRE	20	21	3	0	0	3
TOLIMA	64	27	12	6	5	6
VALLE DEL CAUCA	181	6	9	0	3	3
VAUPÉS	0	0	0	0	0	0
VICHADA	0	0	2	0	0	0
TOTAL	2259	2528	373	260	825	129

Tabla A.9 Afectación sobre recursos físicos, bióticos y socioeconómicos por departamento

DEPARTAMENTO \ RECURSO	Físico			Biótico		Socioeconómico		
	Suelo	Agua	Aire	Flora	Fauna	Cultivos	Propiedad Privada	Comunidad
AMAZONAS	0	0	0	0	0	0	0	0
ANTIOQUIA	789	305	24	216	11	6	149	18
ARAUCA	67	15	5	44	0	1	19	5
ATLÁNTICO	18	5	0	6	0	0	3	2
BOLÍVAR	65	32	3	34	3	0	8	6
BOYACÁ	219	43	15	95	2	1	74	6
CALDAS	21	17	11	12	0	2	6	5
CAQUETÁ	0	0	0	10	4	0	4	0
CASANARE	262	86	2	113	0	1	44	2
CAUCA	6	3	0	3	0	0	1	0
CESAR	119	52	1	66	1	8	12	2
CHOCÓ	0	0	0	0	0	0	0	0
CÓRDOBA	2	4	0	2	2	0	0	2
CUNDINAMARCA	96	56	7	46	0	6	29	20
GUAINÍA	0	0	0	0	0	0	0	0
GUAVIARE	0	0	0	0	0	0	0	0
GUAJIRA	12	2	0	8	1	0	1	5

Continuación Tabla A.9 Afectación sobre recursos físicos, bióticos y socioeconómicos por departamento

HUILA	0	0	0	129	49	2	51	0
MAGDALENA	42	25	1	21	1	7	7	4
META	224	67	1	110	4	5	25	6
NARIÑO	368	200	24	235	1	4	34	22
NORTE DE SANTANDER	647	236	24	244	7	14	105	52
PUTUMAYO	899	508	87	413	29	12	265	81
QUINDIO	0	0	0	0	0	0	0	0
RISARALDA	39	24	19	16	2	6	3	6
SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0	0	0	0	0	0	0	0
SANTANDER	1248	736	49	421	10	17	269	26
SUCRE	37	11	1	19	0	0	1	0
TOLIMA	95	32	5	32	1	8	24	7
VALLE DEL CAUCA	170	77	17	60	11	35	5	12
VAUPÉS	0	0	0	0	0	0	0	0
VICHADA	1	2	0	1	0	0	0	0
TOTAL	5446	2538	296	2356	139	135	1139	289

Tabla A.10 Etapas del proceso afectas por departamento

ETAPA DEPARTAMENTO	EXPLORACIÓN	PRODUCCIÓN	TRANSPORTE	REFINACIÓN	SIN INFORMACIÓN
AMAZONAS	0	0	0	0	0
ANTIOQUIA	1	696	128	0	2
ARAUCA	0	13	55	0	0
ATLÁNTICO	0	2	19	0	0
BOLÍVAR	0	42	45	0	2
BOYACÁ	2	144	91	0	3
CALDAS	0	1	29	0	0
CAQUETÁ	8	4	1	0	0
CASANARE	43	179	78	0	1
CAUCA	0	4	2	0	0
CESAR	6	22	105	0	2

Continuación Tabla A.10 Etapas del proceso afectas por departamento

CHOCÓ	0	0	0	0	0
CÓRDOBA	0	1	2	0	1
CUNDINAMARCA	0	7	117	0	3
GUAINÍA	0	0	0	0	0
GUAVIARE	0	0	0	0	0
GUAJIRA	0	0	13	0	0
HUILA	0	86	57	0	5
MAGDALENA	0	7	48	0	2
META	38	153	76	0	3
NARIÑO	1	4	413	0	0
NORTE DE SANTANDER	4	537	189	2	2
PUTUMAYO	3	307	677	0	13
QUINDIO	0	0	0	0	0
RISARALDA	0	0	42	0	0
SAN ANDRES Y PROVIDENCIA	0	0	0	0	0
SANTANDER	1	1011	373	61	10
SUCRE	0	3	44	0	0
TOLIMA	0	44	75	0	1
VALLE DEL CAUCA	0	1	201	0	0
VAUPÉS	0	0	0	0	0
VICHADA	1	0	1	0	0
TOTAL	108	3266	2864	82	50

Tabla A.11 Escenarios de derrames de hidrocarburos

ETIQUETAS	CAUSA	ETAPA DE OPERACIÓN	RECURSO AFECTADO	CANTIDAD
111	ACCIÓN DE TERCEROS	EXPLORACIÓN	FÍSICO	6
113	ACCIÓN DE TERCEROS	EXPLORACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	1
121	ACCIÓN DE TERCEROS	PRODUCCIÓN	FÍSICO	445
123	ACCIÓN DE TERCEROS	PRODUCCIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	162
124	ACCIÓN DE TERCEROS	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO	5
125	ACCIÓN DE TERCEROS	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	84

Continuación Tabla A.11 Escenarios de derrames de hidrocarburos

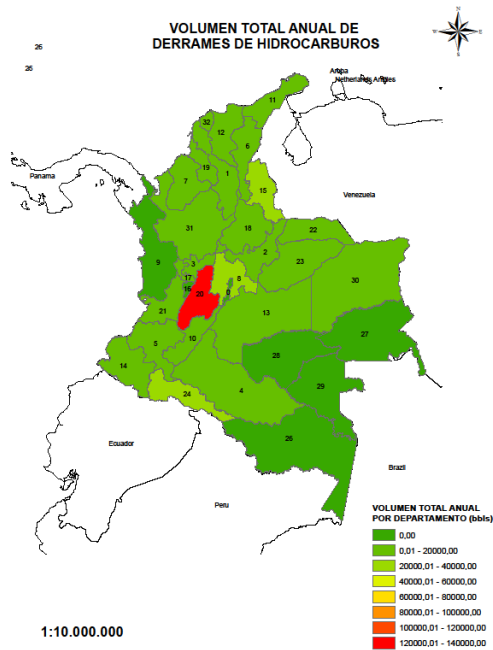
127	ACCIÓN DE TERCEROS	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	56
131	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	FÍSICO	681
132	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	BIÓTICO	3
133	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	FÍSICO+BIÓTICO	495
134	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO	10
135	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	105
136	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+BIÓTICO	3
137	ACCIÓN DE TERCEROS	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	130
141	ACCIÓN DE TERCEROS	REFINACIÓN	FÍSICO	2
211	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	EXPLORACIÓN	FÍSICO	38
213	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	EXPLORACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	22
215	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	EXPLORACIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	3
217	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	EXPLORACIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	3
221	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	FÍSICO	1120
222	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	BIÓTICO	5
223	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	473
224	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO	9
225	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	301
226	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+BIÓTICO	1
227	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	157
231	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	TRANSPORTE	FÍSICO	141
232	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	TRANSPORTE	BIÓTICO	2
233	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	TRANSPORTE	FÍSICO+BIÓTICO	72
234	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO	3
235	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	38
237	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	46
241	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	REFINACIÓN	FÍSICO	30
243	FALLA MECÁNICA O TÉCNICA	REFINACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	3
311	OPERACIONAL	EXPLORACIÓN	FÍSICO	10
313	OPERACIONAL	EXPLORACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	5
315	OPERACIONAL	EXPLORACIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	1
317	OPERACIONAL	EXPLORACIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	2
321	OPERACIONAL	PRODUCCIÓN	FÍSICO	47
323	OPERACIONAL	PRODUCCIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	17
324	OPERACIONAL	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO	1
325	OPERACIONAL	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	18

Continuación Tabla A.11 Escenarios de derrames de hidrocarburos

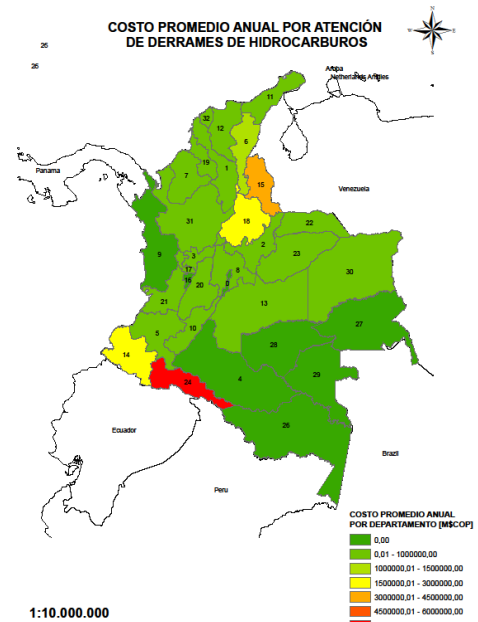
327	OPERACIONAL	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	5
331	OPERACIONAL	TRANSPORTE	FÍSICO	100
332	OPERACIONAL	TRANSPORTE	BIÓTICO	1
333	OPERACIONAL	TRANSPORTE	FÍSICO+BIÓTICO	55
334	OPERACIONAL	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO	2
335	OPERACIONAL	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	40
337	OPERACIONAL	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	43
341	OPERACIONAL	REFINACIÓN	FÍSICO	2
411	INCIDENTE NATURAL	EXPLORACIÓN	FÍSICO	3
413	INCIDENTE NATURAL	EXPLORACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	2
415	INCIDENTE NATURAL	EXPLORACIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	1
421	INCIDENTE NATURAL	PRODUCCIÓN	FÍSICO	89
422	INCIDENTE NATURAL	PRODUCCIÓN	BIÓTICO	2
423	INCIDENTE NATURAL	PRODUCCIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	32
424	INCIDENTE NATURAL	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO	3
425	INCIDENTE NATURAL	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	21
427	INCIDENTE NATURAL	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	9
431	INCIDENTE NATURAL	TRANSPORTE	FÍSICO	32
433	INCIDENTE NATURAL	TRANSPORTE	FÍSICO+BIÓTICO	10
435	INCIDENTE NATURAL	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	9
437	INCIDENTE NATURAL	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	5
441	INCIDENTE NATURAL	REFINACIÓN	FÍSICO	19
443	INCIDENTE NATURAL	REFINACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	5
511	TERRORISMO	EXPLORACIÓN	FÍSICO	1
513	TERRORISMO	EXPLORACIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	2
515	TERRORISMO	EXPLORACIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	1
521	TERRORISMO	PRODUCCIÓN	FÍSICO	49
523	TERRORISMO	PRODUCCIÓN	FÍSICO+BIÓTICO	25
525	TERRORISMO	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	17
527	TERRORISMO	PRODUCCIÓN	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	17
531	TERRORISMO	TRANSPORTE	FÍSICO	209
532	TERRORISMO	TRANSPORTE	BIÓTICO	2
533	TERRORISMO	TRANSPORTE	FÍSICO+BIÓTICO	178
534	TERRORISMO	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO	4
535	TERRORISMO	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO	72
537	TERRORISMO	TRANSPORTE	SOCIOECONÓMICO+FÍSICO+BIÓTICO	200

Anexo B. Mapas temáticos “Análisis de derrames de hidrocarburos en Colombia (2004-2017)”

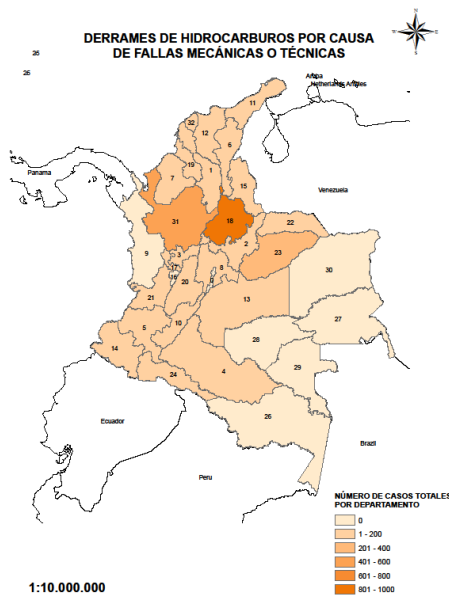
Figura B.1. Volumen total anual, Costo total anual, Fallas mecánicas o técnicas y Acción de terceros.



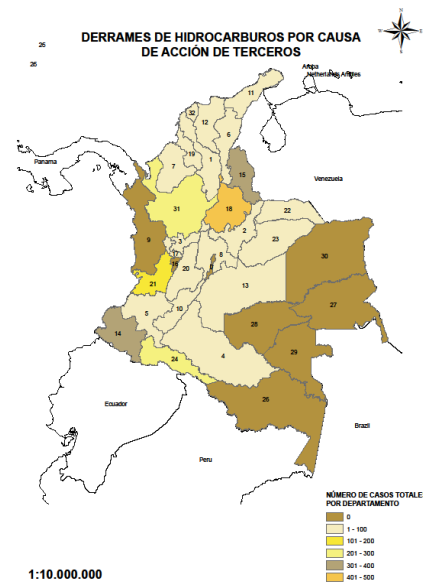
(a) Volumen total anual de derrames de hidrocarburos por departamento.



(b) Costo promedio anual de contingencia de derrames por departamento.

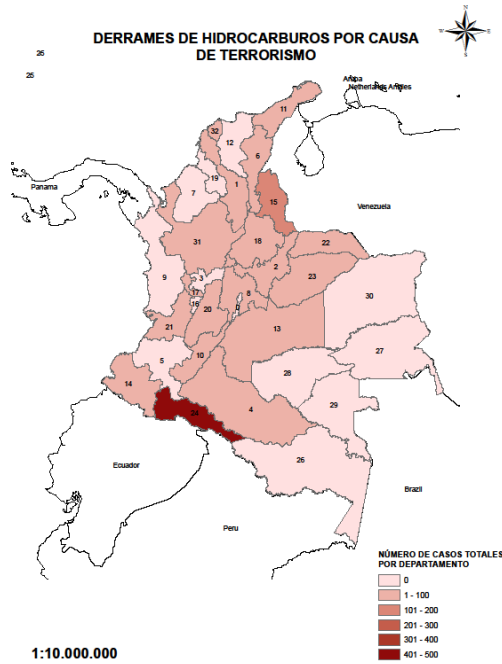


(c) Derrames de hidrocarburos por causa de fallas mecánicas o técnicas.

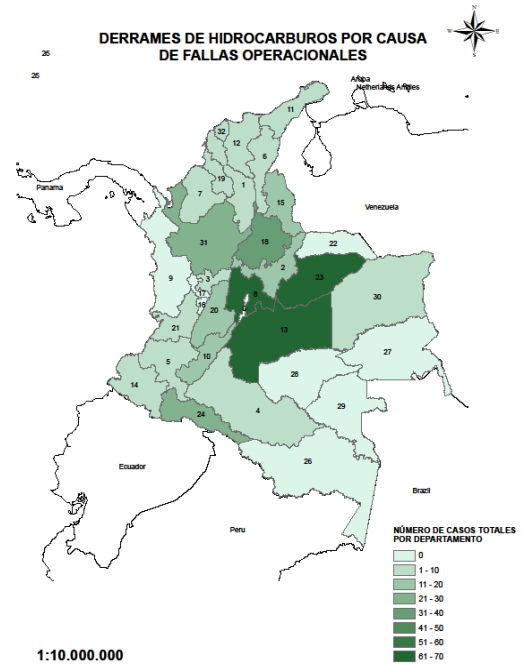


(d) Derrames de hidrocarburos por causa de acción de terceros.

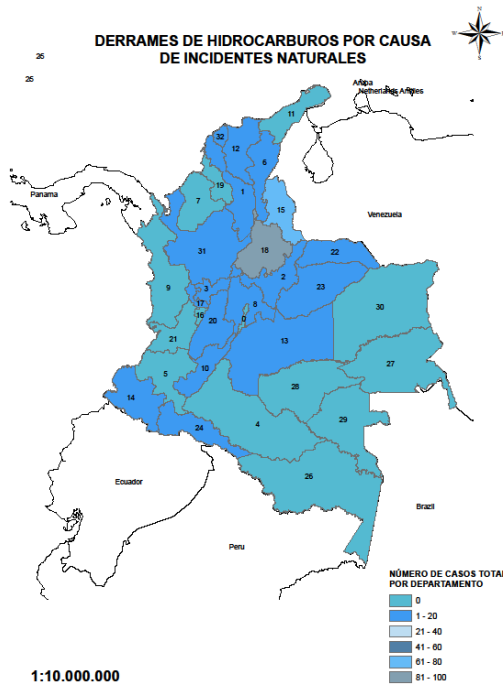
Figura B.2. Terrorismo, Fallas operacionales, Incidentes naturales y Exploración



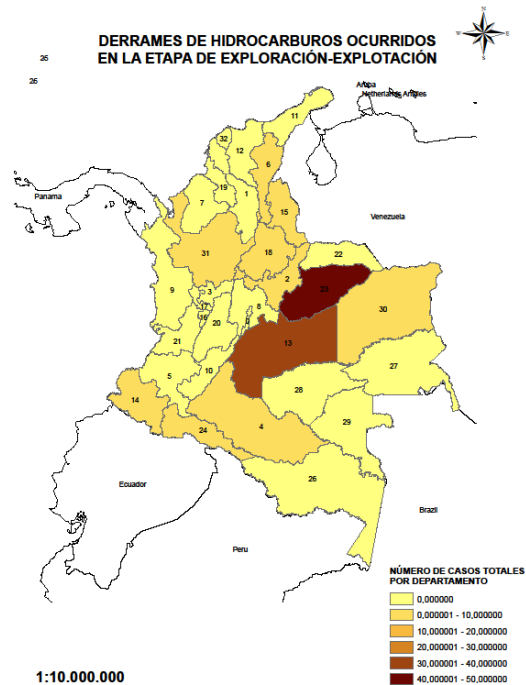
(a) Derrames de hidrocarburos por causa de terrorismo.



(b) Derrames de hidrocarburos por causa de fallas operacionales.

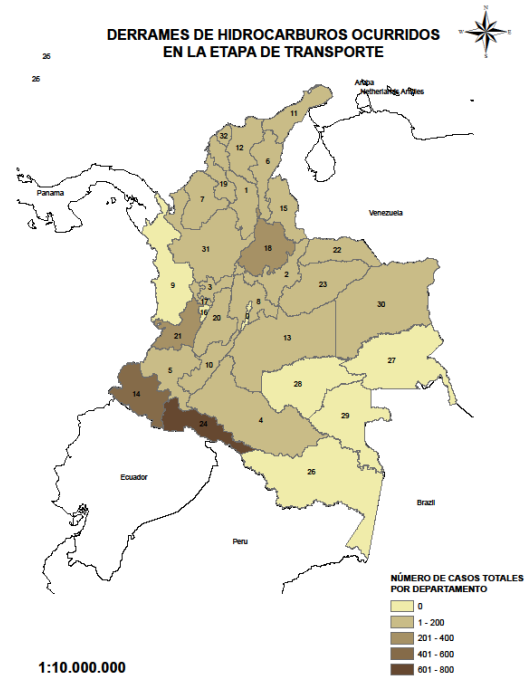
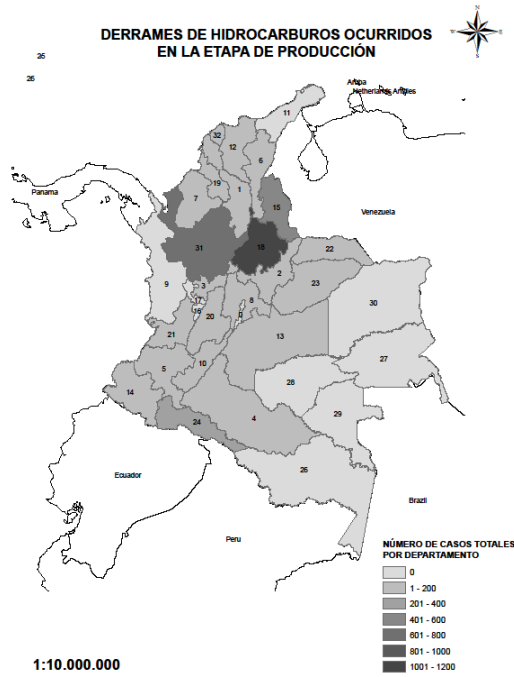


(c) Derrames de hidrocarburos por causa de incidentes naturales.



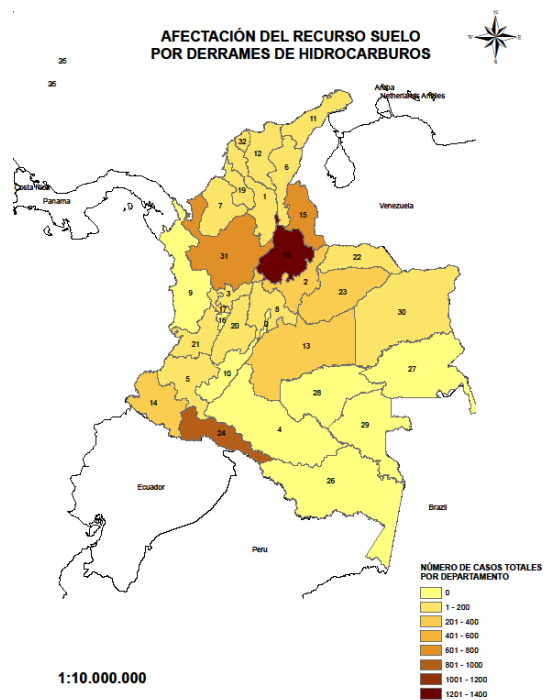
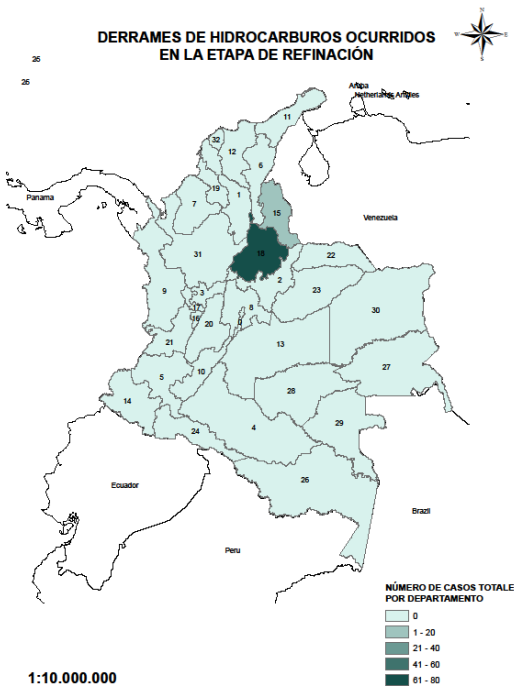
(d) Derrames de hidrocarburos ocurridos en la etapa de exploración-explotación.

Figura B.3. Producción, Transporte, Refinación y Suelo



(a) Derrames de hidrocarburos ocurridos en la etapa de producción.

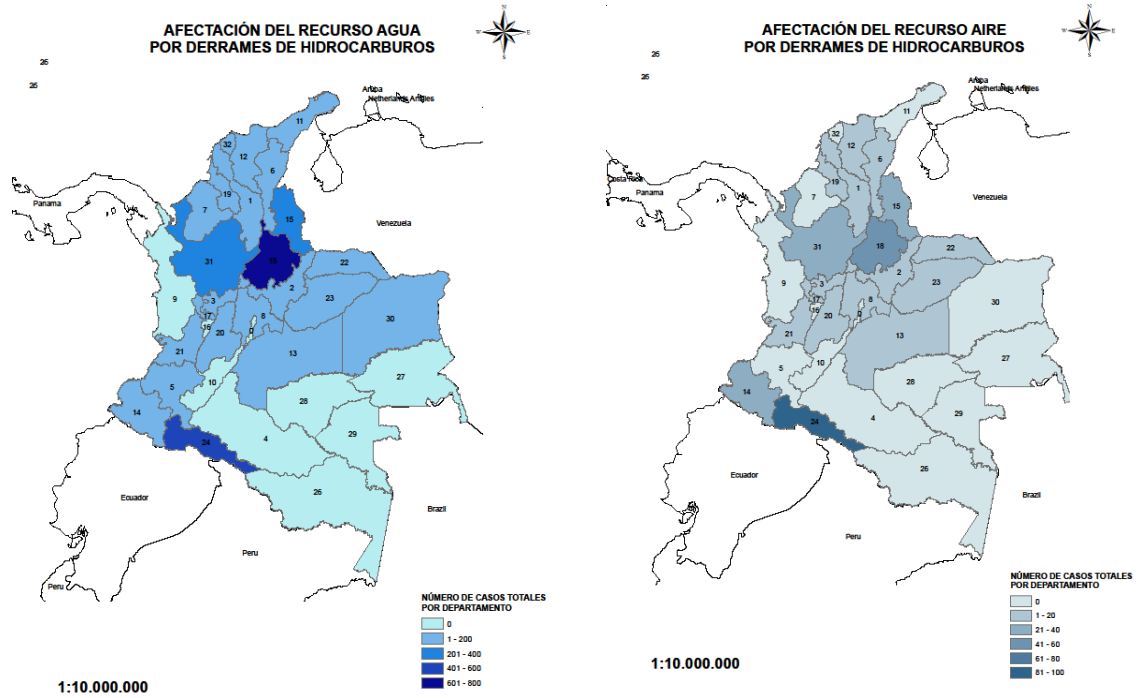
(b) Derrames de hidrocarburos ocurridos en la etapa de transporte.



(c) Derrames de hidrocarburos ocurridos en la etapa de refinación.

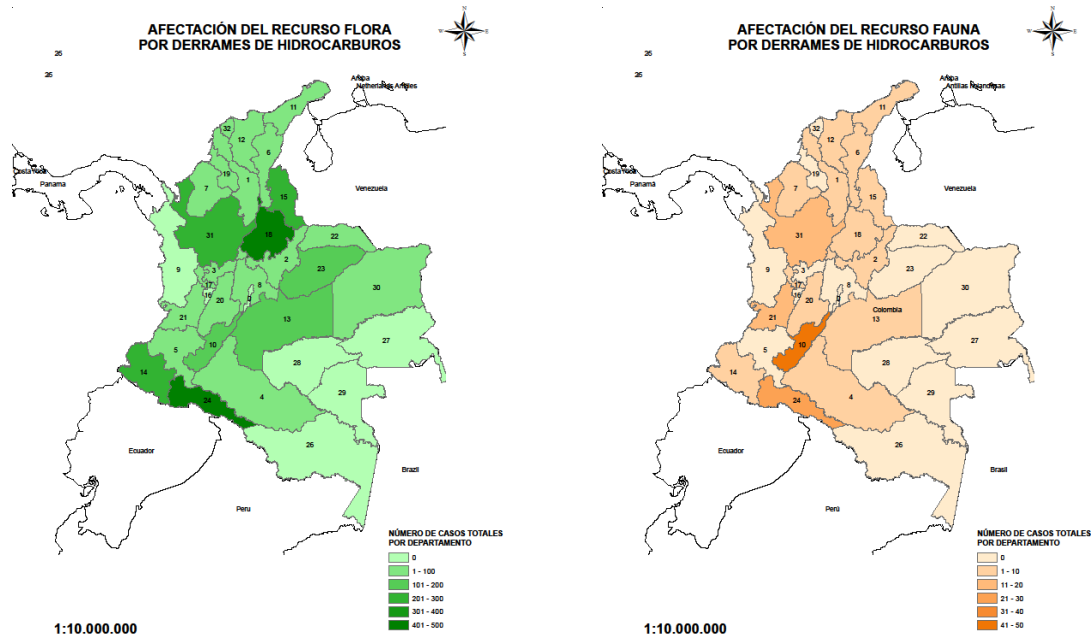
(d) Afectación del recurso suelo por derrames de hidrocarburos.

Figura B.4. Agua, Aire, Fauna y Flora



(a) Afectación del recurso agua por derrames de hidrocarburos.

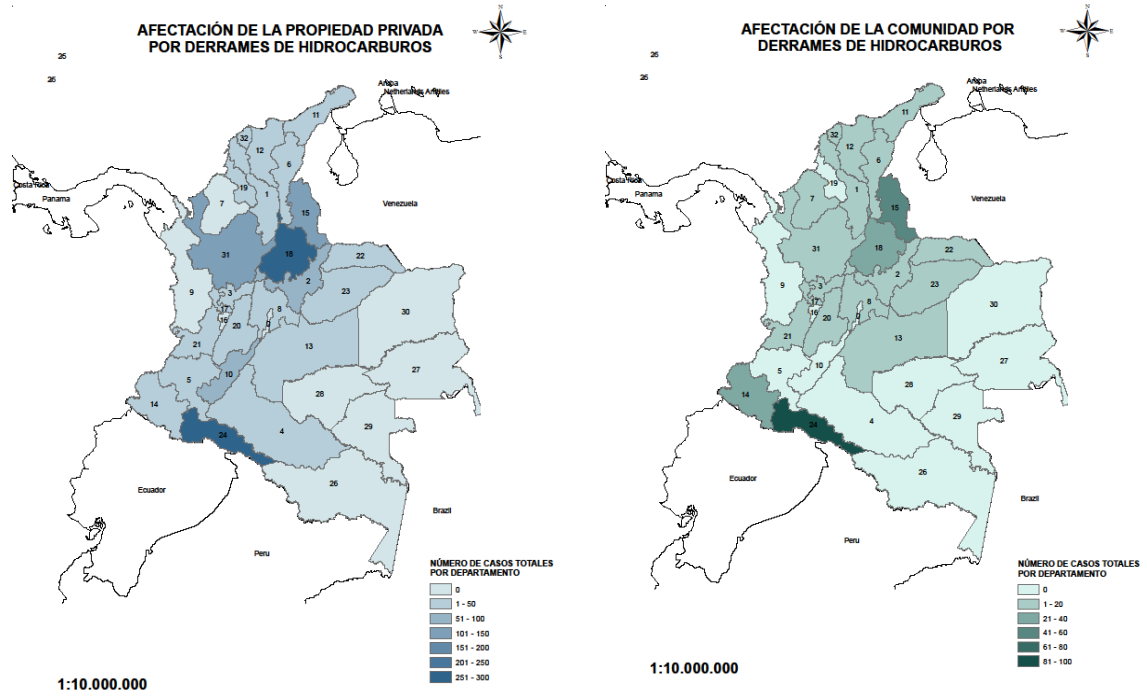
(b) Afectación del aire por derrames de hidrocarburos



(c) Afectación de flora por derrames de hidrocarburos.

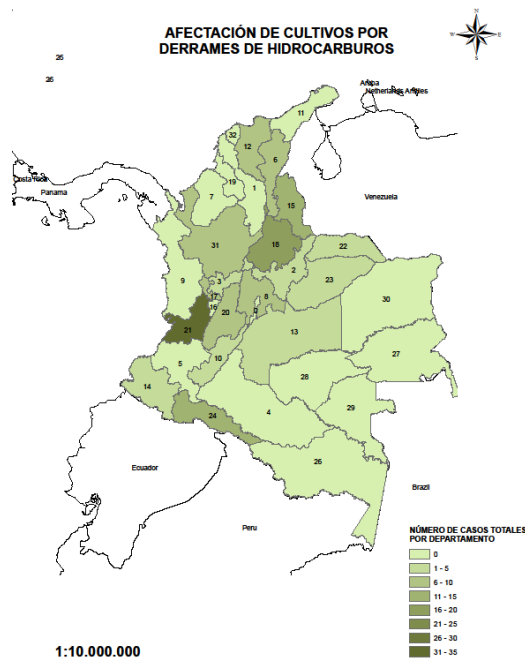
(d) Afectación de fauna por derrames de hidrocarburos.

Figura B.5. Propiedad Privada, Comunidad y Cultivos



(a) Afectación de la propiedad privada por derrames de hidrocarburos.

(b) Afectación a la comunidad por derrames de hidrocarburos.



(c) Afectación a los cultivos por derrames de hidrocarburos.

Anexo C. Registro de pruebas de adsorción en condiciones oleofílicas

Tabla C.1. Pruebas de adsorción de corta duración (15 min)

MALLA	PESO INICIAL DEL ADSORBENTE [g]	PESO DEL ADSORBENTE DESPUES DE LA PRUEBA [g]	PESO DE HIDROCARBURO RETIRADO POR EL ADSORBENTE [g]	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN [g/g]
4	4,28	19,60	15,33	3,58
	4,28	18,28	14,00	3,28
	4,27	19,10	14,83	3,47
8	4,09	17,04	12,95	3,17
	4,09	20,26	16,17	3,95
	4,09	20,97	16,88	4,13
10	4,11	23,89	19,79	4,82
	4,11	23,45	19,34	4,71
	4,10	24,96	20,85	5,08
16	4,81	35,62	30,81	6,40
	4,82	34,76	29,95	6,22
	4,82	33,92	29,10	6,04
20	8,27	39,57	31,30	3,78
	8,27	40,09	31,82	3,85
	8,28	39,25	30,97	3,74
30	8,29	41,41	33,12	3,99
	8,26	39,71	31,44	3,81
	8,27	40,23	31,96	3,86
40	8,27	38,64	30,37	3,67
	8,27	38,09	29,82	3,61
	8,27	37,61	29,33	3,55
COMBINADA	4,22	22,93	18,71	4,44
	4,21	24,18	19,97	4,75
	4,21	23,69	19,48	4,63

Tabla C. 2. Pruebas de adsorción de larga duración (24h)

MALLA	PESO INICIAL DEL ADSORBENTE [g]	PESO DEL ADSORBENTE DESPUES DE LA PRUEBA [g]	PESO DE HIDROCARBURO RETIRADO POR EL ADSORBENTE[g]	CAPACIDAD DE ADSORCIÓN [g/g]
4	4,27	21,67	17,39	4,07
	4,27	20,10	15,82	3,70
	4,27	19,02	14,75	3,45
8	4,09	21,72	17,63	4,31
	4,09	19,46	15,37	3,76
	4,10	21,28	17,19	4,19
10	4,11	21,83	17,73	4,32
	4,11	23,53	19,42	4,73
	4,11	20,69	16,58	4,04
16	4,81	33,34	28,53	5,93
	4,81	33,64	28,83	5,99
	4,81	34,64	29,83	6,20
20	8,27	40,23	31,96	3,86
	8,27	40,11	31,84	3,85
	8,27	40,57	32,29	3,90
30	8,27	39,15	30,88	3,74
	8,27	39,66	31,39	3,79
	8,27	39,44	31,17	3,77
40	8,26	35,99	27,73	3,36
	8,28	37,88	29,61	3,58
	8,26	35,34	27,08	3,28
COMBINADA	4,22	25,08	20,86	4,94
	4,20	24,29	20,08	4,78
	4,21	23,81	19,60	4,66