

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS  
FISICOQUÍMICAS AMBIENTALES Y DE HIDROCARBUROS, EN LA  
DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN RÍOS**

**LAURA PATRICIA PEÑUELA CARRILLO**

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

**2017**

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS  
FISICOQUÍMICAS AMBIENTALES Y DE HIDROCARBUROS, EN LA  
DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN RÍOS**

**LAURA PATRICIA PEÑUELA CARRILLO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**Crisóstomo Barajas Ferreira  
Ing. Químico, M. Sc.**

**Codirector:**

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

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

**2017**

## DEDICATORIA

*Dedicado a quienes son mi energía, mi luz y mis ganas de ser mejor cada día.*

*A ti papá por ser mi mejor guía y profesor de la vida, por enseñarme el camino correcto a través del ejemplo. Te admiro como a nadie más; por tu inteligencia y tu calidad humana, no existe otro ser humano como tú.*

*A ti mamá por tus inigualables cuidados, por tu comprensión y apoyo. Por ser ejemplo de tenacidad.*

*A ti Sebas, por enseñarme que todos podemos ser diferentes y auténticos. Quiero ser siempre un ejemplo para ti.*

*Ustedes son merecedores de mis logros y éxitos porque mi crecimiento personal es gracias a ustedes, que están conmigo siempre.*

*Finalmente, a quién desde el cielo me ve y sé que celebra mi logro. A ti nona Socorro, gracias por ser ejemplo de valentía y carácter, gracias porque sé que ahora me guías y me cuidas.*

**Laura**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente, a Dios por permitirme el privilegio de formarme como profesional y culminar con éxito esta etapa de mis estudios.

A mis padres, por la excelente educación, por apoyarme cuando lo necesité y celebrar junto a mí el cumplimiento de las pequeñas metas que hoy me permiten culminar mi carrera profesional.

A todos mis demás familiares por el amor y el apoyo brindado. Por las enseñanzas que día a día me han hecho una mejor persona.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira y mis codirectores Diana Ibarra y Crisóstomo Barajas Solano, por su guía, dedicación y tiempo entregado para la elaboración de este proyecto.

Al cuerpo docente de la escuela de Ingeniería química por entregar sus mayores esfuerzos para formarnos como profesionales con calidad ética y académica.

A Andrés, gracias por la compañía, la ayuda y el apoyo incondicional.

A mis compañeros de la vida, aquellos con los que he conocido el verdadero valor de la amistad. Gracias Paola, Ámbar, Diana, Gabriel y Ángela por los buenos momentos compartidos.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>13</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1. OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>16</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1. PROCESOS FISICOQUÍMICOS DE DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS DERRAMADOS EN CUERPOS DE AGUA</b> .....	<b>18</b>
2.1.1. Evaporación.....	19
2.1.2. Emulsificación.....	19
2.1.3. Dispersión.....	20
2.1.4. Esparcimiento.....	20
2.1.5. Cambios en las propiedades físico-químicas de los hidrocarburos.....	20
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>23</b>
<b>4.1. IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DEL PRODUCTO RELACIONADAS CON LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN AMBIENTES ACUÁTICOS</b> .....	<b>23</b>
<b>4.2. SELECCIÓN DE UNA HERRAMIENTA PARA EVALUAR EL EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS HIDROCARBUROS, EN LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN AMBIENTES ACUÁTICOS</b> .....	<b>25</b>
4.2.1. Software de simulación: Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS).....	27

<b>4.3. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS HIDROCARBUROS EN LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN RÍOS.....</b>	<b>30</b>
4.3.1. Diseño de escenarios de derrame para simulación.....	30
4.3.2. Simulación de escenarios de derrame con el software ADIOS. ....	32
4.3.3. Análisis de varianza (ANOVA).....	34
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>41</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>42</b>
<b>CITAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Variables de mayor influencia en la degradación de hidrocarburos derramados en cuerpos de agua. ....	23
<b>Tabla 2.</b> Evaluación de criterios de selección de herramienta de simulación. ...	26
<b>Tabla 3.</b> Ecuaciones principales del algoritmo de solución de ADIOS. ....	27
<b>Tabla 4.</b> Variables de entrada requeridas por ADIOS y respuestas entregadas tras la simulación del envejecimiento del crudo. ....	29
<b>Tabla 5.</b> Valores de entrada de condiciones meteorológicas e hidrológicas para Magdalena medio y Magdalena bajo. ....	31
<b>Tabla 6.</b> Condiciones de entrada del escenario No. 151 de Magdalena medio. ....	33
<b>Tabla 7.</b> Resultado de análisis ANOVA para la evaporación en Magdalena medio. ....	35
<b>Tabla 8.</b> Resumen de variables de entrada con efecto significativo sobre las variables de respuesta según análisis ANOVA. ....	35

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Procesos de transformación para una mancha de crudo derramado en ríos.....	19
<b>Figura 2.</b> Metodología general del proyecto.....	22
<b>Figura 3.</b> Diagrama de relaciones entre variables de entrada y variables de salida del algoritmo de ADIOS.....	29
<b>Figura 4.</b> Ubicación de estaciones climatológicas de IDEAM seleccionadas para la obtención de datos de entrada de los escenarios hipotéticos.....	31
<b>Figura 5.</b> Variación en el tiempo del porcentaje evaporado, dispersado y remanente para el escenario 151 de Magdalena medio.....	33
<b>Figura 6.</b> Perfiles de densidad del crudo, viscosidad del crudo y contenido de agua en emulsión del escenario 151 de Magdalena medio.....	34

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A: Modelos matemáticos de procesos fisicoquímicos de degradación de hidrocarburos derramados en cuerpos de agua. ....	53
Anexo B: Selección de valores de las variables de entrada. ....	56
Anexo C: Matriz de escenarios estocásticos.....	63
Anexo D: Tablas de análisis ANOVA. ....	67

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS AMBIENTALES Y DE HIDROCARBUROS, EN LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN RÍOS.

**AUTOR:** LAURA PATRICIA PEÑUELA CARRILLO. \*\*

**PALABRAS CLAVE:** HIDROCARBUROS, DERRAMES, DEGRADACIÓN, RÍOS

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la influencia de características fisicoquímicas ambientales y de los hidrocarburos en la degradación de estos cuando son vertidos en ríos. Se realizó una revisión de literatura que permitió identificar las principales características que tienen influencia en los modelos realizados por varios autores entre los años 1971 y 2002 para evaluar los procesos que producen la degradación de hidrocarburos. Posteriormente, se identificaron los modelos comúnmente usados para el análisis de derrames de hidrocarburos y se seleccionó el software Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS) como el más adecuado según los criterios de selección establecidos. La evaluación se realizó mediante el diseño estocástico de 256 posibles escenarios de derrame, incluyendo la variación de tres condiciones del derrame y cuatro características ambientales del lugar del derrame para dos puntos geográficos diferentes sobre la cuenca del río Magdalena. Los datos para las características del lugar del derrame fueron obtenidos de dos estaciones hidrológicas y dos estaciones meteorológicas del Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). Como resultado de la simulación de los escenarios, se obtuvieron perfiles de variación en el tiempo para el porcentaje de producto evaporado, dispersado y remanente, para el porcentaje de agua en la emulsión y para los cambios en la densidad y la viscosidad del crudo. Los valores de estas variables de respuesta fueron analizados mediante 12 análisis ANOVA, uno por cada variable de salida para cada lugar de evaluación, los cuales permitieron identificar al tipo de crudo, la temperatura y la velocidad del viento como las características con mayor influencia sobre los procesos de degradación de hidrocarburos. Adicionalmente, fue posible observar cómo la influencia de las características varía según los diferentes valores que estas presentan para cada lugar de evaluación.

---

\*Trabajo de grado.

\*\*Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectora: M. Sc. Diana Marcela Ibarra Mojica.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL AND HYDROCARBON PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS, IN THE DEGRADATION OF SPILLS IN RIVERS.\*

**AUTHOR:** LAURA PATRICIA PEÑUELA CARRILLO. \*\*

**KEY WORDS:** HIDROCARBUROS, DERRAMES, DEGRADACIÓN.

The objective of this work was to evaluate the influence of environmental and hydrocarbons physicochemical characteristics in the degradation of these when they are discharged into rivers. A literature review was carried out to identify the principal characteristics that influence the models developed by several authors between the years 1971 and 2002, to evaluate the processes that produce the degradation of hydrocarbons. Subsequently, the models commonly used for the analysis of oil spills were identified and the Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS) software was selected as the most appropriate according to the established selection criteria. The evaluation was carried out through the stochastic design of 256 possible spill scenarios, including the variation of three spill conditions and four environmental characteristics of the spill site for two different geographical points on the Magdalena River basin. The data for the characteristics of the spill site were obtained from two hydrological stations and two meteorological stations of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM). As a result of the simulation of the scenarios, variation profiles in the time were obtained for the percentage of evaporated, dispersed and remaining product, for the percentage of water in the emulsion and for changes in the density and viscosity of the crude. The values of these output variables were analyzed by 12 ANOVA analyzes, one for each output variable for each evaluation site, which allowed to identify the type of crude, the temperature and the wind speed as the characteristics with the greatest influence on the processes of hydrocarbon degradation. Additionally, it was possible to observe how the influence of the characteristics varies according to the different values that they present for each place of evaluation.

---

\*Bachelor thesis.

\*\*Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: M. Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira. Codirectora: M. Sc. Diana Marcela Ibarra Mojica.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria del petróleo se ha convertido en una amenaza para la conservación del medio ambiente. En Colombia, el sector de hidrocarburos representa un sector estratégico para la economía por su alta participación en el producto interno bruto durante los últimos años (5% en 2015) [1]. Los derrames de hidrocarburos son comunes durante sus procesos de transporte para refinamiento y comercialización; durante el 2015 fueron derramados 108.712 barriles de petróleo, en su mayor parte atribuidos a accidentes por fallas operativas y acciones de terceros [2]. Se conoce que para el año 2002, aproximadamente el 70% de los derrames de hidrocarburos en Colombia afectaban ríos y caños [3], por lo que un panorama global con las anteriores cifras supone escenarios de riesgo a largo plazo para las fuentes hídricas del país.

Una vez el hidrocarburo es derramado en el cuerpo de agua, su comportamiento depende en gran medida de las condiciones hidráulicas del mismo y las condiciones ambientales, las cuales afectan el desarrollo de los procesos advectivos y difusivos que determinan el desplazamiento de la mancha; y los procesos fisicoquímicos de degradación que producen cambios en las propiedades del hidrocarburo [4]. La descripción matemática de cada proceso involucra un alto nivel de complejidad para su desarrollo, además existe una estrecha interdependencia de los procesos de envejecimiento [5] que impide su tratamiento individual. Por tal motivo, diferentes autores han desarrollado modelos matemáticos para evaluar de forma unificada la evolución de los derrames como una herramienta de información para el diseño de planes de contingencia. El conocimiento del comportamiento probable de diferentes hidrocarburos derramados y las limitaciones que imponen sobre las operaciones de limpieza, resulta fundamental en la eficacia de dichos planes para la reducción del impacto ambiental sobre la fauna, flora y salud humana [5] [6].

A pesar de tener una alta incidencia de estos eventos en ríos, la mayoría de los modelos computacionales de derrame de petróleo han sido desarrollados para ambientes marinos [7]. En Colombia, Zapata et. al. desarrollaron en 2002 un modelo bidimensional para análisis de trayectoria de derrames en ríos, sin embargo, no se conoce una evaluación de las características más influyentes en la degradación de hidrocarburos derramados sobre ecosistemas acuáticos de este tipo utilizando productos nacionales.

En el presente trabajo se llevó a cabo la evaluación de la influencia de las características del medio ambiente y de las características físico-químicas de hidrocarburos nacionales, en la degradación de estos productos cuando son vertidos en ríos. Para esto se establecieron diferentes escenarios de derrame, tomando como base las condiciones meteorológicas e hidrológicas obtenidas de dos sectores del río Magdalena.

Haciendo uso del software Automated Data Inquiry for Oil Spills –ADIOS, desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration –NOAA, se simularon los escenarios establecidos previamente. Los resultados evidenciaron las características más determinantes en la intemperización del crudo y la variación de su influencia según los diferentes valores que estas presentan para cada lugar de evaluación.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia de características fisicoquímicas del medio ambiente y de hidrocarburos, en la degradación de derrames en ríos.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Identificar las principales características fisicoquímicas del medio ambiente y de los hidrocarburos, relacionadas con la degradación de derrames de estos productos en ambientes acuáticos.
2. Seleccionar una herramienta o metodología para evaluar la influencia de las características fisicoquímicas del medio ambiente y de hidrocarburos en la degradación de derrames en ecosistemas acuáticos.
3. Evaluar el efecto de diferentes características fisicoquímicas del medio ambiente y de hidrocarburos, en la degradación de estos en escenarios hipotéticos de derrames en un río.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El petróleo crudo está constituido por mezclas de diferentes hidrocarburos puros, acompañados por trazas de algunos metales como vanadio, níquel y cobre. Estos se encuentran formando parte de otros compuestos orgánicos que además contienen azufre, nitrógeno y oxígeno [8]. Se pueden distinguir dos grandes grupos según su estructura, estos son los hidrocarburos alifáticos (cadena abierta) y los hidrocarburos aromáticos (estructura cerrada) [9]. El petróleo puede hallarse en estado gaseoso o líquido. Este último puede variar desde liviano ( $^{\circ}\text{API} > 31,1$ ) hasta extra pesado ( $^{\circ}\text{API} > 10$ ).

Debido a la diversa composición del petróleo y por efecto de las condiciones meteorológicas e hidrológicas del lugar del derrame, una vez vertido en un cuerpo de agua, los productos atraviesan procesos de desplazamiento y degradación, siendo ésta última también conocida como envejecimiento o meteorización [10].

El modelado de los procesos de degradación de hidrocarburos derramados en ríos presenta problemas que no son típicos de los modelos para los océanos [11]. Sin embargo, en la literatura se pueden evidenciar algunos desarrollos para ríos, cómo el modelo de Tsalis en 1979 [12], el modelo Water Planning and Management Branch – WPMB, entregado por Fingas y Sydor en 1981 [7] y el modelo River Oil Spill Simulation - ROSS, del cual Chen y Yapa en 1993 [7] presentaron la última versión, ROSS3. Los modelos conservan en común el uso de un algoritmo lagrangiano de parcelas discretas y sus diferencias se encuentran en la cantidad de procesos de meteorización y de desplazamiento que incluyen. Adicionalmente, algunos desarrollaron modelos unidimensionales mientras que otros modelaron el derrame en dos capas, una para los procesos superficiales y otra para los procesos al interior de la columna de agua.

El primer y único estudio identificado para Colombia, es el realizado por Zapata et al. [3] en 2002. El desarrollo consiste en un modelo de computador (Colspill)

para simular el comportamiento físico de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua dulce.

Son numerosos los modelos que se han desarrollado durante los últimos años, estos varían en su complejidad, facilidad de utilización, acceso y aplicabilidad al medio estudiado. Entre estos se encuentran modelos comerciales de alto costo como Integrated Oil Spill Impact Model System (SYMAP) [13] y Chemical Discharge Modeling System (CHEMMAP) [5], ofrecidos por la compañía Applied Science Associates – ASA. Otros modelos de acceso libre como Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS) y General NOAA Operational Modeling Environment (GNOME) han sido desarrollados por la National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA.

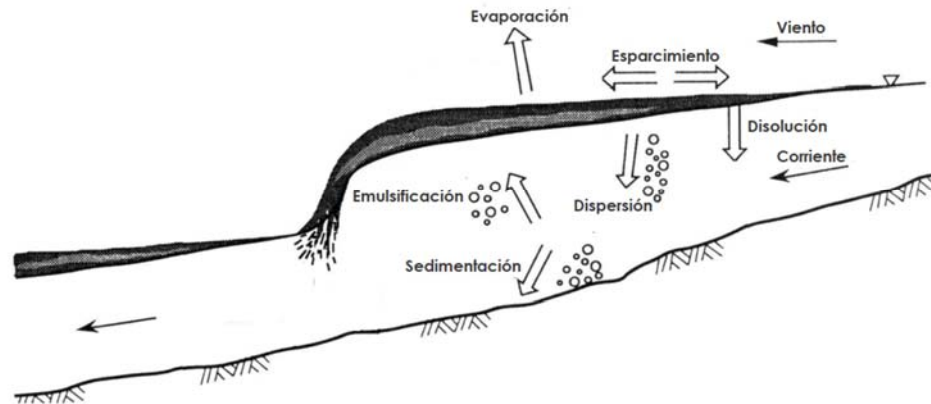
A continuación, se describen los principales procesos que se ven involucrados en la degradación de derrames de hidrocarburos en ambientes acuáticos.

## **2.1. PROCESOS FISICOQUÍMICOS DE DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS DERRAMADOS EN CUERPOS DE AGUA**

El vertimiento de un hidrocarburo sobre un cuerpo de agua produce la formación de una mancha superficial cuyo espesor y área dependerán de la cantidad de producto derramado [14] y de la forma en que el crudo es vertido en el cuerpo de agua [5]. Sobre la mancha se encuentran los compuestos más ligeros del crudo conformando una fase volátil que se evapora. Debajo de la capa superficial se forman dos fases, una soluble conformada por los compuestos aromáticos y heterocíclicos que pasan por disolución al agua [15] (se considera que el porcentaje de hidrocarburo disuelto no excede el 5% [14]) y una fase dispersa debida al transporte vertical de gotas de crudo entre la mancha y la columna de agua. Ésta última puede precipitarse al fondo por la adhesión del hidrocarburo a otros cuerpos (ver figura 1).

**2.1.1. Evaporación.** La evaporación ocurre inmediatamente después del derrame y su evolución depende en gran parte del espesor y área de la mancha formada [11]. Este proceso es considerado como la principal causa del desvanecimiento del petróleo durante un derrame [16], especialmente para los crudos livianos, los cuales alcanzan hasta un 40% de evaporación en 2 días [10]. La alta tasa de evaporación se da por la exposición de componentes volátiles a la temperatura ambiente. Sin embargo, se consideran otras pérdidas en forma de rocío debido al viento y a las fuerzas convectivas que provocan turbulencia en las corrientes [8].

**Figura 1.** Procesos de transformación para una mancha de crudo derramado en ríos.



**Fuente:** Adaptado de Chen y Yapa (1994) [7].

**2.1.2. Emulsificación.** De forma natural, la turbulencia tiende a mezclar el petróleo con el agua, formándose en ciertos casos una emulsión de agua en aceite. La emulsificación es un proceso físico-químico que da lugar a un aumento sustancial de la viscosidad aparente y del volumen de la capa superficial de crudo derramado debido al aumento del contenido de agua en la mancha. En ciertos casos, se alcanzan proporciones de agua en la mezcla del 80%, multiplicando el volumen de contaminante hasta 5 veces el volumen vertido inicial [15]. La formación de la emulsión requiere de la presencia de un agente surfactante que favorezca la dispersión estable crudo-agua. En el petróleo, los asfaltenos actúan como agentes surfactantes, encerrando las partículas de agua

con las cabezas aromáticas polares en su interior y las colas de cadena alifática en la fase del crudo [15].

**2.1.3. Dispersión.** La dispersión consiste en la disgregación de la mancha de crudo en gotas de diferentes tamaños que se introducen en la columna de agua y ocasionan la disminución del volumen de hidrocarburo sobre la superficie del agua [13]. La dispersión se presenta debido a la turbulencia de las corrientes [6], puesto que la formación de remolinos transporta materia, cantidad de movimiento y energía en forma de calor de un punto a otro. La difusividad de remolino depende de las propiedades del fluido, pero también de la velocidad y de la posición en la corriente [17]. La formación de las gotas más grandes se da debido a la presión dinámica del cuerpo de agua, mientras que la división de gotas pequeñas se produce por los esfuerzos viscosos, resultado de la interacción entre la corriente de agua y la superficie que delimita la mancha del hidrocarburo [18].

**2.1.4. Esparcimiento.** En las primeras etapas de un derrame de petróleo, las fuerzas mecánicas tales como fuerzas de inercia, gravedad, viscosidad y tensión superficial provocan una expansión significativa de la mancha de crudo. Adicionalmente, esta expansión se verá afectada por la fuerza de arrastre producida por el viento y la corriente de agua [15]. Estudios experimentales han mostrado que crudos viscosos se propagan más lentamente que crudos menos viscosos; y que el esparcimiento tiende a detenerse cuando la mancha se aproxima a un grosor terminal del orden de  $1 \pm 8$  mm [5].

**2.1.5. Cambios en las propiedades físico-químicas de los hidrocarburos.**

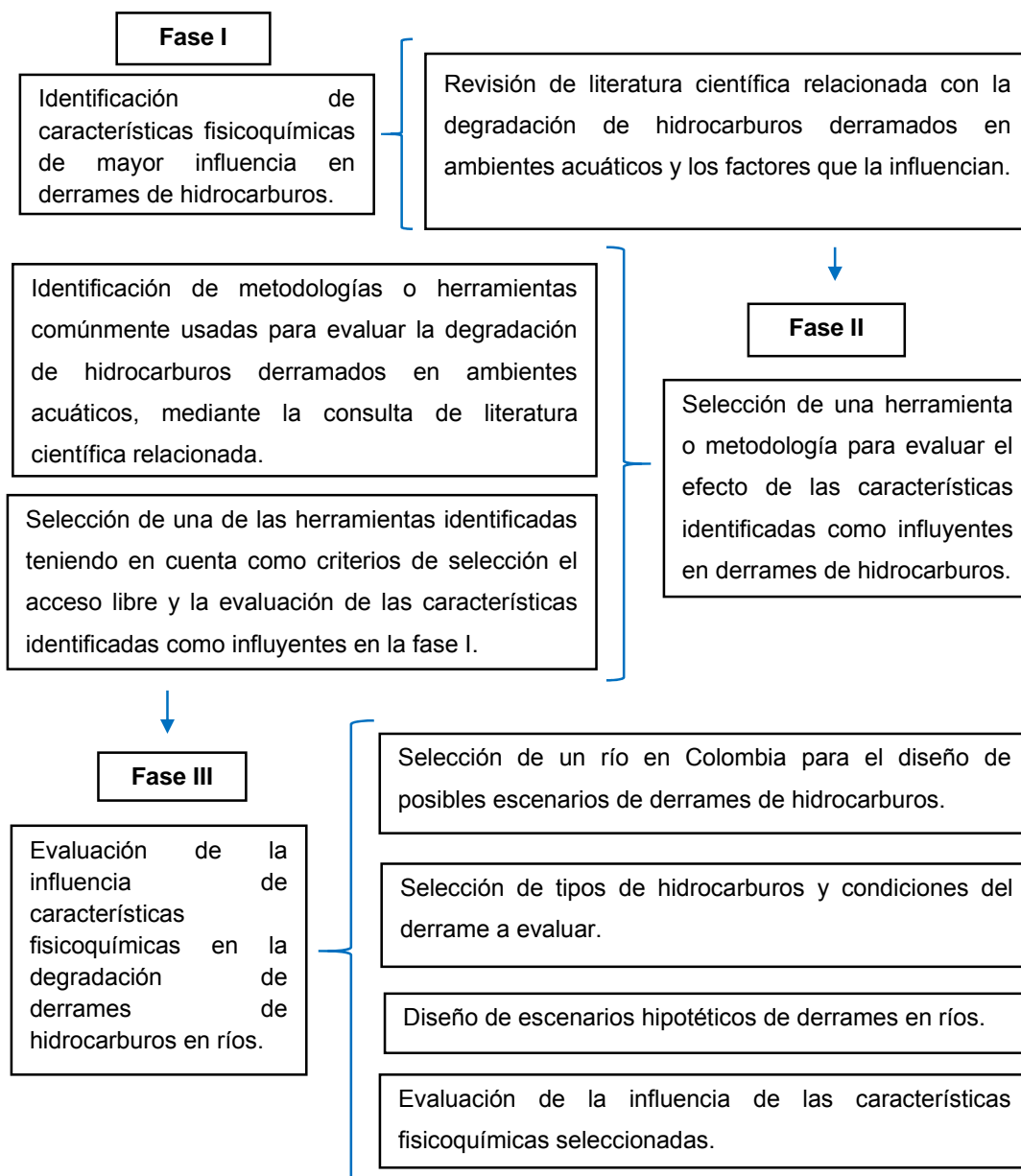
La viscosidad de un hidrocarburo tiene una variabilidad muy grande, pudiendo ir desde los pocos cSt en las gasolinas a los más de 100.000 cSt para productos muy viscosos semi-sólidos (fluidos no newtonianos). Los cambios en la viscosidad son debidos a la temperatura, a las pérdidas de componentes ligeros en la evaporación y al contenido de agua en la emulsión [19].

La densidad del crudo también aumenta como consecuencia de los procesos de degradación, sin embargo, su aumento no alcanza valores mayores al 15% [15]; la mayoría de los crudos y productos refinados son más ligeros que el agua pura, pero la incorporación de agua debida a la emulsión y la posible unión de esta mezcla con sedimentos hace que puedan llegar a precipitar al fondo.

### 3. METODOLOGÍA

En la figura 2 se describe la metodología general para el desarrollo del proyecto.

**Figura 2.** Metodología general del proyecto.



## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. IDENTIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DEL PRODUCTO RELACIONADAS CON LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN AMBIENTES ACUÁTICOS.

A continuación, en la tabla 1 se muestra el resultado de la revisión de literatura que permitió identificar las características fisicoquímicas del medio ambiente y de los hidrocarburos, que tienen influencia en la degradación de estos en ambientes acuáticos, según los trabajos publicados por diversos autores entre los años 1971 y 2002. En el Anexo A se presenta información general de los modelos propuestos por los autores relacionados en la tabla 1.

**Tabla 1.** Variables de mayor influencia en la degradación de hidrocarburos derramados en cuerpos de agua.

Proceso	Autor	Condiciones del lugar del derrame				Propiedades del hidrocarburo							Características del derrame		
		Temperatura	Velocidad del viento	Propiedades del agua	Velocidad del agua	Composición	Peso molecular	Densidad	Viscosidad	Presión de vapor	Coef. transf. de masa	Coef. tens. superficial	Solubilidad en agua	Área de la mancha	Volumen derramado
Evaporación	Stiver y Mackay (1984) (citado por Comerma, 2004 [15] y Afenyo et al., 2016 [13]).	X				X									X
	Reed et al. (1988) (citado por Betancourt, 2001 [14]).	X					X		X	X			X		
	Findicakis et al. (1993) (citado por Comerma, 2004 [15]).		X						X	X					

	Fingas (1996) (citado por Maslo et al., 2014 [20]).	X																
Dispersión	Mackay et al. (1980) (citado por Afenyo et al., 2016 [13]).		X	X					X			X						X
	Delvigne and Sweeney (1989) [21].	X	X		X	X	X	X	X									
	Huang (1984) (citado por Payne et al., 1987 [22]).		X															X
Esparcimiento	Fay (1971) (citado por Yapa et al., 1992 [4] y Wang et al., 2008 [23]).			X								X						X
	Stolzenbach et al. (1977) (citado por Wang et al., 2008 [4]).		X	X				X	X									X
	Mackay et al. (1980) (citado por Betancourt, 2001 [14]).													X				X
Disolución	Audunson (1979) (citado por Betancourt, 2001 [14]).		X															X
	Cohen et al. (1980) (citado por Yapa et al., 1992 [4]).										X	X	X					
Emulsificación	Mackay et al. (1980) (citado por Stronach y Hospital, 2014 [24]).		X			X		X	X									
	Ramussen (1985) (citado por Wang et al., 2005 [25]).		X															
Cambios en la densidad del crudo	Zapata et al. (2002) [3].	X				X		X										
	Mackay et al. (1980) (citado por Betancourt [14]).			X		X		X										

Cambios en la viscosidad del crudo	Zapata et al. (2002) [3].	X								X							
	Buchanan y Bommele, (1987) (citado por Wang et al., 2005 [25]).									X							

A partir de la tabla 1 se estableció que los factores más frecuentemente referenciados en la literatura, como los de mayor incidencia en la degradación de hidrocarburos, serían la velocidad del viento, el volumen derramado, la temperatura ambiente y la viscosidad del crudo fresco. La velocidad del agua y la solubilidad del hidrocarburo en agua serían las variables con menos referencias, siendo cada una contemplada por un solo autor. Por otra parte, vale la pena resaltar que autores como Reed et al. [5] destacan una fuerte influencia de la forma en que el crudo es vertido al agua, pues el comportamiento de la mancha es diferente para una descarga instantánea y una descarga continua.

**4.2. SELECCIÓN DE UNA HERRAMIENTA PARA EVALUAR EL EFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS HIDROCARBUROS, EN LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN AMBIENTES ACUÁTICOS.**

La revisión bibliográfica realizada en la fase I permitió identificar las variables que según la literatura tendrían mayor influencia sobre el envejecimiento de hidrocarburos derramados en cuerpos de agua; sin embargo, no se evidenció la magnitud de la influencia de cada una de estas en dicho proceso.

Se procedió entonces a seleccionar una herramienta software a través de la cual fuera posible evaluar la degradación de diferentes productos, para establecer numéricamente el nivel de influencia de cada factor en la degradación de los hidrocarburos vertidos en ambientes acuáticos.

Para la selección se llevó a cabo revisión de literatura científica, guías y manuales de software especializados; teniendo como criterios de selección final si el software es o no de acceso libre y si tenía en cuenta las características identificadas en la fase anterior, como influyentes en la degradación de derrames de hidrocarburos, tal como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2.** Evaluación de criterios de selección de herramienta de simulación.

<b>Modelo</b>	<b>Evaluación de características identificadas en fase I</b>	<b>Acceso libre</b>
Coastal Zone Oil Spill model (COZOIL)	SI	NO
Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures (MOTHY)	SI	NO
Integrated Oil Spill Impact Model System (SIMAP)	SI	NO
Oil Spill Model and Response System (OILMAP)	SI	NO
Chemical Discharge Modeling System (CHEMMAP)	SI	NO
Oill Spill Contingency and Response (OSCAR)	SI	NO
Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS)	SI	SI

Como resultado, se identificó a ADIOS, desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, como el único modelo que satisfizo los dos criterios de selección establecidos; puesto que además de ser de libre acceso, tiene en cuenta los procesos de evaporación, dispersión, esparcimiento y emulsificación de la mancha, los cuales fueron reportados como procesos de degradación importantes por los autores referenciados en la fase I.

Adicionalmente, autores como Lehr y otros (2002), afirman que ADIOS es el modelo de degradación más utilizado. Sus resultados han sido comparados con mediciones realizadas a aproximadamente 40 derrames pequeños y el modelo proporciona respuestas coherentes, por lo tanto sus resultados se consideran útiles para determinar posteriores decisiones de limpieza [26].

**4.2.1. Software de simulación: Automated Data Inquiry for Oil Spills (ADIOS).** ADIOS fue diseñado para ambientes marinos, sin embargo, permite ajustar la salinidad del agua (fresh water), por lo que puede ser adaptado a las condiciones de un río. En la tabla 3 se resumen las principales ecuaciones que describen los procesos de degradación del hidrocarburo en ADIOS.

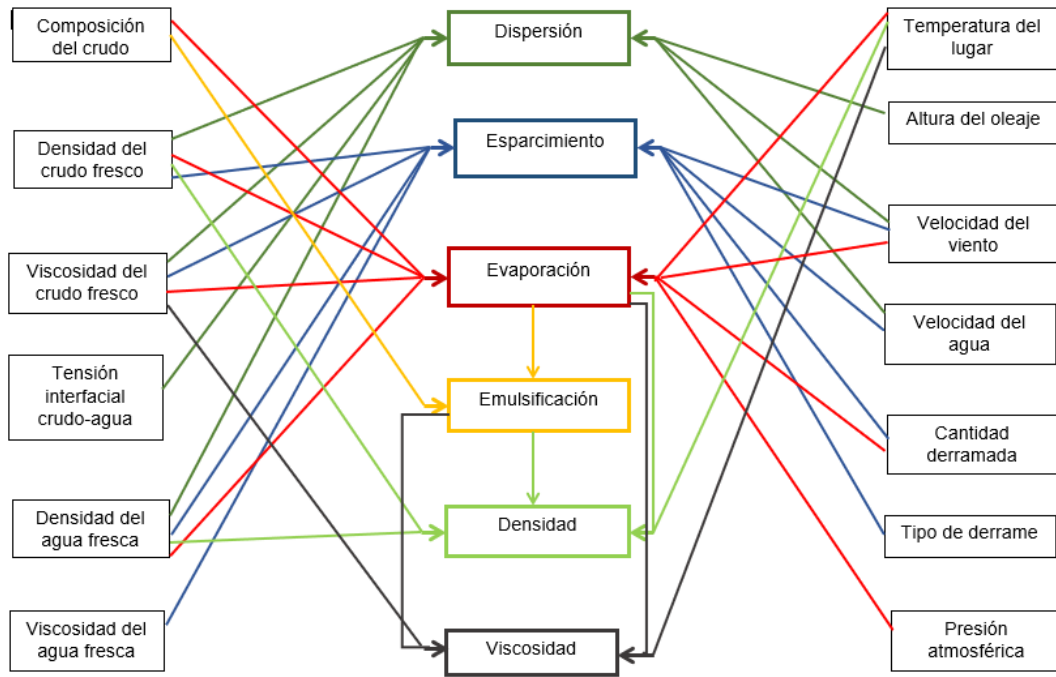
**Tabla 3.** Ecuaciones principales del algoritmo de solución de ADIOS.

Proceso o propiedad	Ecuación
Evaporación	<p>ADIOS usa el modelo de pseudo-componentes (PC), en el cual el crudo se divide en un número discreto de componentes según sus cortes de destilación. Estos son tratados como sustancias individuales que no interactúan entre sí. La tasa volumétrica de evaporación para cada PC es calculada así:</p> $\frac{dV}{dt} \propto \frac{U^3 V (P_v v f_m)_j}{d} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$ <p>Donde j representa cada PC, U es la velocidad del viento [<math>\text{m} \cdot \text{s}^{-1}</math>], V es el volumen de crudo vertido [<math>\text{m}^3</math>], <math>P_v</math> es la presión de vapor [Pa], v es el volumen molar relativo [<math>\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}</math>], <math>f_m</math> es la fracción molar y d es el espesor de la mancha [m].</p>
Dispersión	<p>El modelo calcula el arrastre vertical de gotas de crudo a la columna de agua mediante la ecuación:</p> $Q = C_{disp} D_e^{0.57} F_{bw} V_{disp} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$ <p>Donde <math>C_{disp}</math> es un parámetro determinado experimentalmente, <math>F_{bw}</math> es la fracción de ondas de choque por un periodo de onda y <math>V_{disp}</math> es el volumen de crudo arrastrado por unidad de volumen de agua [<math>\text{m}^3_{\text{crudo}} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{agua}}</math>].</p>
Esparcimiento	<p>La predicción del área de la mancha es realizada mediante el uso de elementos de Lagrange. El comportamiento individual de estos es producto de una suma vectorial que incluye la fuerza del viento, la velocidad del agua, las fuerzas gravitacionales-viscosas y la turbulencia de la corriente de agua. Adicionalmente, aproxima el coeficiente de difusión de por la fórmula:</p>

	$D \propto \left( \frac{\Delta\rho_w g V_0^2}{\sqrt{\nu_w}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{1}{\sqrt{t}} \text{ [s}^*\text{m}^{-2}\text{]} \text{ (3)}$ <p>Donde <math>\Delta\rho_w</math> es la densidad relativa agua-crudo, <math>g</math> es la aceleración gravitacional [<math>\text{m}^*\text{s}^{-2}</math>], <math>V_0</math> es el volumen derramado [<math>\text{m}^3</math>], <math>\nu_w</math> es la viscosidad cinemática del agua [<math>\text{m}^2*\text{s}^{-1}</math>] y <math>t</math> es el tiempo ocurrido desde el derrame [s].</p>
Emulsificación	<p>ADIOS calcula la fracción de agua contenida en la emulsión formada mediante la ecuación:</p> $Y = \frac{Sd_w}{6+Sd_w} \text{ (4)}$ <p>Donde <math>S</math> es el área interfacial crudo-agua [<math>\text{m}^2</math>] y <math>d_w</math> es el diámetro de las gotas de agua inmersas en la emulsión [m].</p>
Cambios en la densidad del crudo	$\rho = Y\rho_w + (1 - Y)\rho_{ref} [1 - c_1(T - T_{ref})(1 + c_2f_{evap})] \text{ [kg}^*\text{m}^{-3}\text{]} \text{ (5)}$ <p>Donde <math>\rho</math> es la densidad del crudo en la mancha, <math>\rho_w</math> es la densidad del agua [<math>\text{kg}^*\text{m}^{-3}</math>], <math>\rho_{ref}</math> es densidad de referencia [<math>\text{kg}^*\text{m}^{-3}</math>], <math>Y</math> es la fracción de agua en emulsión, <math>T</math> es la temperatura del agua [<math>^{\circ}\text{C}</math>], <math>T_{ref}</math> es temperatura de referencia [<math>^{\circ}\text{C}</math>], <math>f_{evap}</math> es la fracción de crudo evaporada y <math>C_1</math> y <math>C_2</math> son constantes empíricas del hidrocarburo.</p>
Cambios en la viscosidad del crudo	$v = v_{ref} \exp\left(C_{temp} \left( \frac{T_{ref}-T}{T_{ref} T} \right) + C_{evap} f_{evap} + \frac{C_{emul1} Y}{1-C_{emul2}} \right) \text{ [m}^2*\text{s}^{-1}\text{]} \text{ (6)}$ <p>Donde <math>v</math> es la viscosidad del crudo en la mancha, <math>v_{ref}</math> es la viscosidad del crudo fresco [<math>\text{m}^2*\text{s}^{-1}</math>], <math>T_{ref}</math> es temperatura de referencia [<math>^{\circ}\text{C}</math>], <math>T</math> es la temperatura del lugar del derrame [<math>^{\circ}\text{C}</math>], y <math>C_{emul1}</math>, <math>C_{emul2}</math> y <math>C_{evap}</math> son constantes experimentales propias del crudo.</p>

A partir de las ecuaciones se realizó el diagrama observado en la figura 3, el cual permite visualizar las relaciones entre las variables de entrada y las variables de salida, así como la interrelación existente entre los procesos fisicoquímicos de degradación y los cambios en las propiedades del hidrocarburo.

**Figura 3.** Diagrama de relaciones entre variables de entrada y variables de salida del algoritmo de ADIOS.



Finalmente en la tabla 4 se resumen los datos de entrada requeridos por ADIOS y las variables de respuesta que entrega el modelo.

**Tabla 4.** Variables de entrada requeridas por ADIOS y respuestas entregadas tras la simulación del envejecimiento del crudo.

Variables de entrada	Variables de salida
- Tipo de hidrocarburo.	- Porcentaje evaporado.
- Velocidad del viento [m/s].	- Porcentaje dispersado en la columna de agua.
- Dirección del viento <sup>1</sup> .	- Porcentaje remanente en la superficie.
- Altura de oleaje [m].	- Porcentaje de agua en la emulsión.
- Temperatura del cuerpo de agua [°C].	- Densidad [kg/m <sup>3</sup> ].
- Salinidad del cuerpo de agua [g/kg].	- Viscosidad [cSt].
- Carga de sedimentos del cuerpo de agua [mg/L].	
- Velocidad de la corriente de agua [m/s].	
- Tipo de derrame.	
- Cantidad derramada [Bbl].	

<sup>1</sup> ADIOS tiene en cuenta la influencia de la dirección del viento en el cálculo del área inicial de la mancha, la cual marca el tiempo cero para el inicio de los procesos de degradación en donde la dirección no vuelve a tener influencia. Teniendo en cuenta lo anterior, esta variable no fue evaluada entre las características del área de estudio.

### **4.3. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL MEDIO AMBIENTE Y DE LOS HIDROCARBUROS EN LA DEGRADACIÓN DE DERRAMES EN RÍOS.**

Teniendo en cuenta que el software seleccionado requiere información de características del ambiente y del hidrocarburo, y que se busca implementar la herramienta para su uso en ríos, se procedió a diseñar escenarios de simulación con datos base de un río de Colombia.

**4.3.1. Diseño de escenarios de derrame para simulación.** La selección del río se realizó teniendo en cuenta el riesgo de ser afectados por derrames de hidrocarburos. Se escogió el río Magdalena puesto que es la vía de transporte fluvial más importante del país [27] y en su cuenca se encuentra concentrada la segunda mayor producción anual de petróleo (192,84 Bbl por día) según datos reportados a 2011 por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) [28].

- Condiciones del área de estudio.

Se seleccionaron dos sectores de la cuenca del río Magdalena con el fin de obtener diferentes condiciones ambientales que permitieran evaluar el efecto de las mismas en la degradación de hidrocarburos. Los sectores corresponden a Magdalena medio y Magdalena bajo ya que son las zonas con mayor concentración de puertos fluviales [29].

La obtención de las condiciones hidrológicas y meteorológicas del río requeridas por ADIOS se obtuvieron de las estaciones meteorológicas e hidrológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicadas en el área de estudio, con información disponible entre los años 1943 y 2016. La estación meteorológica Cortissoz y la estación hidrológica Calamar proporcionaron los datos para los escenarios hipotéticos de Magdalena bajo, y la estación meteorológica Yarigués y la estación hidrológica Maldonado entregaron los datos para los escenarios hipotéticos de Magdalena medio (ver figura 4).

Para la temperatura, la velocidad del agua y la velocidad del viento se identificaron mínimos y máximos históricos alcanzados, los cuales se resumen en la tabla 5. La información detallada del tratamiento estadístico se encuentra consignada en el Anexo B.

**Figura 4.** Ubicación de estaciones climatológicas de IDEAM seleccionadas para la obtención de datos de entrada de los escenarios hipotéticos.



**Tabla 5.** Valores de entrada de condiciones meteorológicas e hidrológicas para Magdalena medio y Magdalena bajo.

Factor		Nivel	
Lugar de evaluación		Magdalena medio	Magdalena bajo
Velocidad del agua [m/s]	Mínimo	0,36	0,204
	Máximo	2,316	2,519
Velocidad del viento [m/s]	Mínimo	4	1
	Máximo	18	20
Temperatura del agua [°C]	Mínimo	21,16	22,19
	Máximo	35,03	34,91
Oleaje [m]	Sin perturbación	natural	natural
	Con perturbación	1	1

- Características del derrame.

Con base en un estudio realizado por Carvajal y Jara [30] entre los años 1994 y 2003, se identificó que las cantidades mínima y máxima derramadas sobre la cuenca del Magdalena fueron 150 y 10.000 barriles respectivamente. Para la selección de los hidrocarburos, se comparó la base de datos de ADIOS con información del Ministerio de minas y energía [31] y de la Agencia Nacional de hidrocarburos [32], respecto a hidrocarburos producidos en la cuenca del Magdalena a 2015. A partir de esto, se seleccionó el crudo más liviano (Colorado, 40,2 °API) y el crudo más pesado (Cantagallo, 19,8 °API). Adicionalmente, se tuvo en cuenta si el derrame ocurre de forma instantánea o continua.

- Matriz de escenarios estocásticos hipotéticos de derrame.

El diseño de los escenarios hipotéticos de derrame se realizó bajo el concepto de simulaciones estocásticas usando las condiciones del área de estudio mostradas en la tabla 5 y las características del derrame especificadas anteriormente. Para tal fin se realizó un diseño factorial categórico en el software Statgraphics, el cual arrojó una matriz de 128 escenarios posibles de derrame para cada lugar de evaluación (ver Anexo C).

**4.3.2. Simulación de escenarios de derrame con el software ADIOS.** Cada uno de los escenarios diseñados en la fase anterior fue simulado en el software ADIOS. Como resultado se obtuvo la variación en el tiempo para las 6 variables de respuesta entregadas por ADIOS. A manera de ejemplo se presentan a continuación los resultados del escenario 151 de la matriz de escenarios de Magdalena medio consignada en el Anexo C. En la tabla 6 se muestran las condiciones de entrada de este escenario.

La figura 5, resume los resultados obtenidos para este escenario luego de la simulación con ADIOS, respecto a la evolución en el tiempo del porcentaje evaporado, dispersado y remanente.

**Tabla 6.** Condiciones de entrada del escenario No. 151 de Magdalena medio.

Variable de entrada	Valor	Variable de entrada	Valor
Velocidad del agua [m/s]	0,36	Tipo de crudo [°API]	40
Velocidad del viento [m/s]	4		(Crudo más liviano)
Temperatura del agua [°C]	21,16	Tipo de derrame	Instantáneo
Oleaje [m]	1	Cantidad derramada [Bbl]	150

**Figura 5.** Variación en el tiempo del porcentaje evaporado, dispersado y remanente para el escenario 151 de Magdalena medio.

Hours Into Spill	Released bbl	Evaporated percent	Dispersed percent	Remaining percent
1	150	-	23	75
2	150	-	32	62
4	150	-	37	52
6	150	-	39	47
8	150	-	40	45
10	150	-	40	43
12	150	-	41	43
18	150	-	42	42
24	150	-	42	41
30	150	-	42	41
36	150	-	43	41
42	150	-	43	40
48	150	-	43	40
54	150	-	43	40
60	150	-	43	40
66	150	-	44	40
72	150	-	44	39
78	150	-	44	39
84	150	-	44	39
90	150	-	44	39
96	150	-	44	39
102	150	-	44	39
108	150	-	45	39
114	150	-	45	39
120	150	-	45	38

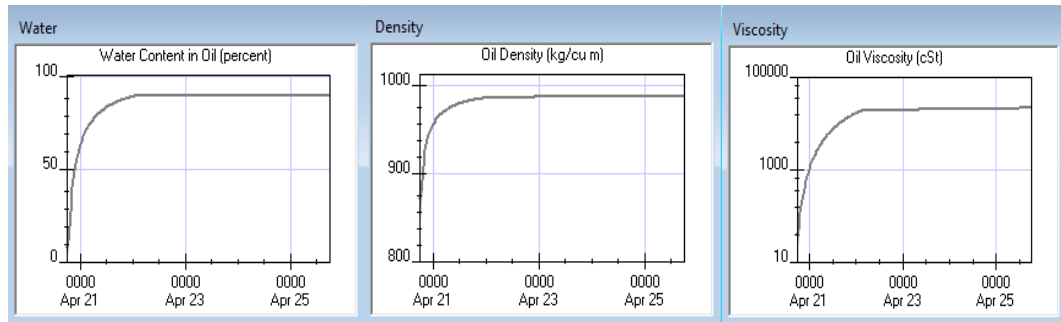
**Fuente:** ADIOS.

ADIOS evalúa la transformación de los hidrocarburos hasta por 5 días, sin embargo, la simulación se detiene una vez el modelo encuentra una estabilización de los parámetros, es decir, cuando ya no se registran cambios. Para este escenario la simulación se obtuvo durante 120 horas (5 días), para las cuales se observa que durante las primeras 12 horas se producen los mayores cambios en todas estas variables de respuesta. Se obtiene que finalmente el 45% del crudo se habría evaporado (valor cercano al 40% esperado para crudos livianos según la NOAA [10]). El 38% del volumen vertido permanecería en la

superficie del agua, por lo que solo el 17% del crudo vertido se encontraría dispersado en la columna de agua.

Las variaciones de densidad, viscosidad y contenido de agua en emulsión son presentadas por ADIOS de forma gráfica (Figura 6).

**Figura 6.** Perfiles de densidad del crudo, viscosidad del crudo y contenido de agua en emulsión del escenario 151 de Magdalena medio.



**Fuente:** ADIOS.

Se observa que la densidad y la viscosidad presentan un aumento sostenido en el tiempo. Sin embargo, la viscosidad es la propiedad que se ve mayormente afectada por la intemperización del crudo; los cambios en la densidad del crudo, tal como lo afirma *Comerma Piña* [15] son menores.

**4.3.3. Análisis de varianza (ANOVA)** Para identificar las variables de entrada que causaron cambios significativos en el envejecimiento del crudo, se realizó un análisis ANOVA para cada variable de respuesta (porcentaje evaporado, dispersado y remanente, porcentaje de agua en la emulsión y cambios en la densidad y la viscosidad del crudo) para cada sitio de estudio (12 en total). Los ANOVA se realizaron tomando el valor final de cada variable de respuesta. A manera de ejemplo, en la tabla 7 se muestra el resultado de uno de los ANOVA realizados para Magdalena medio teniendo como variable de respuesta el porcentaje evaporado. Las tablas de resultados para los 11 ANOVA restantes se presentan en el Anexo D.

**Tabla 7.** Resultado de análisis ANOVA para evaporación en Magdalena medio.

	Fuente	SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Características del derrame</b>	A: Tipo crudo	27086,30	1	27086,30	463,58	0,0000
	B: Tipo derrame	1275,13	1	1275,13	21,82	0,0000
	C: Cantidad derramada	1391,28	1	1391,28	23,81	0,0000
<b>Condiciones del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	112,50	1	112,50	1,93	0,1678
	E: Velocidad viento	60,50	1	60,50	1,04	0,3109
	F: Temperatura	282,03	1	282,03	4,83	0,0299
	G: Oleaje	913,78	1	913,78	15,64	0,0001

El análisis ANOVA considera como significativos los efectos de las variables que reportan valor-P menor a 0,05. En este sentido, para el caso presentado en la tabla 7 se observa que la evaporación evaluada en Magdalena medio se ve afectada significativamente por las 3 condiciones del derrame establecidas (tipo de hidrocarburo, tipo de derrame y cantidad derramada).

Respecto a las características del lugar del derrame la mayor influencia es atribuida a la temperatura y el oleaje. En la tabla 8 se resumen los resultados de las variables de entrada reportadas con efecto significativo sobre cada variable de salida, de acuerdo a los 12 ANOVA realizados. Esta tabla sigue la nomenclatura presentada en la tabla 7.

**Tabla 8.** Resumen de variables de entrada con efecto significativo sobre las variables de respuesta según análisis ANOVA.

Lugar de evaluación	Variable de salida	% evaporado	% dispersado	% remanente	Cambios en la densidad	Cambios en la viscosidad	% Emulsificado	Total de incidencia
Magdalena medio	A	A	A	A	A	A	A	6
	B			B				2
	C			C		C		3
								0
		E	E	E				2
	F			F	F	F	F	5
	G	G	G	G				3
Magdalena bajo	A	A	A	A	A	A	A	6
	B			B				2
	C			C				2
								0
		E	E	E	E	E	E	5
				F	F			2
	G	G	G	G	G	G	G	6

- Influencia de las características del derrame (tipo de crudo, tipo de derrame, cantidad derramada):

Para Magdalena medio se observa que el tipo de crudo (A) afectó el 100% de las variables de salida analizadas, seguido de la cantidad derramada (C) que presentó influencia sobre el 50% de las mismas. Finalmente, el tipo de derrame (B) presenta la menor influencia, afectando solamente el 33% de las variables de respuesta.

En cuanto a Magdalena bajo, se mantuvo la influencia del tipo de crudo (A) en el 100% de las variables de salida, lo cual permite inferir que es una característica determinante en la meteorización del crudo y su efecto es independiente de las condiciones del lugar del derrame. La influencia del tipo de derrame (B) también se mantiene en Magdalena bajo sobre el 33% de las variables de respuesta, sin embargo, las variables afectadas en cada lugar no son las mismas. Para la cantidad derramada (C) la influencia disminuye, afectando solo el 33% del total de variables de salida analizadas.

Se observa que el tipo de derrame (B) y la cantidad derramada (C) son características determinantes en la evaporación porque mantienen su influencia sobre este proceso en los dos lugares de evaluación. La influencia es atribuible al efecto que según *Betancourt* [14] y *Reed et al.* [5], tienen dichas condiciones del derrame sobre el espesor, área y tiempo de exposición de la mancha.

Se identifica que el tipo de derrame (B) y la cantidad derramada (C) tienen influencia de manera conjunta sobre la dispersión en Magdalena bajo y sobre la cantidad remanente en Magdalena medio. La diferencia se debe a las características de cada lugar evaluado y es explicada en la siguiente sección.

La emulsificación, la densidad y la viscosidad se muestran como las variables de respuesta menos afectadas por las condiciones del derrame en los dos lugares de evaluación. Se observa que posiblemente la forma en que el hidrocarburo es vertido no tiene influencia en estas variables y que están estrechamente

relacionadas con el tipo de crudo (A), tal como lo exponen los autores referenciados en la fase I.

- Influencia de las características del lugar del derrame.

En Magdalena medio se obtuvo que la velocidad del agua (D) no es reportada por el análisis ANOVA como una variable influyente para ninguna de las variables de respuesta. En cuanto a la velocidad del viento (E), se identifica que afecta solo el 33% de las variables de salida analizadas, mientras que la temperatura (F) es la característica con mayor influencia, afectando significativamente el 83% de las variables de respuesta. Finalmente, el oleaje (G) tiene influencia sobre el 50% de las variables de salida evaluadas.

Por su parte, en Magdalena bajo se mantuvo la influencia nula de la velocidad del agua (D) según ANOVA. La velocidad del viento (E) es la variable con mayor influencia en este lugar de evaluación, con efecto significativo sobre el 83% de las variables de respuesta, mientras que la temperatura (F) influencia solo el 33% de dichas variables. Por último, el oleaje (G) muestra ser una variable de influencia significativa sobre todos los procesos, afectando el 100% de las variables de respuesta en este lugar.

La influencia nula de la velocidad del agua (D) según ANOVA se mantuvo para los dos lugares de evaluación. Teniendo en cuenta que en el algoritmo de ADIOS la velocidad del agua es una variable de entrada para la dispersión y el esparcimiento, se podría plantear que su efecto es dependiente de su magnitud, es decir, que se considera una variable influyente a valores más altos que los establecidos para cada lugar de evaluación de este trabajo.

Se observa que la tendencia de la influencia de la velocidad del viento (E) no se mantuvo en los dos lugares evaluados. La mayor influencia en Magdalena bajo podría obedecer a que en este lugar el valor máximo de velocidad del viento fue mayor que en Magdalena medio; sin embargo, el efecto en Magdalena medio no es nulo y la influencia se muestra significativa sobre la dispersión y la cantidad

remanente, que son variables que están interrelacionadas con la emulsificación y los cambios en las propiedades del hidrocarburo. A partir de lo anterior es posible plantear que el viento produciría una fuerza de arrastre significativa en los dos lugares evaluados, pero este efecto sería más determinante para los procesos de degradación en Magdalena bajo.

Lo anterior también se ve reflejado en que el efecto conjunto del tipo de derrame y la cantidad derramada sea significativo para la dispersión en Magdalena bajo y para la cantidad remanente en Magdalena medio. Las condiciones de velocidad de viento en cada lugar, que según los autores están fuertemente ligadas con la introducción de gotas de crudo en la columna de agua, producen que en Magdalena bajo se favorezca el proceso de dispersión y en Magdalena medio se observe una tendencia del crudo a permanecer remanente en la superficie del agua.

Los resultados para la velocidad del agua (D) y la velocidad del viento (E) hacen posible plantear que, para las condiciones de Magdalena medio y bajo, el esparcimiento de la mancha tendría un efecto predominante de arrastre por vientos y no por corrientes de agua.

Respecto a la temperatura (F), su influencia también es diferente para cada lugar evaluado. Esta variable muestra una mayor influencia en los escenarios de Magdalena medio debido a que en este lugar presenta el mayor valor máximo.

La influencia del oleaje (G) tampoco se mantuvo para los dos lugares evaluados. Se observa que su efecto es mayor en Magdalena bajo, en donde se identifica como una característica importante porque tiene influencia sobre todas las variables de respuesta. Adicionalmente se observa una estrecha relación entre el oleaje y la velocidad del viento, puesto que tienen efecto en conjunto sobre 5 de las 6 variables de respuesta. Lo anterior permite inferir que lo expuesto por autores como *Zapata* [3], que plantean el oleaje como producto de corrientes

superficiales inducidas por el viento, se evidencia para Magdalena bajo debido a sus condiciones de altas velocidades de viento.

A continuación, se muestra el análisis de resultados por cada variable de respuesta.

**Evaporación.** Este proceso se ve influenciado por el oleaje en los dos lugares de evaluación y adicionalmente por la temperatura en Magdalena medio. La ausencia de una influencia significativa de la velocidad del viento sobre este proceso, permite presumir que la tasa de evaporación por efecto de rocío planteada por *Vergara y Pizarro* [8] podría considerarse baja en los dos lugares de evaluación, y que solo tendría influencia con presencia de velocidades de viento mayores a las registradas en las zonas de estudio. En consecuencia, las pérdidas por evaporación ocurrirían debido a la exposición de los compuestos volátiles a la temperatura ambiente, siendo este efecto mayor en Magdalena medio según lo reportado por ANOVA.

**Emulsificación.** Respecto a la emulsificación, *Payne et al.* [22] la expone como un proceso afectado en todos los casos por la temperatura y la turbulencia de la corriente de agua. Sin embargo, el resultado de ANOVA evidenció que posiblemente los valores establecidos para estas características en los lugares evaluados no alcanzan a producir efectos significativos. En Magdalena medio este proceso es influenciado solo por la temperatura y en Magdalena bajo por la velocidad del viento y el oleaje.

**Densidad y viscosidad.** Adicionalmente, la densidad y la viscosidad se ven afectadas por las mismas variables que la emulsificación en los dos lugares de evaluación. Este resultado refleja una posible relación estrecha entre estas tres variables de salida, lo cual sería coherente con el planteamiento de *Siguero Guemes* [19], en el que expone los cambios en la densidad y la viscosidad del crudo como consecuencia de la emulsificación.

**Dispersión.** Los resultados obtenidos para la dispersión reflejan que independientemente del lugar de evaluación, las variables que tienen influencia sobre este proceso son la velocidad del viento y el oleaje. El anterior resultado es coherente con lo planteado por varios autores, entre esos *Stronach* [24], quien afirma un efecto notable de la velocidad del viento en la mezcla vertical de la columna de agua.

**Cantidad remanente.** El análisis ANOVA de la cantidad remanente mostró influencia de la temperatura, la velocidad del viento y el oleaje en los dos lugares de evaluación. Este resultado es muestra de la estrecha interdependencia de los procesos de meteorización expuesta por autores como *Reed et al.* [5]. Las características que mostraron influencia en esta variable de respuesta son las que determinan la cantidad de crudo perdida por evaporación y por dispersión en la columna de agua, que son a gran escala los procesos que finalmente determinan la cantidad de hidrocarburo que permanecerá en la superficie del cuerpo de agua.

## 5. CONCLUSIONES

- A partir de la revisión de literatura se identificó que, aunque existe gran variedad de modelos para análisis de degradación de derrames de hidrocarburos, pocos son adaptables a condiciones de ríos y/o de acceso libre, lo que dificulta su implementación en el diseño de planes de contingencia para este tipo de incidentes en Colombia. ADIOS (NOAA), por sus características, se perfila como una herramienta viable para el análisis de estos incidentes en el escenario nacional.
- La evaluación de la influencia de las condiciones del derrame mediante ANOVA permitió determinar que el tipo de crudo sería la variable con mayor influencia sobre los procesos de degradación. A su vez, el tipo de derrame y la cantidad derramada presentaron una menor influencia y mostraron que su efecto sobre la intemperización del crudo depende de las características del lugar del derrame.
- La tendencia de las características que influenciaron cada variable de respuesta se mantuvo para los dos lugares de evaluación en cuanto a la dispersión y la cantidad remanente. Para las variables de respuesta restantes (evaporación, emulsificación y cambios en la densidad y la viscosidad del crudo), la tendencia no fue la misma en los dos sitios de estudio. Esto podría obedecer a que estas se ven fuertemente influenciadas por características del ambiente como la temperatura y la velocidad del viento.
- Los resultados obtenidos evidenciaron que el efecto de las variables de entrada depende de su magnitud, por lo que no es posible establecer una influencia absoluta de ninguna de ellas en cualquier escenario de derrame. Esto confirma entonces la gran relevancia que tiene la implementación de modelos como ADIOS para el diseño de planes de contingencia.

## 6. RECOMENDACIONES

- Con el fin de mejorar la aproximación de los resultados, se recomienda hacer uso del software GNOME para realizar el cálculo de la cantidad de crudo depositada en las riveras y con base en estos resultados proceder a realizar las simulaciones para los procesos de degradación en ADIOS.
- Se sugiere incluir el efecto de la dirección del viento en etapas posteriores a la formación inicial de la mancha superficial de crudo para mejorar las estimaciones del área de la mancha formada.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Análisis del PIB departamental 2015. [En línea]. Vicepresidencia de asuntos económicos. Bogotá D.C. 2016. (Recuperado en Abril de 2016.) Disponible en [https://acp.com.co/web2017/images/pdf/iep/informes\\_economicos\\_mensuales/2016/Informe%20octubre%20PIB%20departamental.pdf](https://acp.com.co/web2017/images/pdf/iep/informes_economicos_mensuales/2016/Informe%20octubre%20PIB%20departamental.pdf).
- [2] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Informe de Desempeño Ambiental 2015. [En línea]. Bogotá D.C. 2016. (Recuperado en Abril de 2016.) Disponible en [https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones\\_e\\_informes/informe\\_ambiental/IGA%202016\\_WEB.pdf](https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones_e_informes/informe_ambiental/IGA%202016_WEB.pdf).
- [3] ZAPATA SÁNCHEZ, Carmen Helena; CALLE, Edgar Arturo y PARRA, Luis Fernando. Simulación del comportamiento fisicoquímico de derrames de hidrocarburos en ríos. En: Avances en recursos hidraulicos, 2002, vol. 9., p. 7-18.
- [4] YAPA, Poojitha, *et al.* An Integrated Computer Model for Simulating Oil Spills in the Upper St. Lawrence River. En: Journal of Great Lakes Research, 1992, vol. 18., p. 340-351.
- [5] REED, Mark, *et al.* Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. En: Spill Science and Technology Bulletin, 1999, vol. 5, p. 3–16.
- [6] INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED. Comportamiento de los derrames de hidrocarburos en el medio marino. [En línea]. Documento de información técnica. London, Reino Unido. 2005. (Recuperado en Septiembre de 2016.) Disponible en <http://www.itopf.com/es/knowledge-resources/documents-guides/document/2-destino-de-los-derrames-de-hidrocarburos-en/>.
- [7] YAPA, Poojitha y CHEN, Hung. Modelling river oil spills: a review. En: Journal of hydraulic research, 1994, vol. 32., p. 765–782.

- [8] VERGARA Ignacio y PIZARRO Francisco. Manual: control de derrames de Petróleo. Santiago: Cursos en América latina de IMCO - CPPS - PNUMA, 1981. p. 96.
- [9] CASTRO Gustavo. Diseño monitoreo frente derrames de hidrocarburos. [En línea]. Informe final. Quillota. 2007. (Recuperado en Marzo de 2017.) Disponible en [http://www.sag.gob.cl/sites/default/files/INFORME\\_FINAL\\_ASESORIA\\_SAG\\_HCS2.pdf](http://www.sag.gob.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_ASESORIA_SAG_HCS2.pdf).
- [10] NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Manual de análisis de trayectorias. [En línea]. División de respuesta a materiales peligrosos. Washington. 2001. (Recuperado en Junio de 2017.) Disponible en [https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/Manual\\_Analisis\\_Trayectorias.pdf](https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/Manual_Analisis_Trayectorias.pdf).
- [11] YAPA, Poojitha; CHEN, Hung y ANGAMMANA, Ken. Modeling oil spills in a river-lake system. En: Journal of Marine Systems, 1994, vol. 4., p. 453–471.
- [12] TSAHALIS, Demos. Contingency Planning for Oil Spills: Riverspill—a River Simulation Model. En: International Oil Spill Conference Proceedings, 1979, vol. 1., p. 27–36.
- [13] AFENYO, Mawuli, *et al.* Modeling oil weathering and transport in sea ice. En: Maine Pollution Bulletin, 2016, vol. 107., p. 206–215.
- [14] BETANCOURT, Fabián. Modelado numérico de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua. Tesis de Magíster en Ingeniería, mención en área ambiental. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería, 2001, 167p.
- [15] COMERMA, Erick. Modelado numérico de la deriva y envejecimiento de los hidrocarburos vertidos al mar. Aplicación operacional en la lucha contra las mareas negras. Tesis de Doctor en Ciencias del mar. Barcelona: Universidad politécnica de Catalunya. 2004, 305 p.

- [16] FINGAS, Mervin. A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation. En: *Journal of Hazard Materials*, 1995, vol. 42., p. 157–175.
- [17] MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. México, D.F.: McGraw Hill, 2007. p.1211. ISBN 0-07-284823-5.
- [18] TKALICH, Pavlo y CHAN, Eng. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. En: *Marine Pollution Bulletin*, 2002, vol. 44., p. 1219–1229.
- [19] GUEMES, Augusto. Modelado numérico del comportamiento de los vertidos de hidrocarburos vertidos al mar. Tesis de Doctor en Ingeniería marítima. Barcelona: Escola técnica superior d'enginyers de camins, canals i ports de Barcelona. Facultat de Ingeniería hidráulica, marítima y ambiental, 2010, 113p.
- [20] MASLO, Alljaz; PANJAN, Joze y ZAGAR, Dusan. Large scale oil spill simulation using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case. En: *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 84., p. 225–235.
- [21] DELVIGNE G.A.L. y SWEENEY C.E. Natural dispersion of oil. En: *Oil and chemical pollution*, 1989, vol. 4., p. 281–310.
- [22] PAYNE J. R., *et al.* Integration of Suspended Particulate Matter and Oil Transportation Study. En: Science Applications International Corporation, 1987., 215p.
- [23] WANG, Shou-Dong, *et al.* Three dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. En: *Ocean Engineering*, 2008, vol. 35., p. 503–510.
- [24] STRONACH, James; HOSPITAL, Aurelien. Simulating the behaviour and fate of an oil spill using a coupled three dimensional hydrodynamic model. En: *International oil spill Conference*, 2014, vol. 1., p. 901–918.
- [25] WANG, S. D.; SHEN, Y. M. y ZHENG, Y. H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. En: *Ocean Engineering*,

2005, vol. 32., p. 1556–1571.

- [26] LEHR, William, *et al.* Revisions of the ADIOS oil spill model. En: *Environmental modelling and software*, 2002, vol. 17., p. 189–197.
- [27] ARCADIS Y JESYCA S.A.S. Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015. [En línea]. Bogotá D.C.: Ministerio de transporte de Colombia. 2015. (Recuperado Abril de 2017.) Disponible en <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/Documents/PLAN%20MAESTRO%20FLUVIAL.pdf>.
- [28] AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Información general de cuencas sedimentarias de Colombia. [En línea]. 2011. (Recuperado Agosto de 2016.) Disponible en [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20\(PDF\).pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20(PDF).pdf).
- [29] HERNÁNDEZ, Antonio y BARRETO, Luis. Caracterización física, demografica, social y economica de Rio Magdalena. [En línea]. Bogotá D.C.: Cormagdalena. 2013. (Recuperado Septiembre de 2016.) Disponible en [http://dc02eja.cormagdalena.gov.co/recursos\\_user/PMA/Caracteriza%20R%C3%ADo%20Magdalena.pdf](http://dc02eja.cormagdalena.gov.co/recursos_user/PMA/Caracteriza%20R%C3%ADo%20Magdalena.pdf).
- [30] CARVAJAL, Luis y JARA, Fredy. Aspectos técnicos sobre derrames de crudo. Tesis de graduación en Ingeniería de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santande. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2005, 435p.
- [31] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Listado de pozos, campos y contratos vigentes en explotación. [En línea]. Bogotá D.C. 2015. (Recuperado Julio de 2016.) Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/489779/Consolidado%2B%20puntos+fiscalizacion-Pozos+por+contrato%2BMME-40.pdf/57380ed4-647d-4510-a208-9745811ca42c>.

[32] AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Producción fiscalizada de petróleo por campo. [En línea] Bogotá D.C. 2015. (Recuperado Octubre de 2016.)  
Diponible en  
[www.anh.gov.co/.../Producción%20fiscalizada%20de%20crudo%2013-06-2016.xlsx](http://www.anh.gov.co/.../Producción%20fiscalizada%20de%20crudo%2013-06-2016.xlsx).

## BIBLIOGRAFIA

ARCADIS Y JESYCA S.A.S. Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015. [En línea]. Bogotá D.C.: Ministerio de transporte de Colombia. 2015. (Recuperado Abril de 2017.) Disponible en <https://onl.dnp.gov.co/es/Publicaciones/Documents/PLAN%20MAESTRO%20FLUVIAL.pdf>.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Información general de cuencas sedimentarias de Colombia. [En línea]. 2011. (Recuperado Agosto de 2016.) Disponible en [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20\(PDF\).pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20(PDF).pdf).

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Análisis del PIB departamental 2015. [En línea]. Vicepresidencia de asuntos económicos. Bogotá D.C. 2016. (Recuperado en Abril de 2016.) Disponible en [https://acp.com.co/web2017/images/pdf/iep/informes\\_economicos\\_mensuales/2016/Informe%20octubre%20PIB%20departamental.pdf](https://acp.com.co/web2017/images/pdf/iep/informes_economicos_mensuales/2016/Informe%20octubre%20PIB%20departamental.pdf).

AFENYO, Mawuli, *et al.* Modeling oil weathering and transport in sea ice. En: *Maine Pollution Bulletin*, 2016, vol. 107., p. 206–215.

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Producción fiscalizada de petróleo por campo. [En línea] Bogotá D.C. 2015. (Recuperado Octubre de 2016.) Diponible en [www.anh.gov.co/.../Producción%20fiscalizada%20de%20crudo%202013-06-2016.xlsx](http://www.anh.gov.co/.../Producción%20fiscalizada%20de%20crudo%202013-06-2016.xlsx).

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE PETRÓLEO. Informe de Desempeño

Ambiental 2015. [En línea]. Bogotá D.C. 2016. (Recuperado en Abril de 2016.)  
Disponible en  
[https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones\\_e\\_informes/informe\\_ambiental/IGA%202016\\_WEB.pdf](https://acp.com.co/web2017/images/pdf/publicaciones_e_informes/informe_ambiental/IGA%202016_WEB.pdf).

BETANCOURT, Fabián. Modelado numérico de derrames de hidrocarburos en cuerpos de agua. Tesis de Magíster en Ingeniería, mención en área ambiental. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería, 2001, 167p.

CARVAJAL, Luis y JARA, Fredy. Aspectos técnicos sobre derrames de crudo. Tesis de graduación en Ingeniería de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas, 2005, 435p.

COMERMA, Erick. Modelado numérico de la deriva y envejecimiento de los hidrocarburos vertidos al mar. Aplicación operacional en la lucha contra las mareas negras. Tesis de Doctor en Ciencias del mar. Barcelona: Universidad politécnica de Catalunya. 2004, 305 p.

CASTRO Gustavo. Diseño monitoreo frente derrames de hidrocarburos. [En línea]. Informe final. Quillota. 2007. (Recuperado en Marzo de 2017.) Disponible en  
[http://www.sag.gob.cl/sites/default/files/INFORME\\_FINAL\\_ASESORIA\\_SAG\\_HCS2.pdf](http://www.sag.gob.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_ASESORIA_SAG_HCS2.pdf).

DELVIGNE G.A.L. y SWEENEY C.E. Natural dispersion of oil. En: Oil and chemical pollution, 1989, vol. 4., p. 281–310.

FINGAS, Mervin. A literature review of the physics and predictive modelling of oil spill evaporation. En: Journal of Hazard Materials, 1995, vol. 42., p. 157–175.

GUEMES, Augusto. Modelado numérico del comportamiento de los vertidos de

hidrocarburos vertidos al mar. Tesis de Doctor en Ingeniería marítima. Barcelona: Escola técnica superior d'enginyers de camins, canals i ports de Barcelona. Facultad de Ingeniería hidráulica, marítima y ambiental, 2010, 113p.

HERNÁNDEZ, Antonio y BARRETO, Luis. Caracterización física, demografica, social y economica de Rio Magdalena. [En línea]. Bogotá D.C.: Cormagdalena. 2013. (Recuperado Septiembre de 2016.) Disponible en [http://dc02eja.cormagdalena.gov.co/recursos\\_user/PMA/Caracteriza%20R%C3%ADo%20Magdalena.pdf](http://dc02eja.cormagdalena.gov.co/recursos_user/PMA/Caracteriza%20R%C3%ADo%20Magdalena.pdf).

INTERNATIONAL TANKER OWNERS POLLUTION FEDERATION LIMITED. Comportamiento de los derrames de hidrocarburos en el medio marino. [En línea]. Documento de información técnica. London, Reino Unido. 2005. (Recuperado en Septiembre de 2016.) Disponible en <http://www.itopf.com/es/knowledge-resources/documents-guides/document/2-destino-de-los-derrames-de-hidrocarburos-en/>.

LEHR, William, *et al.* Revisions of the ADIOS oil spill model. En: *Environmental modelling and software*, 2002, vol. 17., p. 189–197.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Listado de pozos, campos y contratos vigentes en explotación. [En línea]. Bogotá D.C. 2015. (Recuperado Julio de 2016.) Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/489779/Consolidado%2B%20puntos+fiscalizacion-Pozos+por+contrato%2BMME-40.pdf/57380ed4-647d-4510-a208-9745811ca42c>.

MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. México, D.F.: McGraw Hill, 2007. p.1211. ISBN 0-07-284823-5.

MASLO, Alljaz; PANJAN, Joze y ZAGAR, Dusan. Large scale oil spill simulation

using the lattice Boltzmann method, validation on the Lebanon oil spill case. En: Marine Pollution Bulletin, 2014, vol. 84., p. 225–235.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Manual de análisis de trayectorias. [En línea]. División de respuesta a materiales peligrosos. Washington. 2001. (Recuperado en Junio de 2017.) Disponible en [https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/Manual\\_Analisis\\_Trayectorias.pdf](https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/Manual_Analisis_Trayectorias.pdf).

PAYNE J. R., *et al.* Integration of Suspended Particulate Matter and Oil Transportation Study. En: Science Applications International Corporation, 1987., 215p.

REED, Mark, *et al.* Oil spill modeling towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. En: Spill Science and Technology Bulletin, 1999, vol. 5, p. 3–16.

STRONACH, James; HOSPITAL, Aurelien. Simulating the behaviour and fate of an oil spill using a coupled three dimensional hydrodynamic model. En: International oil spill Conference, 2014, vol. 1., p. 901–918.

TSAHALIS, Demos. Contingency Planning for Oil Spills: Riverspill—a River Simulation Model. En: International Oil Spill Conference Proceedings, 1979, vol. 1., p. 27–36.

TKALICH, Pavlo y CHAN, Eng. Vertical mixing of oil droplets by breaking waves. En: Marine Pollution Bulletin, 2002, vol. 44., p. 1219–1229.

VERGARA Ignacio y PIZARRO Francisco. Manual: control de derrames de Petróleo. Santiago: Cursos en América latina de IMCO - CPPS - PNUMA, 1981. p. 96.

WANG, S. D.; SHEN, Y. M. y ZHENG, Y. H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. En: Ocean Engineering, 2005, vol. 32., p. 1556–1571.

WANG, Shou-Dong, *et al.* Three dimensional numerical simulation for transport of oil spills in seas. En: Ocean Engineering, 2008, vol. 35., p. 503–510.

YAPA, Poojitha, *et al.* An Integrated Computer Model for Simulating Oil Spills in the Upper St. Lawrence River. En: Journal of Great Lakes Research, 1992, vol. 18., p. 340-351

YAPA, Poojitha y CHEN, Hung. Modelling river oil spills: a review. En: Journal of hydraulic research, 1994, vol. 32., p. 765–782.

YAPA, Poojitha; CHEN, Hung y ANGAMMANA, Ken. Modeling oil spills in a river-lake system. En: Journal of Marine Systems, 1994, vol. 4., p. 453–471.

ZAPATA SÁNCHEZ, Carmen Helena; CALLE, Edgar Arturo y PARRA, Luis Fernando. Simulación del comportamiento fisicoquímico de derrames de hidrocarburos en ríos. En: Avances en recursos hidraulicos, 2002, vol. 9., p. 7-18.

## ANEXOS

### ANEXO A: MODELOS MATEMÁTICOS DE PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS DE DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS DERRAMADOS EN CUERPOS DE AGUA.

Tabla A1. Revisión de modelos matemáticos desarrollados para describir procesos fisicoquímicos de degradación de hidrocarburos.

Proceso o propiedad	Modelo	
	Autor	Ecuación
Evaporación	Stiver y Mackay (1984).	$\frac{df}{dt} = \frac{Ke}{s} \exp[K_1 + K_2(C_1 + C_2F)] \quad (1)$ <p>Donde <math>K_1 = 48,5 + 0,1147T_0</math>, <math>K_2 = 4,5 \cdot 10^{-4}T_0 - 0,1921</math>, <math>Ke = 2,5 \cdot 10^{-3}U^{0,78}</math>, <math>T_0</math>: temperatura ambiente [K], <math>h</math>: espesor de la mancha [m], <math>C_1</math> y <math>C_2</math>: valores experimentales obtenidos mediante la destilación de una muestra de hidrocarburo y <math>F</math>: fracción de evaporada.</p>
	Reed et al. (1988).	$\frac{dm_i}{dt} = \frac{K_B P_V A f_i M_i}{RT} \quad (2)$ <p>Donde <math>d_{mi}</math>: coeficiente de transferencia, <math>P_{vi}</math>: presión de vapor del iésimo constituyente [atm], <math>A</math>: área de la mancha [m<sup>2</sup>], <math>f_i</math>: fracción remanente del constituyente <math>i</math> en la mancha, <math>M_i</math>: peso molecular en [g/mol], <math>R</math>: constante universal de los gases [atm*L/mol*K] y <math>T</math>: temperatura [K].</p>
	Findicakis et al. (1993).	$\phi_i = \lambda_i (P_{vi} - P_{vai}) U \quad (3)$ <p>Donde <math>\phi_i</math>: razón de evaporación del componente <math>i</math> [g/cm<sup>3</sup>s], <math>\lambda_i</math>: coeficiente de evaporación del componente <math>i</math> [1/cm<sup>3</sup>], <math>P_{vi}</math>: presión de vapor del componente <math>i</math> dentro de la mezcla [dyn/cm<sup>2</sup>], <math>P_{vai}</math>: presión de vapor del componente <math>i</math> en el aire sobre el derrame (se considera como cero) y <math>U</math>: velocidad del viento [m/s].</p>
	Fingas (1996).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forma algorítmica:  <math display="block">\%E = [0,165 * \%D + 0,045(T - 15)] \ln t \quad (4)</math> </li> <li>- Forma cuadrática:  <math display="block">\%E = [0,0254 * \%D + 0,01(T - 15)]\sqrt{t} \quad (5)</math> </li> </ul>

		Donde %E: porcentaje de masa evaporada, %D: porcentaje de masa evaporada a 180 °C, T: temperatura [°C] y t: tiempo [min].												
Dispersión	Mackay et al. (1980).	$\frac{dm}{dt} = \frac{0,11m(1+u)^2}{1+50\mu^{0,5}\delta\sigma} \quad (6)$ <p>Donde <math>\mu</math>: viscosidad dinámica del petróleo [Cp], <math>\delta</math>: espesor de la película [m], <math>\sigma</math>: tensión de la interfase petróleo – agua [dynas/cm] y U: velocidad del viento [m/s].</p>												
	Delvigne and Sweeney (1989).	$Q_r(d_0) = C(0) D_{ba}^{0,57} S F d_0^{0,7} \Delta \quad (7)$ <p>Donde Q: tasa de arrastre de gotas de crudo a la columna de agua [kg/s*m²], C(0): constante empírica, D<sub>ba</sub>: disipación de energía por unidad de área [J/m²], S: fracción de superficie cubierta por crudo (0&lt;S&lt;1), F: fracción de superficie impactada por ondas de rotura por unidad de tiempo [1/s], d<sub>0</sub>: diámetro de gotas de crudo [m] y Δd: intervalo de diámetro de gotas de crudo [m].</p>												
	Huang (1984).	$\frac{dV}{dt} = N V_0 U^2 t \quad (8)$ <p>Donde N: constante de dispersión (2*10<sup>-8</sup>), V<sub>0</sub>: volumen inicial [m³], U: velocidad del viento [m/s] y t: tiempo [s].</p>												
Esparcimiento	Fay (1971). Describe el esparcimiento en tres fases según las fuerzas que actúan: fuerzas inerciales, fuerzas viscosas y fuerzas de tensión superficial.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fase</th> <th>Unidimensional</th> <th>Bidimensional</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Inercial</td> <td><math>L = 1,39(\Delta g A t^2)^{1/3} \quad (10)</math></td> <td><math>R = 1,14(\Delta g V t^2)^{1/4} \quad (11)</math></td> </tr> <tr> <td>Viscoso</td> <td><math>L = 1,39(\Delta g A^2 t^{3/2} / \mu^{1/2})^{1/4} \quad (12)</math></td> <td><math>R = 0,98(\Delta g V^2 t^{2/3} / \mu^{1/2})^{1/6} \quad (13)</math></td> </tr> <tr> <td>Tensión superficial</td> <td><math>L = 1,43(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \mu)^{1/4} \quad (14)</math></td> <td><math>R = 1,60(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \mu)^{1/4} \quad (15)</math></td> </tr> </tbody> </table> <p>Donde g: aceleración de la gravedad [m/s²], A: volumen de petróleo por unidad de longitud normal para X, <math>\mu</math>: viscosidad cinemática del agua [m²/s], <math>\sigma</math>: coeficiente de escurrimiento o tensión superficial [dyn/cm], <math>\rho</math>: densidad de agua [kg/m³] y V: volumen inicial del petróleo [m³].</p>	Fase	Unidimensional	Bidimensional	Inercial	$L = 1,39(\Delta g A t^2)^{1/3} \quad (10)$	$R = 1,14(\Delta g V t^2)^{1/4} \quad (11)$	Viscoso	$L = 1,39(\Delta g A^2 t^{3/2} / \mu^{1/2})^{1/4} \quad (12)$	$R = 0,98(\Delta g V^2 t^{2/3} / \mu^{1/2})^{1/6} \quad (13)$	Tensión superficial	$L = 1,43(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \mu)^{1/4} \quad (14)$	$R = 1,60(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \mu)^{1/4} \quad (15)$
	Fase	Unidimensional	Bidimensional											
Inercial	$L = 1,39(\Delta g A t^2)^{1/3} \quad (10)$	$R = 1,14(\Delta g V t^2)^{1/4} \quad (11)$												
Viscoso	$L = 1,39(\Delta g A^2 t^{3/2} / \mu^{1/2})^{1/4} \quad (12)$	$R = 0,98(\Delta g V^2 t^{2/3} / \mu^{1/2})^{1/6} \quad (13)$												
Tensión superficial	$L = 1,43(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \mu)^{1/4} \quad (14)$	$R = 1,60(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \mu)^{1/4} \quad (15)$												
Stolzenbach et al. (1977).	$\frac{d^2 R_T}{dt^2} = \frac{d^2 R}{dt^2} - \frac{\rho_a C_D U^2}{\rho_0 \sigma} \quad (16)$ <p>Donde R: cambio del radio debido solo al escurrimiento en el régimen gravedad – viscosidad, R<sub>i</sub>: cambio neto transversal del radio frente a la rivera, <math>\rho_a</math> y <math>\rho_0</math>: densidad del aire y del aceite [kg/m³], <math>\sigma</math>: espesor de la mancha [m], C<sub>D</sub>: coeficiente de arrastre de la velocidad del viento.</p>													

	Mackay et al. (1980).	$\frac{dA}{dt} = K_A A^{1/3} \left(\frac{V}{A}\right)^{4/3} \quad (17)$ <p>Donde A: área cubierta por la mancha de petróleo [m<sup>2</sup>], t: tiempo [s], V: volumen inicial del derramen [m<sup>3</sup>], K<sub>A</sub>: constante (150 s<sup>-1</sup>).</p>
Disolución	Audunson (1979).	$\frac{dm}{dt} = \frac{0,4mU^2 \exp^{-0,5r}}{U_0^2} \quad (18)$ <p>Donde m: masa de la mancha [ton], U: velocidad del viento [m/s], t: tiempo [día] y U<sub>0</sub>: velocidad de referencia (8,5 m/s).</p>
	Cohen et al. (1980).	$N = K_f A_n S \quad (19)$ <p>Donde N: tasa total de disolución de la mancha [g/h], K<sub>f</sub>: coeficiente de transferencia másico, A<sub>n</sub>: área de la mancha [m<sup>2</sup>] y S: solubilidad del petróleo en agua [g/m<sup>3</sup>].</p>
Densidad	Mackay et al. (1980).	$\rho = F_w \rho_w + (1 - f_w)(\rho_0 + C_{dn} f_{evp}) \quad (20)$ <p>Donde F<sub>w</sub>: contenido de agua en la emulsión, F<sub>evp</sub>: fracción de masa evaporada, P<sub>0</sub> y p<sub>w</sub>: densidades del petróleo y del agua respectivamente [kg/m<sup>3</sup>] y C<sub>dn</sub>: valor experimental que depende de la naturaleza del crudo.</p>
	Zapata et al. (2002).	$\rho = \rho_0 + C_1 Fv - C_2 (T_k - T_{k0}) \quad (22)$ <p>Donde P: densidad de la mezcla agua – petróleo [kg/m<sup>3</sup>], P<sub>0</sub>: densidad del petróleo fresco a temperatura estándar [kg/m<sup>3</sup>], T<sub>k0</sub>: temperatura estándar [K], T<sub>k</sub>: temperatura del petróleo y C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>: constantes ajustadas empíricamente (dependen de la naturaleza del material derramado).</p>
Viscosidad	Zapata et al. (2002).	$\mu = \mu_0 * \text{Exp}(v_1 * Fv) \text{Exp}\left[v_2 \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_{ke}}\right)\right] \quad (24)$ <p>Donde μ: viscosidad del petróleo a T<sub>ke</sub> y F<sub>n</sub> [m Pa.s], μ<sub>0</sub>: viscosidad del petróleo fresco a T<sub>ke</sub> [m Pa.s], V<sub>1</sub> y V<sub>2</sub>: constantes, F<sub>v</sub>: fracción del petróleo remanente, T<sub>k</sub>: temperatura del petróleo [K] y T<sub>ke</sub>= temperatura estándar [K].</p>
	Buchanan y Bommele, (1987).	$v_i = v_0 * 10^{4Fv} \exp\left[\frac{2,5Y_w}{(1-0,654Y_w)}\right] \quad (27)$ <p>Donde V<sub>i</sub> es la viscosidad remanente del petróleo [m<sup>2</sup>/s], V<sub>0</sub> es el valor inicial de la viscosidad del petróleo [m<sup>2</sup>/s], F<sub>v</sub> la fracción de crudo evaporado y Y<sub>w</sub> es el contenido de agua.</p>
Emulsificación	Modelo de Mackay et al. (1980).	$\frac{dF_{wc}}{dt} = K_{wc} (U_{10} + 1)^2 \left[\frac{1-F_{wc}}{OC_1}\right] \quad (28)$ <p>Donde F<sub>wc</sub> es la fracción de agua en aceite, K<sub>wc</sub> es el coeficiente de emulsificación 2*10<sup>-6</sup> para petróleo liviano o 4.5*10<sup>-6</sup> para petróleo pesado, U es la velocidad del viento en</p>

		m/s y $C_1$ es 0,7 para petróleo crudo liviano y combustibles pesados y 1,15 para crudos pesados.
	Ramussen (1985) (citado por Wang et al., 2005 [25]).	$Y_w = (1 - e^{-K_A K_B (1 + V_w)^2 t}) / K_B$ <p>Donde <math>Y_w</math> es el contenido de agua en la emulsión, <math>K_A</math> es una constante que depende de la velocidad del viento, <math>K_B</math> es una constante que depende del contenido de agua en una emulsión estable y <math>V_w</math> es la velocidad del viento [m/s].</p>

### ANEXO B: SELECCIÓN DE VALORES DE LAS VARIABLES DE ENTRADA.

Figura B1. Histograma de datos de temperaturas máximas mensuales entre los años 1951 y 2016. Datos tomados de estación meteorológica Cortissoz.

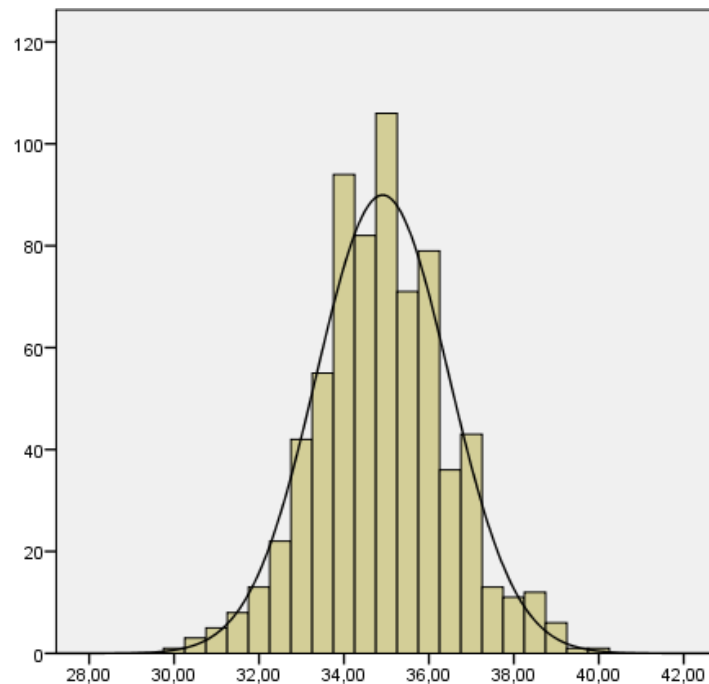


Figura B2. Histograma de datos de temperaturas mínimas mensuales entre los años 1953 y 2016. Datos tomados de estación meteorológica Cortissoz.

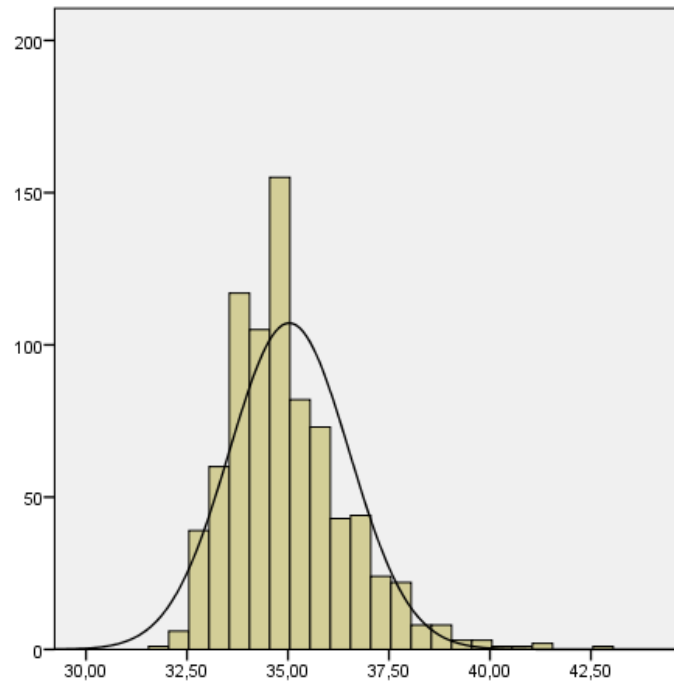


Figura B3. Histograma de datos de temperaturas máximas mensuales entre los años 1943 y 2016. Datos tomados de estación meteorológica Yariguíes.

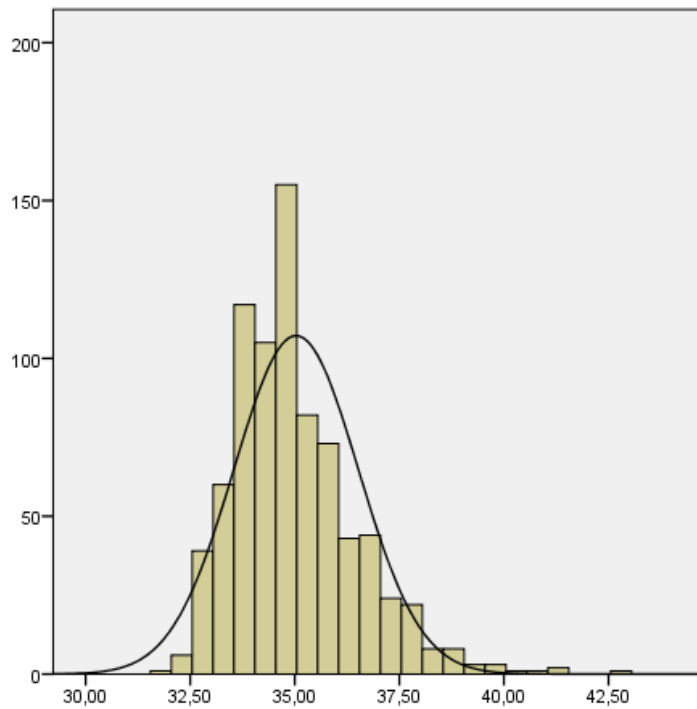
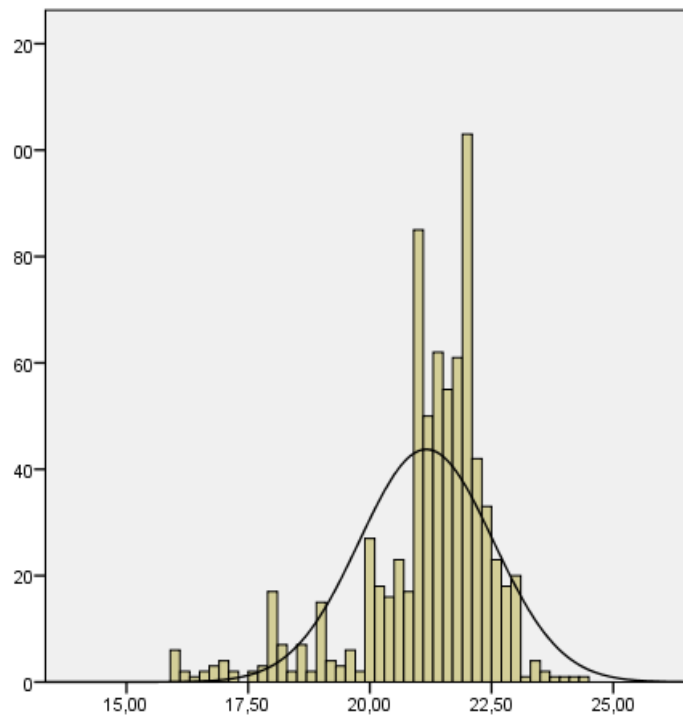


Figura B4. Histograma de datos de temperaturas mínimas mensuales entre los años 1943 y 2016. Datos tomados de estación meteorológica Yariguíes.



Como se observa en las figuras B1-B4, los datos para la temperatura en Magdalena medio y bajo se comportan como una función Gaussiana, por tal razón se tomó como dato representativo la media o valor promedio para cada caso.

Tabla B1. Resumen de datos históricos mensuales de velocidades mínimas y máximas de viento entre los años 1977 y 2016. Datos tomados de estación Cortissoz.

Mes	Valor mínimo [m/s]	Valor máximo [m/s]
Enero	10,1	19,2
Febrero	8,2	12,1
Marzo	8,9	19,6
Abril	5,1	19,6
Mayo	1,5	19,8
Junio	1,9	19,8
Julio	6,2	17,0
Agosto	7,6	20,0

Septiembre	6,2	19,6
Octubre	6,0	20,0
Noviembre	6,2	18,0
Diciembre	6,2	17,0

Tabla B2. Resumen de datos históricos mensuales de velocidades mínimas y máximas de viento entre los años 1978 y 2011. Datos tomados de estación Yariguíes.

Mes	Valor mínimo [m/s]	Valor máximo [m/s]
Enero	6,0	8,0
Febrero	6,5	11,5
Marzo	9,0	11,5
Abril	9,0	15,0
Mayo	8,0	12,0
Junio	6,2	14,0
Julio	9,0	14,5
Agosto	10,3	17,9
Septiembre	4,5	13,5
Octubre	7,5	13,0
Noviembre	7,5	14,5
Diciembre	6,0	13,0

De las tablas B1 y B2 se determinó el menor de los valores mínimos mensuales y el mayor de los valores máximos mensuales para la evaluación del efecto de la velocidad del viento.

Tabla B3. Datos históricos de velocidad del agua entre los años 1976 y 2011. Datos tomados de estación Maldonado.

Fecha [aammdd]	Velocidad media [m/s]	Fecha [aammdd]	Velocidad media [m/s]	Fecha [aammdd]	Velocidad media [m/s]
19760616	0,36	19851001	1,215	19910805	1,527
19761002	0,518	19851108	1,219	19910922	1,529
19761106	0,794	19860215	1,24	19911111	1,53
19771023	0,811	19861111	1,241	19920615	1,547
19790329	0,862	19861213	1,249	19920808	1,548
19790801	0,871	19870221	1,253	19920904	1,563
19790929	0,884	19870415	1,257	19921019	1,569

19791129	0,917	19870511	1,261	19921117	1,585
19800127	0,944	19870613	1,264	19921216	1,588
19800418	0,945	19870718	1,264	19930317	1,608
19800611	0,957	19870827	1,286	19930502	1,639
19800822	0,959	19871013	1,288	19940509	1,644
19800929	0,998	19871113	1,295	19940727	1,649
19801015	1,009	19871218	1,307	19941010	1,655
19801216	1,03	19880613	1,316	19941104	1,659
19810212	1,067	19880718	1,318	19941202	1,721
19810313	1,097	19880724	1,32	19950328	1,726
19810914	1,099	19880907	1,32	19950426	1,778
19820729	1,108	19881013	1,325	19950726	1,789
19821113	1,111	19881112	1,328	19950912	1,815
19821210	1,113	19881210	1,332	19951025	1,824
19830306	1,114	19890319	1,348	19960426	1,857
19830530	1,122	19890421	1,35	19961012	1,865
19830806	1,136	19890604	1,356	19961013	1,901
19830904	1,153	19890818	1,362	19980325	1,916
19830923	1,165	19890920	1,375	19980526	1,921
19831204	1,165	19891109	1,394	19981129	1,949
19840301	1,171	19900317	1,437	19990321	1,983
19840407	1,172	19900704	1,439	19990728	1,997
19840427	1,175	19900903	1,481	20000413	2,054
19840516	1,176	19901018	1,487	20001212	2,079
19840813	1,176	19901122	1,491	20010913	2,16
19841023	1,181	19901218	1,505	20010927	2,238
19850213	1,189	19910415	1,519	20010928	2,312
19850425	1,2	19910530	1,526	20011009	2,316

Tabla B4. Datos históricos de velocidad del agua entre los años 1976 y 2011.

Datos tomados de estación Calamar.

Fecha [aammdd]	Velocidad media [m/s]	Fecha [aammdd]	Velocidad media [m/s]	Fecha [aammdd]	Velocidad media [m/s]
19760616	0,36	19851001	1,215	19910805	1,527
19761002	0,518	19851108	1,219	19910922	1,529
19761106	0,794	19860215	1,24	19911111	1,53
19771023	0,811	19861111	1,241	19920615	1,547
19790329	0,862	19861213	1,249	19920808	1,548
19790801	0,871	19870221	1,253	19920904	1,563
19790929	0,884	19870415	1,257	19921019	1,569

19791129	0,917	19870511	1,261	19921117	1,585
19800127	0,944	19870613	1,264	19921216	1,588
19800418	0,945	19870718	1,264	19930317	1,608
19800611	0,957	19870827	1,286	19930502	1,639
19800822	0,959	19871013	1,288	19940509	1,644
19800929	0,998	19871113	1,295	19940727	1,649
19801015	1,009	19871218	1,307	19941010	1,655
19801216	1,03	19880613	1,316	19941104	1,659
19810212	1,067	19880718	1,318	19941202	1,721
19810313	1,097	19880724	1,32	19950328	1,726
19810914	1,099	19880907	1,32	19950426	1,778
19820729	1,108	19881013	1,325	19950726	1,789
19821113	1,111	19881112	1,328	19950912	1,815
19821210	1,113	19881210	1,332	19951025	1,824
19830306	1,114	19890319	1,348	19960426	1,857
19830530	1,122	19890421	1,35	19961012	1,865
19830806	1,136	19890604	1,356	19961013	1,901
19830904	1,153	19890818	1,362	19980325	1,916
19830923	1,165	19890920	1,375	19980526	1,921
19831204	1,165	19891109	1,394	19981129	1,949
19840301	1,171	19900317	1,437	19990321	1,983
19840407	1,172	19900704	1,439	19990728	1,997
19840427	1,175	19900903	1,481	20000413	2,054
19840516	1,176	19901018	1,487	20001212	2,079
19840813	1,176	19901122	1,491	20010913	2,16
19841023	1,181	19901218	1,505	20010927	2,238
19850213	1,189	19910415	1,519	20010928	2,312
19850425	1,2	19910530	1,526	20011009	2,316

A partir de los datos presentados en las tablas B3 y B4, se determinó el valor mínimo y máximo de velocidad del agua para cada lugar de evaluación.

Aunque la carga de sedimentos no es un factor tenido en cuenta en la evaluación realizada en el presente trabajo, es un valor de entrada requerido por ADIOS y por tanto fue necesario encontrar un dato de carga de sedimentos representativo para cada lugar. Los datos obtenidos de IDEAM para esta variable se organizaron en dos histogramas y se tomó la marca de clase del rango con mayor frecuencia, como se observa en las figuras B5 y B6.

Figura B5. Histograma de datos de carga de sedimentos del río entre los años 1972 y 2011. Datos tomados de estación Calamar.

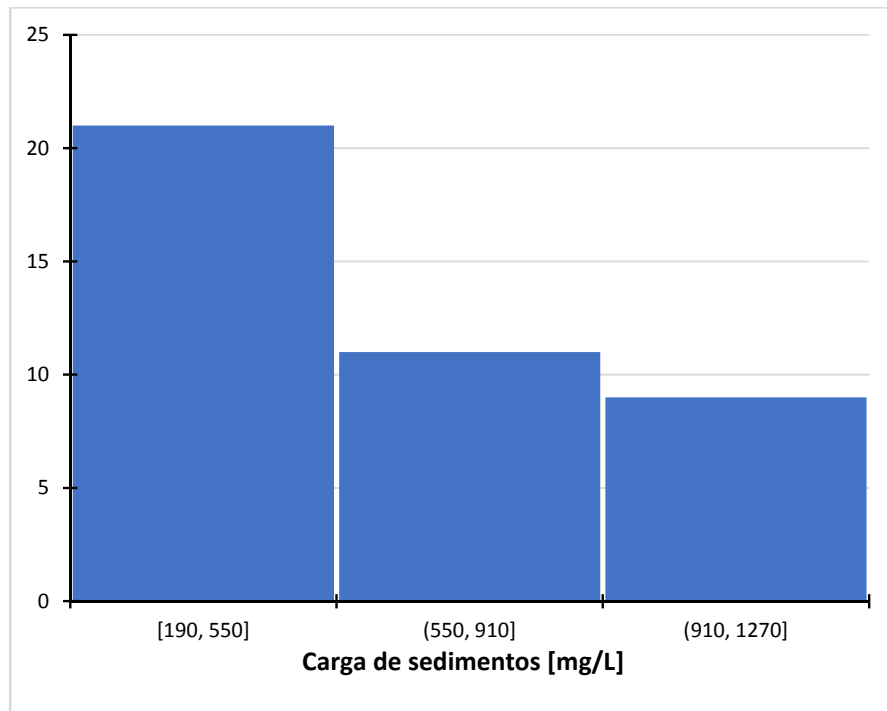
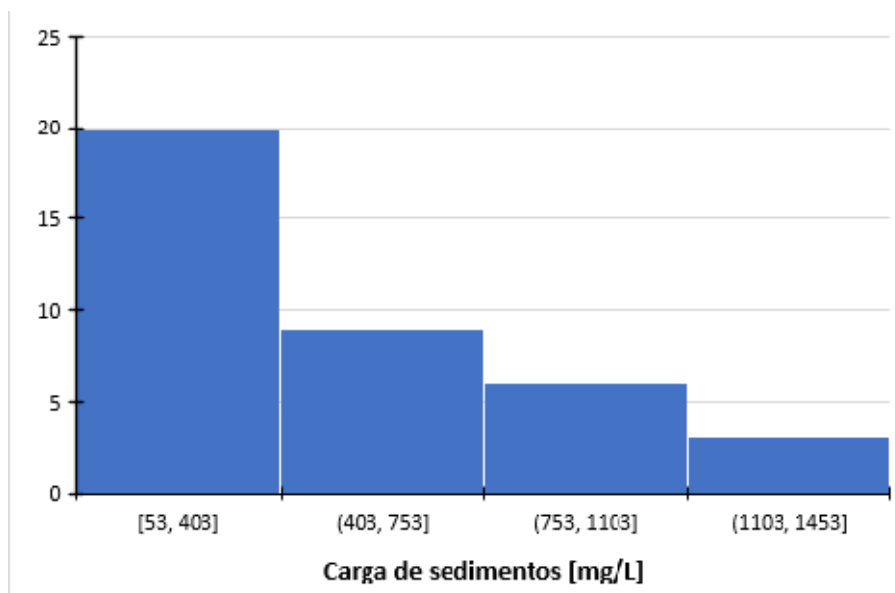


Figura B6. Histograma de datos de carga de sedimentos del río entre los años 1972 y 2011. Datos tomados de estación Maldonado.



## ANEXO C: MATRIZ DE ESCENARIOS ESTOCÁSTICOS.

Tabla C1. Escenarios estocásticos 1-64 de Magdalena bajo.

Escenario	Tipo de crudo [°API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada [Bbl]	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [°C]	Turbulencia del agua	Escenario	Tipo de crudo [°API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada [Bbl]	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [°C]	Turbulencia del agua
1	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia	33	19.8	Continuo	150	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia
2	40.2	Continuo	150	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia	34	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia
3	40.2	Continuo	10000	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia	35	19.8	Continuo	150	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia
4	40.2	Continuo	150	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	36	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
5	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia	37	40.2	Continuo	10000	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia
6	19.8	Continuo	10000	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia	38	19.8	Continuo	10000	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia
7	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia	39	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia
8	40.2	Continuo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia	40	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia
9	40.2	Continuo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	41	40.2	Continuo	150	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia
10	19.8	Continuo	150	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia	42	40.2	Continuo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia
11	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia	43	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia
12	19.8	Continuo	150	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia	44	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia
13	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	45	19.8	Continuo	150	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia
14	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia	46	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia
15	19.8	Continuo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia	47	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia
16	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia	48	40.2	Continuo	150	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia
17	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia	49	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
18	40.2	Continuo	150	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia	50	40.2	Continuo	150	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
19	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia	51	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia
20	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	52	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia
21	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia	53	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia
22	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia	54	40.2	Continuo	150	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia
23	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia	55	19.8	Continuo	150	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia
24	19.8	Continuo	10000	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia	56	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia
25	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia	57	19.8	Continuo	10000	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia
26	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	58	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia
27	19.8	Continuo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia	59	40.2	Continuo	150	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia
28	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia	60	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia
29	40.2	Continuo	10000	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia	61	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia
30	40.2	Continuo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	62	19.8	Continuo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
31	40.2	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia	63	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
32	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia	64	40.2	Continuo	150	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia

Tabla C2. Escenarios estocásticos 65-128 de Magdalena bajo.

Escenario	Tipo de crudo [°API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [°C]	Turbulencia del agua	Escenario	Tipo de crudo [°API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [°C]	Turbulencia del agua
65	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia	97	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia
66	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia	98	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia
67	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia	99	40.2	Continuo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
68	19.8	Continuo	150	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia	100	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia
69	40.2	Continuo	150	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia	101	19.8	Continuo	10000	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia
70	40.2	Continuo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia	102	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia
71	19.8	Continuo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	103	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
72	19.8	Continuo	150	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia	104	40.2	Continuo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia
73	19.8	Continuo	150	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia	105	19.8	Continuo	10000	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia
74	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia	106	19.8	Continuo	150	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia
75	19.8	Continuo	10000	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia	107	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia
76	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	108	19.8	Continuo	150	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia
77	19.8	Continuo	10000	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia	109	40.2	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
78	19.8	Continuo	150	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia	110	40.2	Continuo	10000	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia
79	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	111	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	34.91	Sin turbulencia
80	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia	112	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia
81	40.2	Continuo	10000	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia	113	19.8	Continuo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia
82	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia	114	19.8	Continuo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia
83	40.2	Continuo	150	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia	115	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia
84	40.2	Instantáneo	150	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia	116	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	1N	34.91	Sin turbulencia
85	40.2	Continuo	150	2.519 N	20 N	22.19	Con turbulencia	117	40.2	Continuo	150	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia
86	40.2	Continuo	10000	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia	118	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
87	40.2	Continuo	150	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia	119	19.8	Continuo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Con turbulencia
88	19.8	Continuo	150	2.519 N	20 N	22.19	Sin turbulencia	120	40.2	Continuo	150	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia
89	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	34.91	Sin turbulencia	121	19.8	Continuo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia
90	19.8	Continuo	150	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia	122	19.8	Continuo	150	0.204 N	20 N	22.19	Sin turbulencia
91	19.8	Continuo	150	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia	123	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	22.19	Con turbulencia
92	40.2	Instantáneo	10000	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia	124	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia
93	19.8	Instantáneo	10000	0.204 N	20 N	34.91	Con turbulencia	125	40.2	Continuo	10000	0.204 N	1N	22.19	Sin turbulencia
94	19.8	Instantáneo	150	0.204 N	20 N	22.19	Con turbulencia	126	40.2	Continuo	150	2.519 N	1N	34.91	Con turbulencia
95	40.2	Continuo	10000	0.204 N	1N	34.91	Con turbulencia	127	40.2	Continuo	10000	2.519 N	1N	22.19	Con turbulencia
96	19.8	Instantáneo	10000	2.519 N	20 N	34.91	Sin turbulencia	128	19.8	Instantáneo	150	2.519 N	1N	22.19	Sin turbulencia

Tabla C3. Escenarios estocásticos 1-64 de Magdalena medio.

Escenario	Tipo de crudo [ API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada [Bbl]	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [ °C]	Turbulencia del agua	Escenario	Tipo de crudo [ API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada [Bbl]	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [ °C]	Turbulencia del agua
1	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación	33	19.8	Continuo	150	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación
2	40.2	Continuo	150	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación	34	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación
3	40.2	Continuo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación	35	19.8	Continuo	150	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación
4	40.2	Continuo	150	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación	36	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación
5	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación	37	40.2	Continuo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación
6	19.8	Continuo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación	38	19.8	Continuo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación
7	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación	39	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación
8	40.2	Continuo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación	40	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación
9	40.2	Continuo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación	41	40.2	Continuo	150	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación
10	19.8	Continuo	150	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación	42	40.2	Continuo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación
11	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación	43	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación
12	19.8	Continuo	150	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación	44	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación
13	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación	45	19.8	Continuo	150	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación
14	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación	46	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación
15	19.8	Continuo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación	47	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación
16	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación	48	40.2	Continuo	150	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación
17	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación	49	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación
18	40.2	Continuo	150	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación	50	40.2	Continuo	150	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación
19	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación	51	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación
20	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación	52	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación
21	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación	53	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación
22	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación	54	40.2	Continuo	150	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación
23	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación	55	19.8	Continuo	150	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación
24	19.8	Continuo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación	56	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación
25	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación	57	19.8	Continuo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación
26	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación	58	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación
27	19.8	Continuo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación	59	40.2	Continuo	150	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación
28	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación	60	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación
29	40.2	Continuo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación	61	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación
30	40.2	Continuo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación	62	19.8	Continuo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación
31	40.2	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación	63	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación
32	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación	64	40.2	Continuo	150	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación

Tabla C4. Escenarios estocásticos 65-128 de Magdalena medio.

Escenario	Tipo de crudo [API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [°C]	Turbulencia del agua	Escenario	Tipo de crudo [API]	Tipo de derrame	Cantidad derramada	Velocidad del agua [m/s]	Velocidad del viento [m/s]	Temperatura del agua [°C]	Turbulencia del agua
65	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación	97	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación
66	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación	98	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación
67	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación	99	40.2	Continuo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación
68	19.8	Continuo	150	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación	100	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación
69	40.2	Continuo	150	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación	101	19.8	Continuo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación
70	40.2	Continuo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación	102	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación
71	19.8	Continuo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación	103	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación
72	19.8	Continuo	150	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación	104	40.2	Continuo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación
73	19.8	Continuo	150	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación	105	19.8	Continuo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación
74	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación	106	19.8	Continuo	150	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación
75	19.8	Continuo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación	107	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación
76	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación	108	19.8	Continuo	150	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación
77	19.8	Continuo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación	109	40.2	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación
78	19.8	Continuo	150	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación	110	40.2	Continuo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación
79	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación	111	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	35.03	Sin perturbación
80	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación	112	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación
81	40.2	Continuo	10000	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación	113	19.8	Continuo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación
82	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación	114	19.8	Continuo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación
83	40.2	Continuo	150	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación	115	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación
84	40.2	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación	116	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	35.03	Sin perturbación
85	40.2	Continuo	150	2.316 N	18 N	21.16	Con perturbación	117	40.2	Continuo	150	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación
86	40.2	Continuo	10000	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación	118	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación
87	40.2	Continuo	150	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación	119	19.8	Continuo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Con perturbación
88	19.8	Continuo	150	2.316 N	18 N	21.16	Sin perturbación	120	40.2	Continuo	150	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación
89	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Sin perturbación	121	19.8	Continuo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación
90	19.8	Continuo	150	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación	122	19.8	Continuo	150	0.36 N	18 N	21.16	Sin perturbación
91	19.8	Continuo	150	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación	123	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Con perturbación
92	40.2	Instantáneo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación	124	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación
93	19.8	Instantáneo	10000	0.36 N	18 N	35.03	Con perturbación	125	40.2	Continuo	10000	0.36 N	4 N	21.16	Sin perturbación
94	19.8	Instantáneo	150	0.36 N	18 N	21.16	Con perturbación	126	40.2	Continuo	150	2.316 N	4 N	35.03	Con perturbación
95	40.2	Continuo	10000	0.36 N	4 N	35.03	Con perturbación	127	40.2	Continuo	10000	2.316 N	4 N	21.16	Con perturbación
96	19.8	Instantáneo	10000	2.316 N	18 N	35.03	Sin perturbación	128	19.8	Instantáneo	150	2.316 N	4 N	21.16	Sin perturbación

## ANEXO D: TABLAS DE ANÁLISIS ANOVA.

Tabla D1. Análisis ANOVA del porcentaje dispersado para Magdalena medio.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	5253,13	1	5253,13	23,60	0,0000
	B: Tipo derrame	195,03	1	195,03	0,88	0,3512
	C: Cantidad derramada	52,53	1	52,53	0,24	0,6280
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	231,12	1	231,12	1,04	0,3103
	E: Magnitud viento	5025,03	1	5025,03	22,57	0,0000
	F: Temperatura	30,03	1	30,03	0,13	0,7141
	G: Oleaje	6815,28	1	6815,28	30,61	0,0000
Residuos		26714,80	120	222,62		
Total		44317,00	127			

Tabla D2. Análisis ANOVA del porcentaje remanente para Magdalena medio.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	57545,30	1	57545,30	353,47	0,0000
	B: Tipo derrame	684,50	1	684,50	4,20	0,0425
	C: Cantidad derramada	722,00	1	722,00	4,43	0,0373
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	0,00	1	0,00	0,00	1,0000
	E: Magnitud viento	4140,50	1	4140,50	25,43	0,0000
	F: Temperatura	675,28	1	675,28	4,15	0,0439
	G: Oleaje	2363,28	1	2363,28	14,52	0,0002
Residuos		19536,00	120	162,80		
Total		85666,90	127			

Tabla D3. Análisis ANOVA del porcentaje de agua en emulsión para Magdalena medio.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	12964,50	1	12964,50	1883,91	0,0000
	B: Tipo derrame	1,57	1	1,57	0,23	0,6332
	C: Cantidad derramada	0,69	1	0,69	0,10	0,7520
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	3,57	1	3,58	0,52	0,4723
	E: Magnitud viento	0,00	1	0,00	0,00	0,9839
	F: Temperatura	555,27	1	555,28	80,69	0,0000
	G: Oleaje	3,06	1	3,06	0,45	0,5060
Residuos		825,80	120	6,88		
Total		14354,50	127			

Tabla D4. Análisis ANOVA de cambios en la densidad del crudo para Magdalena medio.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	42,78	1	42,78	7,19	0,0083
	B: Tipo derrame	0,12	1	0,12	0,02	0,8850
	C: Cantidad derramada	12,50	1	12,50	2,10	0,1497
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	16,53	1	16,53	2,78	0,0981
	E: Magnitud viento	5,28	1	5,28	0,89	0,3479
	F: Temperatura	378,12	1	378,12	63,59	0,0000
	G: Oleaje	9,03	1	9,03	1,52	0,2202
Residuos		713,59	120	5,95		
Total		1177,97	127			

Tabla D5. Análisis ANOVA de cambios en la viscosidad del crudo para Magdalena medio.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	2,66E11	1	2,66E11	8542,13	0,0000
	B: Tipo derrame	8,51E6	1	8,51E6	0,27	0,6025
	C: Cantidad derramada	6,17E8	1	6,17E8	19,77	0,0000
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	3,44E6	1	3,44E6	0,11	0,7403
	E: Magnitud viento	1,18E8	1	1,18E8	3,79	0,0540
	F: Temperatura	4,89E9	1	4,89E9	156,66	0,0000
	G: Oleaje	70312,50	1	70312,5	0,00	0,9622
Residuos		3,74E9	120	3,12E7		
Total		2,76E11	127			

Tabla D6. Análisis ANOVA del porcentaje evaporado para Magdalena bajo.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	25557,30	1	25557,30	303,91	0,0000
	B: Tipo derrame	1086,97	1	1086,97	12,93	0,0005
	C: Cantidad derramada	1369,04	1	1369,04	16,28	0,0001
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	143,22	1	143,22	1,70	0,1944
	E: Magnitud viento	16,40	1	16,40	0,19	0,6596
	F: Temperatura	220,93	1	220,93	2,63	0,1077
	G: Oleaje	708,80	1	708,80	8,43	0,0044
Residuos		9923,27	118	84,09		
Total		38833,50	125			

Tabla D7. Análisis ANOVA del porcentaje dispersado para Magdalena bajo.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	4402,67	1	4402,67	8,64	0,0040
	B: Tipo derrame	2381,56	1	2381,56	4,67	0,0326
	C: Cantidad derramada	2450,48	1	2450,48	4,81	0,0303
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	6,83065	1	6,83	0,01	0,9080
	E: Magnitud viento	7883,21	1	7883,21	15,47	0,0001
	F: Temperatura	593,37	1	593,37	1,16	0,2827
	G: Oleaje	8071,06	1	8071,06	15,84	0,0001
Residuos		60113,00	118	509,43		
Total		85987,20	125			

Tabla D8. Análisis ANOVA del porcentaje remanente para Magdalena bajo.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	50931,90	1	50931,90	174,89	0,0000
	B: Tipo derrame	262,26	1	262,26	0,90	0,3446
	C: Cantidad derramada	161,01	1	161,01	0,55	0,4586
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	80,95	1	80,95	0,28	0,5990
	E: Magnitud viento	8649,00	1	8649,00	29,70	0,0000
	F: Temperatura	1538,89	1	1538,89	5,28	0,0233
	G: Oleaje	3972,59	1	3972,59	13,64	0,0003
Residuos		34363,30	118	291,21		
Total		99064,60	125			

Tabla D9. Análisis ANOVA del porcentaje de agua en emulsión para Magdalena bajo.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	5313,25	1	5313,25	44,24	0,0000
	B: Tipo derrame	326,68	1	326,68	2,72	0,1017
	C: Cantidad derramada	13,70	1	13,70	0,11	0,7361
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	2,75	1	2,747	0,02	0,8800
	E: Magnitud viento	8954,05	1	8954,05	74,56	0,0000
	F: Temperatura	11,64	1	11,64	0,10	0,7561
	G: Oleaje	14886,60	1	14886,60	123,96	0,0000
Residuos		14170,90	118	120,09		
Total		44178,80	125			

Tabla D10. Análisis ANOVA de cambios en la densidad del crudo para Magdalena bajo.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	6329,07	1	6329,07	46,72	0,0000
	B: Tipo derrame	237,33	1	237,33	1,75	0,1882
	C: Cantidad derramada	5,27	1	5,27	0,04	0,8439
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	0,57	1	0,57	0,00	0,9484
	E: Magnitud viento	4253,57	1	4253,57	31,40	0,0000
	F: Temperatura	1339,43	1	1339,43	9,89	0,0021
	G: Oleaje	9188,33	1	9188,33	67,82	0,0000
Residuos		15986,00	118	135,47		
Total		37440,30	125			

Tabla D11. Análisis ANOVA de cambios en la viscosidad del crudo para Magdalena bajo.

Fuente		SC	GL	CM	F	valor-P
<b>Condiciones del derrame</b>	A: Tipo crudo	1,49E11	1	1,49E11	382,43	0,0000
	B: Tipo derrame	4,66E6	1	4,66E6	0,01	0,9130
	C: Cantidad derramada	5,979E8	1	5,97E8	1,53	0,2179
<b>Características del lugar del derrame</b>	D: Velocidad agua	2,54E6	1	2,54E6	0,01	0,9358
	E: Magnitud viento	2,81E10	1	2,81E10	72,26	0,0000
	F: Temperatura	1,51E9	1	1,51E9	3,89	0,0510
	G: Oleaje	9,77E9	1	9,77E9	25,08	0,0000
Residuos		4,59E10	118	3,89E8		
Total		2,37E11	125			