

Influencia de los dispersantes en la contaminación por BTEX en un derrame profundo de hidrocarburos

Influence of dispersants on BTEX contamination in a deep oil spill

DOI: 10.26640/22159045.423

Fecha de recepción: 2016-02-01 / Fecha de aceptación: 2016-05-01

Rubén A. Rodríguez* y Serguei A. Lonin**

Rodríguez, R. y Lonin, S. (2016). *Influencia de los dispersantes en la contaminación por BTEX en un derrame profundo de hidrocarburos*. Bol. Cient.CIOH (34):3-12. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.423

RESUMEN

La información de eventos catastróficos como el ocurrido en la plataforma "Deepwater Horizon" en el Golfo de México en el año 2010, se utiliza para analizar la influencia de los dispersantes químicos en la contaminación por benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) en un derrame profundo de hidrocarburos. La investigación analizó la variabilidad de los campos de concentración de BTEX en un volumen del agua oceánica, con relación al uso de dispersantes químicos en un derrame profundo, manteniendo constantes las condiciones oceanográficas de la zona afectada, tales como, la estratificación termohalina, los campos de corrientes y así mismo las características del fluido derramado. Los resultados de la investigación demostraron que el uso de dispersantes químicos en un derrame en altas profundidades, incrementa la contaminación por BTEX, no detectables por los sensores remotos y observaciones visuales.

PALABRAS CLAVES: modelo hidrodinámico, derrame profundo, BTEX, aproximación euleriana.

ABSTRACT

Information on catastrophic events such as the one that occurred in the "Deepwater Horizon" Platform in the Gulf of Mexico in 2010, is used to analyze the influence of chemical dispersants in the contamination by benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) in a hydrocarbons deep spill. The research analyzed the variability of BTEX concentration fields in a volume of oceanic water in relation to the use of chemical dispersants in a deep spill, keeping constant the oceanographic conditions of the affected area, such as, thermohaline stratification, the currents fields of and the characteristics of the spilled fluid. The results of this research showed that the use of chemical dispersants in a spill at high depths increases the contamination by BTEX, that is not detectable by remote sensing and visual observations.

KEYWORDS: Hydrodynamic model, deep spill, BTEX, eulerian approach.

* Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval, Marítima y Fluvial (Cotecmar). Bogotá. Correo: rrodriguez@cotecmar.com
** Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Facultad de Oceanografía Física (Grupo de Investigación en Oceanología-GIO). Cartagena de Indias. Correo: slonin@costa.net.co

INTRODUCCIÓN

A partir del 20 de abril de 2010, millones de barriles de petróleo surgieron del fondo marino del Golfo de México tras el hundimiento de la Plataforma "Deepwater Horizon" (DWH; pozo Macondo) a 1.5 km de profundidad (Reddy *et al.*, 2012).

Por eventos como este, conviene detenerse en investigación al respecto. Así, desarrollo de modelos numéricos para el entendimiento del comportamiento físico y el transporte de los hidrocarburos en un derrame profundo en el medio marino han sido estudiados (Yapa *et al.*, 2012; Bandara y Yapa, 2011; Johansen, 2000; Lee y Cheung, 1990; Spaulding *et al.*, 2000; Udita y Poojitha, 2011; Yapa y Chen, 2004; Zheng y Yapa, 2001).

En cualquier derrame, los compuestos benceno, tolueno, etilbenceno, y xileno (BTEX) son de particular interés (Reddy *et al.*, 2012), especialmente por su grado de toxicidad. Estudios *in vitro* sugieren que el benceno podría causar roturas cromosómicas e interferir con la segregación cromosómica; el tolueno es neurotóxico y teratogénico; respecto al xileno, la exposición crónica a este compuesto está asociada a efectos nocivos en el sistema nervioso, hígado y riñones (Christofoletti *et al.*, 2011). Estudios de biología marina han evidenciado trazas de BTEX en el interior de cadáveres de animales marinos después del derrame de petróleo del buque Exxon Valdez en Prince William Sound, Alaska en 1989 (Ballachey y Kloecker, 1997).

Modelos desarrollados en oceanografía física y química han evidenciado que los compuestos aromáticos se solubilizan en la columna de agua en altas profundidades y hacen parte de la contaminación por las fracciones más tóxicas de hidrocarburos, no detectables por los sensores remotos y observaciones visuales (Rodríguez y Lonin, 2017).

Para minimizar los impactos en los derrames de hidrocarburos en el mar, las empresas petroleras frecuentemente utilizan medios químicos, tales como dispersantes (Cámara, *et al.*, 2006). Un dispersante es una mezcla

de disolventes, aditivos y tensioactivos. Estos permiten reducir la tensión superficial por un factor de 20 o más, disminuyendo el tamaño medio de las gotas en la formación de éstas [sic], causada por el cizallamiento turbulento del fluido (Li y Garret, 1998).

Los dispersantes que se aplican directamente al cabezal del pozo, modifican las propiedades físicas y químicas del petróleo que brota de una fuga profunda, dividiéndolo en minúsculas gotas de apenas 10 micrones de diámetro (Schmidt, 2011).

La decisión de utilizar dispersantes siempre implica contrapartidas ambientales. El petróleo sin dispersar flota sobre el agua, afectando a las aves y a los mamíferos marinos y contaminando los recursos costeros. Sin embargo, el petróleo disperso y sus componentes, es transportado en el interior de la columna de agua, impactando el primer nivel de la cadena trófica marina (Schmidt, 2011).

Aproximadamente, 7 millones de litros de dispersante fueron usados en el incidente de DWH, de los cuales 3 millones de litros fueron por adición submarina cerca a la descarga. Inicialmente, con un flujo de 45 litros/minuto, más tarde reducido a 26 litros/minuto. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) impuso el uso máximo submarino de dispersantes de 39.36 litros/minuto (Lehr *et al.*, 2010).

Por su parte, productos utilizados como dispersantes en el derrame DWH, contienen: 2-butoxietanol (3-BE), sales de ácido sulfónico, orgánica como surfactante y propilenglicol como estabilizador (Schmidt, 2011).

En Colombia la autorización de dispersantes está en cabeza del Comité Técnico Nacional del Plan Nacional de Contingencia PNC (1999) (Miranda, *et al.*, 2008).

En la presente investigación se realizó una modelación numérica de derrame en DWH bajo las condiciones oceanográficas registradas en el momento del siniestro y se demostró la importancia del comportamiento de la parte soluble de hidrocarburos en condiciones de uso de dispersantes.

METODOLOGÍA

En la presente investigación se utilizó el modelo hidrodinámico ECOMSED [*Three-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model*, (HydroQual, 2007)] para la simulación de los campos eulerianos de BTEX, cuya fuente fue la pluma lagrangiana del derrame profundo con y sin la aplicación de dispersantes químicos.

En otros términos, en la investigación se analizó cómo cambia la concentración de BTEX en un volumen del agua oceánica con relación al uso de dispersantes químicos en un derrame profundo, manteniendo constantes las condiciones de la zona afectada, tales como, la estratificación termohalina, los campos de corrientes, la topografía del nivel del mar y así mismo las características del fluido derramado.

Para simular el comportamiento de BTEX solubilizado en un derrame profundo de hidrocarburos, fue necesario conocer el comportamiento lagrangiano de la trayectoria de la pluma en 3D para el petróleo derramado con y sin el uso de dispersantes.

En el modelo lagrangiano, cada partícula de la pluma de hidrocarburos fue definida en forma esférica, caracterizada por su ubicación en tres dimensiones.

En general, en un derrame profundo de hidrocarburos, los tamaños típicos de las gotas varían de 1 a 10 mm. Los desarrollos recientes muestran una metodología para calcular las distribuciones de tamaño de gotas de petróleo. Estudios han mostrado una comparación entre la

distribución computacional y experimental para tamaño de gotas (Yapa *et al.*, 2012).

De acuerdo con Yapa *et al.* (2012) los tamaños típicos de las gotas basados en métodos experimentales tienen una distribución predominante en diámetros que oscilan entre los 2, 3 y 4 mm, sin embargo, esta distribución es distinta en presencia de dispersantes químicos; situación particular donde prevalece una distribución por diámetros entre 600, 700 y 800 μm (Yapa *et al.*, 2012).

La representación de los procesos de transporte en el océano, debió ajustarse a la escala espacio-temporal en la que tuvo lugar el derrame DWH en junio de 2010, con posición geográfica de la plataforma de 28°12' N, 88°48' W (Conabio, 2010).

El dominio del modelo (35 x 35 km) fue centrado en el lugar del derrame DWH. Se tuvieron en cuenta los estudios desarrollados por Reddy *et al.* (2012) sobre el comportamiento de la parte soluble; según este trabajo, la dilución es despreciable en distancias superiores a 27 km del origen (Reddy *et al.*, 2012; Zhengzhen *et al.*, 2013).

Para lograr una resolución de 500 metros, fue necesario adaptar la información termohalina disponible en la simulación del modelo mediante un arranque en frío previo (Locarnini *et al.*, 2015). Información sobre perfiles de temperatura y salinidad para la construcción de los campos termohalinos para diferentes fechas fue encontrada en la siguiente dirección: <https://www.nodc.noaa.gov/deepwaterhorizon/>. La Tabla 1 muestra las características de hidrocarburos introducidos al modelo.

Tabla 1. Parámetros usados en la simulación.

Rata de descarga petróleo - m^3/s	0.0184
Densidad del petróleo - kg/m^3	920
Diámetros de gotas de petróleo sin uso de dispersantes - m	0.002 / 0.003 / 0.004
Diámetros de gotas de petróleo con uso de dispersantes - m	0.0008 / 0.0007 / 0.006

En la Figura 1 se presentan los campos fijados y modelados de salinidad y temperatura a 500 metros de profundidad, respectivamente.

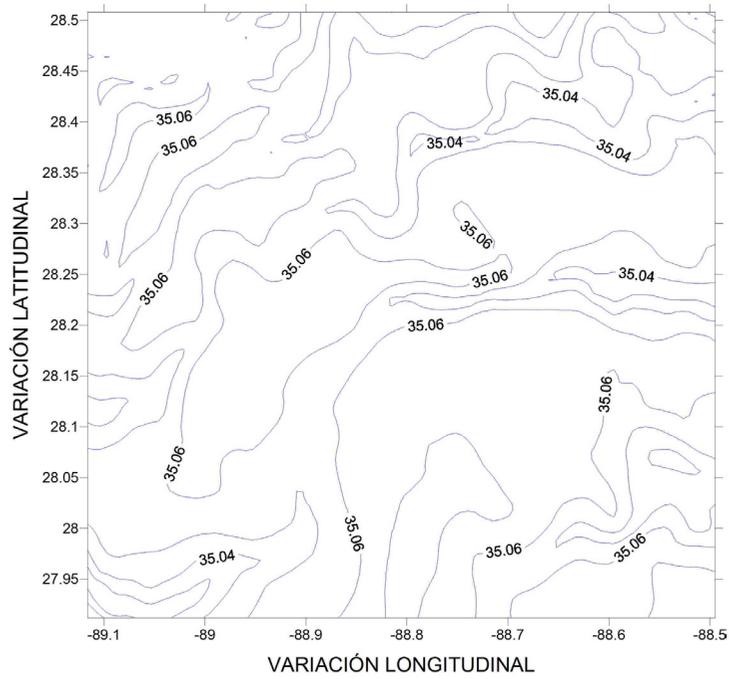


Figura 1A. Campo de salinidad a 500 metros de profundidad.

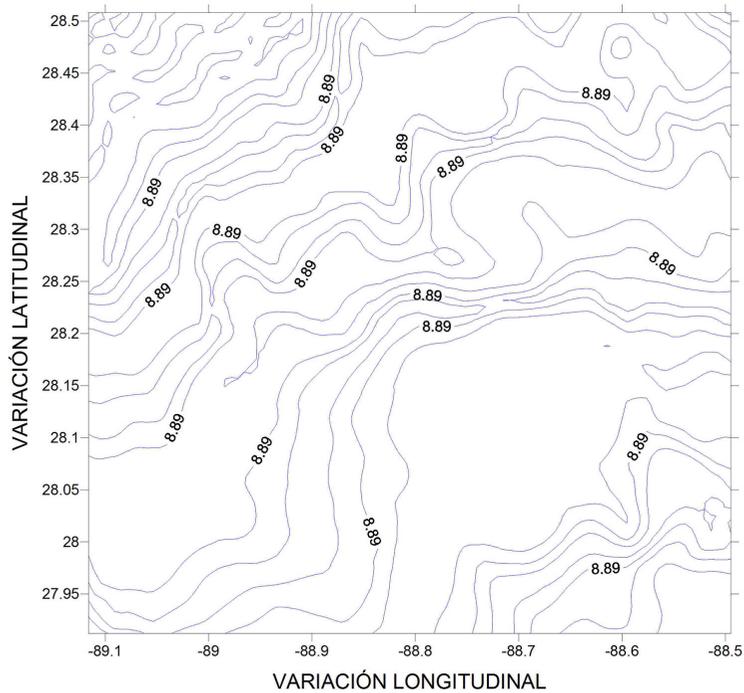


Figura 1B. Campo de temperatura (°C) a 500 metros de profundidad.

En la Figura 2 se representan los campos de corrientes, resultado de la corrida del modelo hidrodinámico ECOMSED para el 12 de junio de 2010.

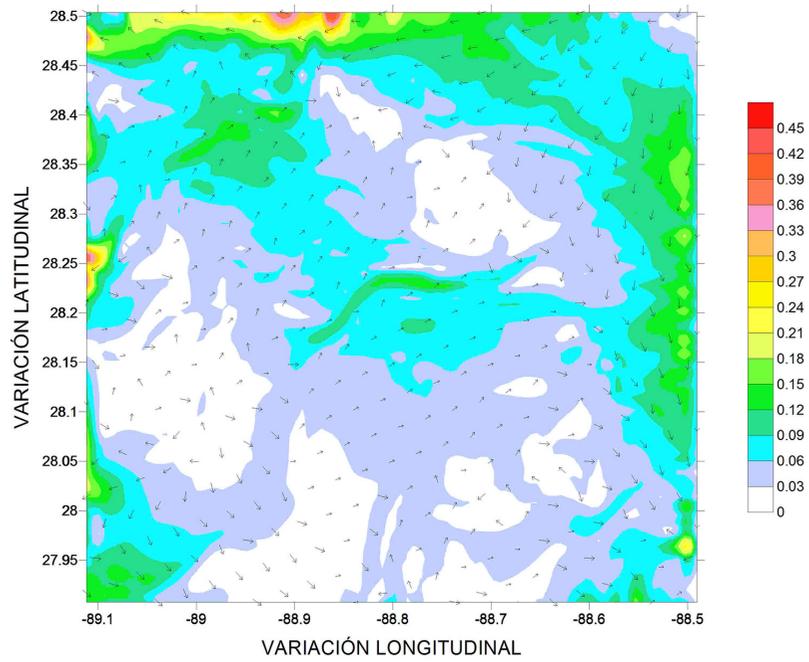


Figura 2A. Campo de corrientes a 500 metros de profundidad.

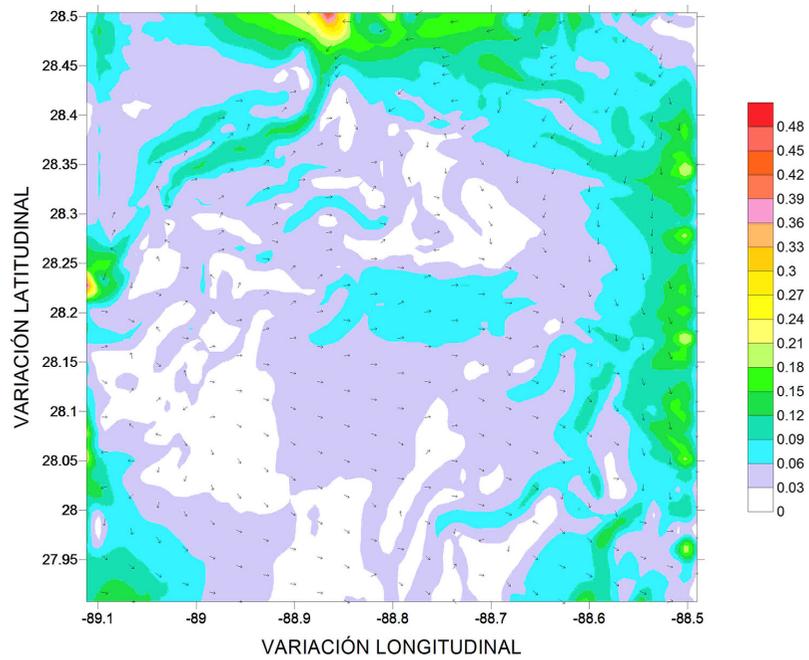


Figura 2B. Campo de corrientes a 1000 metros de profundidad.

También cabe indicar que el comportamiento de la pluma de un derrame de hidrocarburos es influenciado por diversos procesos físicos y químicos, entre los cuales está la formación de hidratos de metano. Sin embargo, en el modelo descrito en la presente investigación, la dinámica de la pluma no incluye los procesos físico-químicos asociados con la formación y disolución de hidratos de gas (Chen y Yapa, 2004).

Para la construcción del modelo euleriano de BTEX solubilizados, los volúmenes de las celdas en la malla de cálculo se definieron como volúmenes de control fijo alrededor de cada gota de la pluma lagrangiana para los dos casos, con y sin dispersantes químicos.

Igualmente, en cada modelo (sin y con dispersantes) se definió constante el tiempo y el flujo másico del derrame. Otros parámetros fueron calculados como variables en el modelo ya que son dependientes del diámetro de las gotas. Por ejemplo, el coeficiente de transferencia de masa debió ser calculado para cada condición a analizar (Branan, 2000).

La rata de cambio en la masa de BTEX contenida en las gotas con y sin dispersantes, debido a la disolución en la columna de agua, fue expresada por la siguiente ecuación (Zheng y Yapa, 2001):

$$\frac{dn}{dt} = -KA(S - C_a) \quad (1)$$

Aquí, t es tiempo; n es el número de moles de componente solubilizado; K es el coeficiente de transferencia de masa para los BTEX (m/s); A es el área total de superficie de cada una de las gotas en la fase líquida (m²); S es la solubilidad del BTEX (mol/m³) y C_a es la concentración existente del BTEX disuelto en el ambiente (mol/m³). Luego, se presumió que C_a en (1) es despreciable ($C_a \ll S$).

Para cada condición del derrame, con y sin uso de dispersantes, se utilizó el concepto de coeficiente interno efectivo, tal como se aplica para la transferencia de calor en esferas sólidas (McCabe *et al.*, 2007):

$$K = \frac{10D_v}{D_p} \quad (2)$$

Aquí, D_v es la difusión en el interior de la gota (m²/s); D_p es el diámetro de la gota (m).

El transporte de sustancias es afectado por factores como corrientes, procesos de difusión turbulenta e incluso el cambio de fase de contaminantes (solubilidad). La respectiva ecuación de transporte se describe a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x} + \frac{\partial CV}{\partial y} + \frac{\partial CW}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_c + Q \quad (3)$$

En (3), C es la concentración del contaminante, transportada en el tiempo t y en el espacio (x, y, z) para las respectivas componentes U, V y W de corrientes; Q es la fuente interna debido a la dilución de los componentes de BTEX (kg/m³/s), y F_c representa la difusión horizontal.

En el caso dado, Q es la rata de acumulación del BTEX proveniente de la pluma lagrangiana y es definida mediante las ecuaciones (1) y (2).

Las condiciones en los contornos abiertos del modelo se definieron como $C = 0$, bajo la consideración de que estas se hallan lo suficientemente distantes de la fuente de origen. La condición inicial se definió como $C(t=0) = 0$ ($t=0$ corresponde al inicio del derrame profundo). Para la representación del comportamiento del BTEX, se consideró únicamente el benceno. En la superficie del mar y en el fondo oceánico, el flujo de benceno se asume igual a cero. (Si para el fondo marino esta condición es plenamente aplicable, el flujo nulo en la superficie del mar se asume bajo cierta aproximación debido a la posibilidad de evaporación de la sustancia). Los parámetros necesarios para las fórmulas (1) y (2) se definen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de los fluidos en las simulaciones (Vp representa el volumen de una partícula/gota; NTD es el número total de gotas en la simulación).

Propiedades del fluido sin uso de dispersantes (para tres tamaños de gotas)				
Dp (m)	Dv (m ² /s)	K (m/s)	Vp (m ³)	NTD
0.002	1.49	0.00000745	4.1888E-09	4.12116E+13
0.003	1.49	4.96667E-06	1.41372E-08	1.22108E+13
0.004	1.49	0.000003725	3.35104E-08	5.15145E+12
Propiedades del fluido con uso de dispersantes (para tres tamaños de gotas)				
Dp (m)	Dv (m ² /s)	K (m/s)	Vp (m ³)	NTD
0.0008	1.49	0.000018625	2.68083E-10	6.43931E+14
0.0007	1.49	2.12857E-05	1.79594E-10	9.61203E+14
0.0006	1.49	2.48333E-05	1.13098E-10	1.52635E+15

La validación final de los campos de concentración obtenidos de BTEX no se realizó debido a la falta de observaciones detalladas *in-situ* sobre las sustancias diluidas. Sin embargo, las concentraciones de BTEX calculadas con el uso de dispersantes, concuerdan en el orden de magnitud de datos reportados en informes técnicos (Reddy *et al.*, 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El uso de dispersantes químicos en los derrames profundos de hidrocarburos impacta en el comportamiento de la fase solubilizada de BTEX en el medio marino. La aplicación del modelo euleriano permitió cuantificar la variación de BTEX diluido en

la columna de agua al usar dispersantes químicos en un derrame profundo de hidrocarburos.

Las figuras 3A – 3F representan las variaciones de concentración de BTEX dentro del dominio de estudio para el 12 de junio del 2010 a 1200, 750 y 250 metros de profundidad, con y sin uso de dispersantes químicos.

La distribución de la concentración de BTEX tuvo variación espacial en tres dimensiones. Dado que el origen de la fuga de petróleo está en el centro del dominio, se observa una variación significativa del campo de benceno a diferentes profundidades cuando el derrame de hidrocarburos es influenciado por el uso de dispersantes químicos.

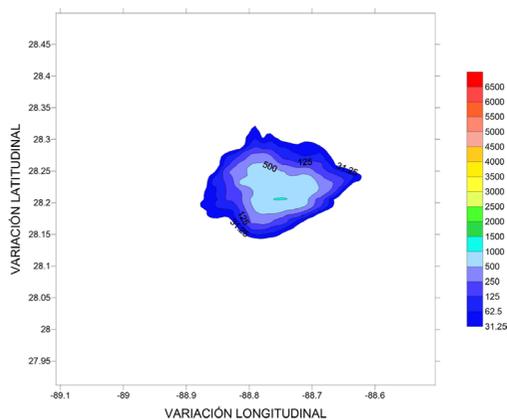


Figura 3A. Campo de BTEX (ppb) a 1200 m, con uso de dispersantes.

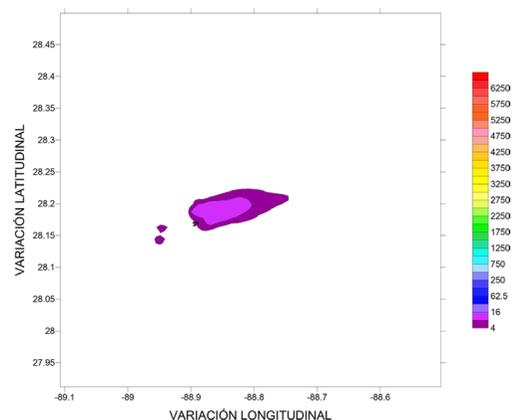


Figura 3B. Campo de BTEX (ppb) a 1200 m, sin uso de dispersantes.

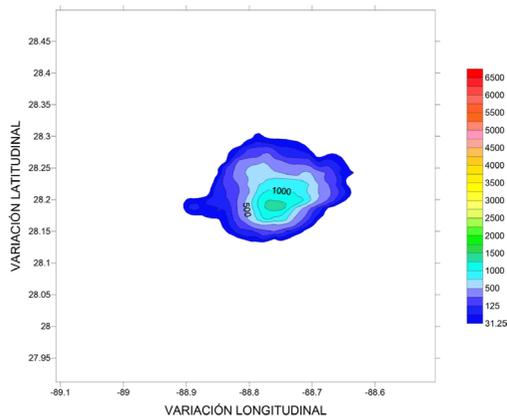


Figura 3C. Campo de BTEX (ppb) a 750 m, con uso de dispersantes.

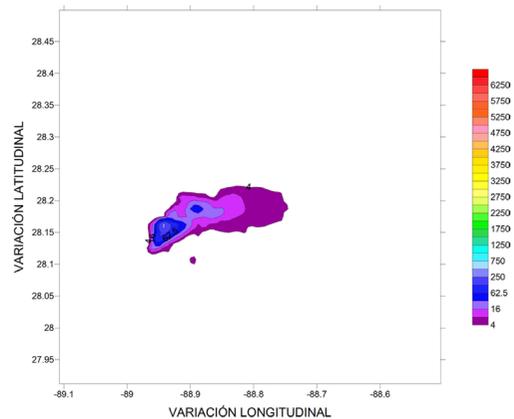


Figura 3D. Campo de BTEX (ppb) a 750 m, sin uso de dispersantes.

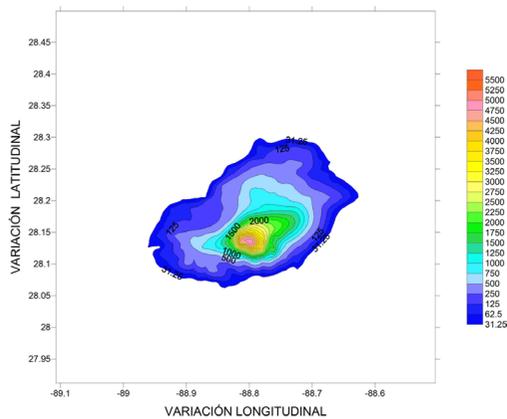


Figura 3E. Campo de BTEX (ppb) a 100 m, con uso de dispersantes.

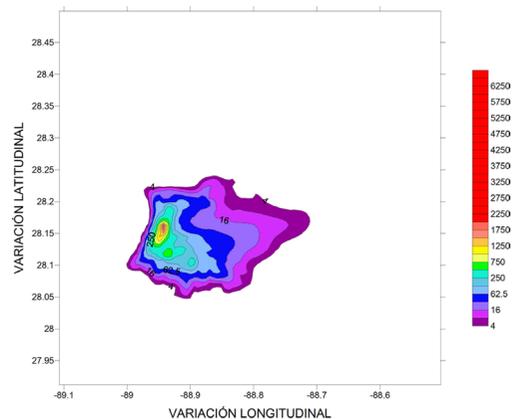


Figura 3F. Campo de BTEX (ppb) a 100 m, sin uso de dispersantes.

El campo de BTEX a 1200 m de profundidad muestra un cambio de concentración de 16 ppb sin dispersantes a 500 ppb con estos. Para el campo de BTEX a 750 m de profundidad, se observa un cambio de concentración de 62 a 1500 ppb sin y con dispersantes químicos, respectivamente. A 100 m de profundidad, esta variación se encuentra de 250 a 2000 ppb para los mismos casos.

En todos los escenarios, el campo de concentración tiene un comportamiento concéntrico y por anillos, disminuyendo hacia la parte periférica del derrame conforme con la tasa de transferencia de masa y los procesos de mezcla horizontal.

Ahora bien, los resultados mencionados demostraron un aumento de la concentración de BTEX entre 8 y 30 veces, aproximadamente, en el caso del uso de dispersantes en el modelo. Se van a realizar unas estimaciones simples. Como se señaló en la metodología, en promedio, el diámetro de gota en un *blow out* es de $D_0 = 3 \text{ mm}$, mientras que el uso de dispersantes disminuye este valor hasta $D_1 = 0.7 \text{ mm}$. Lo último implica que la razón de volúmenes de gotas con y sin dispersantes es de orden de $(D_1/D_0)^3 \ll 1$, y debe caracterizar el aumento de la cantidad de gotas N , es decir, $(D_1/D_0)^3 = 1/N$. Con los valores tomados de los diámetros de gotas, esta proporción indica un aumento de la cantidad

de gotas $N = 78.7$ veces mayor respecto a un derrame sin dispersantes. Si con esta estimación se busca el aumento de área de contacto entre las gotas y el agua, entonces en el caso del empleo de dispersantes el aumento es de $(D_1/D_0)^2 N = 4.3$ veces, aproximadamente.

Por lo anterior, el solo hecho de la disminución en el tamaño de las gotas y el aumento de la superficie de contacto con el agua (aumento de la cantidad de gotas) incrementa la posibilidad de solubilidad de los compuestos BTEX. Este resultado demuestra que el coeficiente de transferencia de masa K en la fórmula (1) es inversamente proporcional al diámetro de la gota (fórmula 2). El valor K aumenta 4.3 veces en el ejemplo. El modelo numérico presenta el mismo orden de magnitud de concentración resultante y es efectivamente sensible a la distribución de las gotas por tamaño.

CONCLUSIONES

El impacto de los dispersantes en la contaminación por BTEX en un derrame profundo de hidrocarburos fue demostrado. La aplicación del modelo euleriano permitió cuantificar la variación de BTEX diluido en la columna de agua tanto con como sin el uso de dispersantes químicos.

El modelo euleriano para estas condiciones, con y sin dispersantes químicos, tuvo en cuenta variables mensurables como la estratificación termohalina, la composición inicial del hidrocarburo en el derrame y otras características físicas del ambiente para simular el comportamiento de la pluma.

El modelo hidrodinámico ECOMSED (HydroQual, 2007) fue adaptado a la simulación del comportamiento de los componentes solubles en el caso ejemplo del derrame profundo del año 2010 en el pozo Macondo. La modelación demostró que el uso de dispersantes incrementa la cantidad de la fracción soluble de hidrocarburos.

El cambio en la concentración de los componentes BTEX solubilizados en la columna de agua demostró que puede no ser despreciable. Dado el grado de toxicidad de estos compuestos

para los organismos vivos, se recomienda incluir en las evaluaciones medioambientales, la aplicación de este tipo de herramientas para las licencias, previas a las actividades de explotación de recursos naturales costa afuera.

Este conocimiento es importante para la planificación de futuras políticas relacionadas al uso de dispersantes en Colombia en cabeza del Comité Técnico Nacional del Plan Nacional de Contingencia (PNC).

Los resultados de este estudio muestran que es indispensable realizar esfuerzos académicos y tecnológicos que permitan encontrar alternativas al uso de dispersantes en un derrame profundo.

REFERENCIAS

- Ballachey, B. E. y Kloecker, K. A. (1997). *Hydrocarbon residues in tissues of sea otters (Enhydra lutris) collected from Southeast Alaska*. Obtenido de <http://www.arlis.org/>: <http://www.arlis.org/docs/vol1/41846882.pdf>
- Bandara, U. y Yapa, P. (2011). Bubble Sizes, Breakup, and Coalescence in Deepwater Gas/Oil Plumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 729 - 738.
- Branan, C. R. (2000). *Soluciones prácticas para el Ingeniero químico*. México D.F.: Mc Graw - Hill, 31.
- Cámara Rascón, Á., García Torrent, J., Montes Villalón, J. M. y Querol Aragón, E. (2006). *Química Física*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 6.1 - 6.6.
- Chen, F. y Yapa, P. D. (2004). Three-dimensional visualization of multi-phase (oil/gas/hydrate) Plumes. *Environmental Modelling y Software* 19, 751-760.
- Christofolletti Mazzeo, D. E., Casimiro Fernandes, T. C. y Marín-Morales, M. A. (2011). Cellular damages in the Allium cepa test system, caused by BTEX mixture prior and after biodegradation process. *Chemosphere*, 13 - 18.
- Conabio. (2010). *Reporte No.1 sobre el derrame de petróleo en el Golfo de México*. Recuperado el 20 de Junio de 2014, de Conabio: <http://>

- www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/modis/oceano.html
- HydroQual, (2007). A Primer for ECOMSED. *A Primer for ECOMSED*. Mahwah, NJ, USA.
- Johansen, O. (2000). DeepBlow - a Lagrangian Plume Model for Deep water Blowouts. *Spill Science y Technology Bulletin, Vol. 6*, 103 - 111.
- Lee, J. W. y Cheung, V. (1990). Generalized Lagrangian Model for Buoyant Jets in Current. *Journal of Environmental Engineering*, 1085 - 1106.
- Lehr, B., Bristol, S. y Possolo, A. (2010). Oil Budget Calculator. *Informe Técnico*. The Federal Interagency Solutions Group, Oil Budget Calculator Science and Engineering Team, 24 - 30.
- Li, M. y Garret, C. (1998). The relationship between oil droplet size and upper ocean turbulence. *Marine Pollution Bulletin, Vol. 36*, 961-970.
- Lindstrom, E. J. (2010). *OSCAR Project Office*. Recuperado el 28 de 01 de 2016, de oceanmotion: <http://oceanmotion.org/html/resources/oscar.htm>
- Locarnini, R., Mishonov, A., Antonov, J., Boyer, T. y Garcia, H. (2015). *World Ocean Atlas*. Obtenido de http://odv.awi.de/en/data/ocean/world_ocean_atlas_2013/
- McCabe, W. L., Smith, J. C., y Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Ciudad de México: Mc Graw Hill, 810 - 811.
- Miranda, D., Casco, A. y Moyano, M. (2008). Autorización del uso de dispersantes en América Latina y el Caribe. *INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE*, 1003 - 1009.
- Reddy, C. M. (2012). *Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill*. Switzerland: PNAS, 20229 - 20234.
- Rodríguez, R. A. y Lonin, S. (2017). Comportamiento euleriano de los compuestos aromáticos en un derrame profundo de hidrocarburos. *El Derrotero*, 119 -126.
- Schmidt, C. W. (2011). Entre dos Fuegos. *Environmental Health Perspectives*, 78 - 87.
- Spaulding, M. L., Bishnoi, P. R. y Anderson, E. (2000). An Integrated Model for Prediction of Oil Transport from a Deep Water. *ARCTIC AND MARINE*, 611 - 635.
- Udita C, B. S. y Poojitha D, Y. M. (2011). Bubble Sizes, Breakup, and Coalescence in Deepwater Gas/Oil Plumes. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 729-738.
- Yapa, P. D. (2012). How does oil and gas behave when released in deepwater? *ELSEVIER*, 275 - 285.
- Yapa, P. D. y Chen, F. (2004). Behavior of Oil and Gas from Deepwater Blowouts. *JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING © ASCE*, 540 - 553.
- Zheng, L. y Yapa, P. D. (2001). Modeling gas dissolution in deepwater oil/gas spills. *Journal of Marine Systems*, 299-309.
- Zhengzhen, Z., Laodong , G., Shiller, A. M., Lohrenz, S. E., Asper, V. L. y Osburn, C. L. (2013). Characterization of oil components from the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico using fluorescence EEM and PARAFAC techniques. *ELSEVIER*, 10 - 21.