

Recibido: 24 / 08 / 2009, aceptado en versión final: 30 / 10 / 2009

## Determinación de la condición de riesgo para el proceso de reinyección de recortes de perforación en pozos agotados en dos plataformas costa fuera en el suroeste de la Sonda de Campeche

Determination of the risk condition for the drilling cuttings re-injection process into depleted wells in two offshore platforms at the southwest of the Campeche Sonda

**M. Muriel García<sup>1</sup>, L. Benavides<sup>1</sup> y H. Ramírez León<sup>1</sup>, J. G. Cerón Bretón<sup>2</sup>, R. M. Cerón Bretón<sup>2</sup>, A. V. Córdova Quiroz<sup>2</sup> y R. A. Jiménez Corzo<sup>2</sup>**

### RESUMEN

Los riesgos potenciales asociados al proceso de reinyección de recortes como un método alternativo para la disposición de los desechos de perforación fueron identificados y calculados en dos plataformas costa fuera situadas en el suroeste de la Sonda de Campeche en México. Los riesgos fueron evaluados usando la metodología Hazop, para identificar peligros en once nodos dentro del sistema de reinyección de recortes de perforación. Además, fueron analizadas las desviaciones en el proceso y cada riesgo analizado fue categorizado como tolerable o no-tolerable; asimismo, se propusieron algunas recomendaciones. Las consecuencias derivadas de derrames accidentales de lechada y/o recortes de perforación fueron analizadas usando el modelo matemático YAXUM 3D para simular la dispersión de los agentes contaminantes en agua de mar en tres periodos climáticos. Los resultados del análisis de consecuencias demuestran que aun cuando las concentraciones en el punto de descarga excedieron los criterios recomendados para la protección de la vida de marina y de la calidad del agua de mar, el derrame es rápidamente dispersado cumpliendo con los niveles permitidos en ocho horas como máximo.

**Palabras clave:** Análisis de riesgo, disposición de residuos, reinyección de recortes.

### ABSTRACT

Potential risks associated with the cuttings re-injection process as an alternative method for drilling wastes disposal were identified and assessed in two offshore platforms located at the southwest of the Campeche Sonda in Mexico. Risks were evaluated using the HAZOP methodology, to identifying hazards in 11 nodes. In addition, deviations in the process were analyzed, and each risk analyzed was categorized as tolerable or non-tolerable and providing some recommendations. Consequences derived from accidental spills of slurry and/or cuttings were analyzed using the mathematical model YAXUM 3D to simulate the pollutants dispersion in seawater in three different climatic periods. The results of the consequences analysis shows that even the concentrations in the discharge point exceeded the recommended criteria for protection of the marine life and seawater quality, the spill is rapidly dispersed complying with permitted levels in 8 hr as a maximum.

**Keywords:** Risk analysis, waste disposal, re-injection of cuttings.

<sup>1</sup> Instituto Mexicano del Petróleo.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma del Carmen.

**I. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**

La gestión de desechos de perforación es uno de los desafíos más importantes de la industria petrolera (Morillon *et al.*, 2002). El lodo y los recortes generados durante el proceso de perforación son el mayor problema.

El proceso de contaminación es debido al uso de biocidas, aceite, componentes de fluido de estimulación, inhibidores de corrosión, fluidos provenientes de la formación (petróleo crudo, salmuera), y de componentes químicos de los lodos de perforación. Un proceso sustentable ambientalmente asume la descarga “cero” de desechos en el ambiente (Paulsen *et al.*, 2003). Es necesario encontrar la mejor tecnología para cumplir con estos requisitos. Hay tres cuestiones principales en tal enfoque: para reducir al mínimo la cantidad de desechos tiene que ser minimizada tanto como sea posible, es necesario adaptar la cultura del reúso o del reciclaje desechos, y ponerlas solamente en un sitio seguro con características similares al ambiente local.

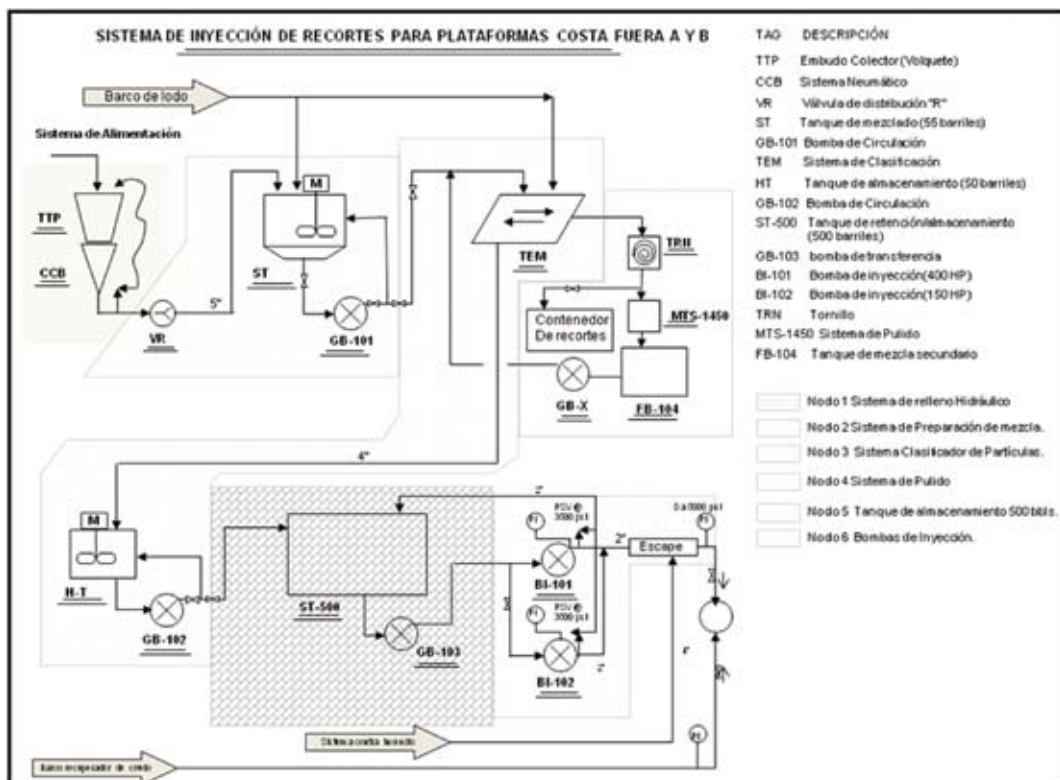
Hay algunos métodos para la disposición de los desechos de perforación: Solidificación con cemento y sílicona (Quintero *et al.*, 2001), inyección de recortes en capas de inyección o cuevas de sal (Saasen *et al.*, 2001), desorción termal de baja temperatura (DTBT) (El-Sayed *et al.*, 2001), extracción (usando gases del hidrocarburo, dióxido de carbono supercrítico y agentes tenso activos) (Perry *et al.*, 2001; Saintpere *et al.*, 2000), Biorremediación (composta,

biorreactores, vermicultura y agricultura) (El-Sayed *et al.*, 2001; Growcock *et al.*, 2002; Getliff *et al.*, 2000) y el método de biorremediación química (Fijal *et al.*, 2002).

Las plataformas mexicanas costa fuera producen importantes cantidades de desechos de perforación. Hasta el 2003, los desechos eran enviados en contenedores de la Sonda de Campeche hacia Dos Bocas, Tabasco y eran transportados por vía terrestre al estado de Nuevo León donde se trataban por desorción termal. Debido al volumen de material a ser dispuesto, este método de tratamiento es una opción muy costosa.

Una alternativa eficiente y económica es el proceso de reinyección de residuos de perforación en pozos no productivos. Este método implica el moler o procesar los sólidos en pequeñas partículas, mezclarlas con agua o con algún otro líquido para hacer la mezcla, e inyectarla en una formación subterránea a altas presiones para fracturar la roca. Este proceso es referido como inyección de lodos, inyección de residuos de perforación, reinyección de recortes y método de molienda e inyección.

La capacidad de inyectar en el sitio evita la necesidad de transportar los materiales a una localización fuera del mismo, lo que disminuye los costos de transporte y riesgos ambientales asociados al manejo, transferencia y envío de los desechos. Además, el transporte también consume grandes cantidades de combustible y genera emisiones adicionales a la



atmósfera. La reinyección de recortes en pozos no productivos se realiza en plataformas mexicanas costa afuera desde el año 2004. Este método fue implementado por primera vez en una plataforma del campo petrolífero Cantarell; sin embargo, no se realizaron ni el análisis de riesgo ni la evaluación ambiental correspondiente a este proceso. En el 2005, este proceso fue implementado en otras instalaciones situadas al suroeste de la región marina en la Sonda de Campeche y se decidió llevar a cabo el análisis de riesgo y la evaluación del impacto ambiental de este proceso para determinar la condición de riesgo de dicho proceso. Este trabajo muestra los resultados de estos estudios referentes al proceso de reinyección de recortes en pozos no productivos en dos plataformas costa fuera situadas en la región marina suroeste del Golfo de México.

## II. MÉTODOS

### Descripción del proceso de reinyección de recortes de perforación

La inyección de la mezcla en un pozo implica procesos mecánicos directos tales como reducción de tamaño, mezcla y bombeo usando equipo convencional. En primer lugar, el material de desecho sólido o semi-sólido proveniente de la perforación es mezclado y acondicionado de modo que pueda ser inyectado.

Una vez que se ha colectado el material de desecho, es tamizado para quitar las partículas grandes que puedan causar el taponamiento del equipo, bombas o la formación dentro del pozo agotado. Se agrega agua de mar a los sólidos, y la mezcla se puede moler o procesar para reducir el tamaño de partícula. Antes del proceso de la inyección es necesario agregar varios aditivos para mejorar la viscosidad u otras características físicas y la mezcla se pueda inyectar a través del pozo en la formación de destino (Figura N.º1).

Cada etapa tiene un riesgo inherente relacionado con la operación del equipo mecánico y del error humano. Un derrame accidental es uno de los acontecimientos posibles a presentarse; implica el derrame de los recortes de perforación y/o de la mezcla de desecho (lechada de recortes). Un análisis de riesgo debe considerar además de las diversas actividades de proceso (reducción de tamaño, tratamiento de la mezcla e inyección), un derrame posible en el agua de mar.

En este estudio, los riesgos relacionados al proceso de confinamiento no fueron considerados debido a las siguientes razones: 1) la reinyección de los recortes no será llevada a cabo en la zona anular; y, 2) la inyección es llevada a cabo en un pozo no productivo previamente caracterizado (de modo que

la estabilidad de confinamiento es asegurada durante mucho tiempo).

### Descripción de sitios estudiados

La Sonda de Campeche está localizada en el sur del golfo de México. Desde 1970, en esta área fue establecida una zona económica integrada por campos de explotación, complejos de producción y una red extensa de ductos de aceite y gas. Ambas plataformas bajo estudio (A y B) están situadas en esta área, donde los desechos de perforación serán inyectados en pozos no productivos (Figura 2). El clima de la Sonda de Campeche es AW'O (W) según la clasificación de Köppen (García, 1998), correspondiendo a los climas tropicales subhúmedos con tres periodos climáticos bien definidos: Periodo seco (de febrero a mayo), periodo lluvioso (de junio a octubre) y periodos de "nortes" (de noviembre a febrero).

### Descripción de sustancias implicadas

Los recortes, el lodo, el petróleo crudo, el lodo de baja densidad que contiene aceite y el diesel contaminado se procesan de una manera regular. Algunos materiales indeseables pueden estar presentes dentro de los envases pero estos no son debidamente procesados y pueden dañar los equipos. Hay algunos productos químicos presentes, por ejemplo, el sulfuro de hidrógeno gaseoso ( $H_2S$ ), lodos poliméricos y de emulsión inversa, y algunas sustancias auxiliares (emulsificantes, viscosificantes y ácido cítrico). Se colectaron 30 muestras de recortes y lechada de recortes en ambos sitios y fueron analizadas en laboratorio.

La caracterización elemental fue realizada por Espectrometría por Fluorescencia de Rayos X, los componentes principales en muestras de recortes

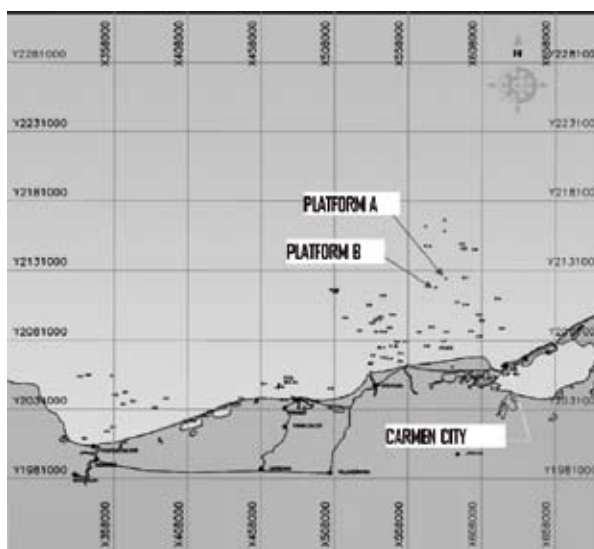


Figura N.º 2. Localización de las plataformas A y B en el Golfo de México

fueron: Si, Fe, Ca, S, Al, Ba, Cl, Sr, Mg, K, P, Ti, Ni, Zn, Mn, Rb, Cr, Na, trazas de Pb, Cu y Br; y para las muestras de lechada de recortes fueron: Si, Fe, Ca, S, Cl, Ba, Al, Sr, K, Mg, P, Na, Ti, Zn, Ni, Br, trazas de Pb y Cu, respectivamente.

La caracterización mineral fue realizada por un método semicuantitativo de difracción de rayos X. Las muestras de recortes mostraron 22.75% de feldespatos, 4.23% de kanditas, 17.36% de mica, 8.93% de montmorillonitas, 5.70% de cloritos, y 2.1% de vermiculitas; CaCO<sub>3</sub> (12.16%), SiO<sub>2</sub> (18.26%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.75%), BaSO<sub>4</sub> (el 43.1%), CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (4.75%) y NaCl (10.2%); considerando que las muestras de la mezcla demostraron los porcentajes siguientes: 15.7% de feldespatos, 5.1% de kanditas, 20.6% de mica, 7.13% de montmorillonitas; CaCO<sub>3</sub> (el 20.07%), SiO<sub>2</sub> (11.88%), BaSO<sub>4</sub> (el 25.92%), CaMg (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (7.0%) y NaCl (5.76%).

Adicionalmente, fueron realizados análisis petrográficos cualitativos y cuantitativos para definir textura, composición mineral y la porosidad de la roca; y un análisis granulométrico fue realizado por el método de conteo de puntos y microscopía óptica de transmisión.

El análisis granulométrico demostró para los recortes y muestra de la mezcla los resultados siguientes resumidos en milímetros: Medio: (0.132) y (0.043); Punto medio: (0.120) y (0.040), mínimo: (0.060)

y (0.010), máximo: (0.300) y (0.100), desviación estándar: (0.053) y (0.024), clasificación de tamaño de grano: (arena de un grano fino más bajo) y (cal de grano grueso), phi: (0.556) y (0.556), grado de clasificación: (conservador, moderado) y (conservador, moderado); respectivamente.

Los metales (Ag, Al, As, Ba, Be, Cd, Cr, Ca, Cu, Fe, Hg, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Ti, Th y Zn) fueron cuantificados por la espectroscopia de absorción atómica para el arsénico, mercurio y selenio (método EPA-3052) por un espectrómetro modelo 2380 Perkin Elmer. Las concentraciones de metales en muestras de mezcla de recortes de perforación son mostradas en la Tabla N.º 1. El contenido de hidrocarburos totales del petróleo fue determinado para los recortes y las muestras de de lechada de recortes para las plataformas costa afuera A y B, por cromatografía de gases usando los métodos EPA-8015 y EPA-5035.

Estos resultados se muestran en la Tabla N.º 2.

### Análisis de Riesgo

*Análisis Hazop.* El análisis de riesgo fue enfocado al proceso a nivel superficial considerando una posible fuga y derrame en el ambiente marino.

El confinamiento geológico de los recortes inyectados es proceso seguro ya que no se lleva a cabo dentro de la zona anular, por esta razón no se está considerando dentro del análisis de riesgo y solamente

**Tabla N.º 1.** Concentraciones de metales en muestras de lechada de recortes de perforación en las plataformas costa fuera A y B.

Metales	Concentración de la plataforma Costa Fuera "A" (mg/kg)	Concentración de la plataforma Costa Fuera "B" (mg/kg)
Ag	1.89	2.35
Al	2250.00	1650.00
As	10.36	13.52
Ba	1750.00	3350.00
Be	250.00	200.00
Cd	0.47	0.67
Cr	9.22	6.31
Ca	28450.00	19750.00
Cu	12.66	24.39
Fe	7900.00	4700.00
Hg	0.63	0.93
Na	10400.00	8650.00
Ni	37.45	21.98
Pb	41.96	94.41
Sb	16.72	9.15
Se	0.15	0.17
Ti	25.00	25.00
Tl	5.00	5.00
Zn	71.92	181.08

**Tabla N.º 2.** Concentraciones de Hidrocarburos Totales del Petróleo en muestras de lechada de recortes de perforación en las plataformas costa fuera A y B.

Concentración de muestras de recortes Plataforma "A" (mg/Kg)	Concentración en muestras de mezcla Plataforma "A" (mg/Kg)	Concentración de muestras de recortes Plataforma "B" (mg/Kg)	Concentración en muestras de mezcla Plataforma "B" (mg/Kg)
68540	12316	47072	28361

**Tabla 3.** Nodos de estudio y desviaciones seleccionadas.

SECCIÓN DE PROCESO	NODO	DESCRIPCIÓN	DESVIACIÓN
Grúa y Estiba	1	Grúa y Estiba	Mal manejo de contenedores en la grúa
Inyección de recortes	1	Contenedores	Alta concentración de H2S Alto nivel Cubierta del contenedor suelta durante el proceso de transferencia directa hacia el volquete
	1	Embudo de recortes y soplador neumático	Alta concentración de H2S Materiales indeseables dentro de los recortes
	2	Sistema de preparación de mezcla	Alta concentración de H2S Materiales indeseables dentro de los recortes Alto flujo Alto nivel Bajo nivel Falla en la mezcla
	3	Clasificador de partículas (tamiz vibratorio y tanque de mezcla de 80 barriles)	Alta concentración de H2S Materiales indeseables dentro de los recortes Tamaño Máximo de partículas Alta viscosidad Alta densidad Alto flujo Alto nivel
	4	Sistema de pulido	Materiales no deseados Tamaño Máximo de partículas Alto nivel
	5	Tanque de almacenamiento de mezcla de 500 barriles	Tamaño Máximo de partículas Porcentaje de sólidos dentro de la mezcla Alta viscosidad Baja viscosidad Alta densidad Baja densidad Alto flujo Alto nivel Carencia en agitación
	6	Bombas de inyección para pozos	Materiales no deseados Alta viscosidad Flujo bajo en la succión Inyección a alta presión Falla en el suministro de agua a desplazar

fueron incluidas las siguientes actividades: Estibado de los contenedores de recortes de los barcos poderosos hacia la plataforma, degradación mecánica de recortes, preparación, tratamiento e inyección de la lechada de recortes de perforación en la cabeza del pozo. El análisis de riesgo consistió de dos etapas: 1) identificación y jerarquización del riesgo implicado, usando la metodología HAZOP; y, 2) análisis de las consecuencias, usando el modelo matemático de YAXUM III D para la valoración cuantitativa de las consecuencias. El acontecimiento más factible es el derrame accidental de recortes de perforación y/o de lechada de recortes al océano, por esta razón, su dispersión en agua de mar fue modelada para calcular el radio de afectación.

Los riesgos fueron evaluados usando *el procedimiento para determinar el nivel de riesgo tolerable en las instalaciones de la región marina noroeste de PEMEX Exploración y Producción* (PEMEX, 2003). Este análisis fue llevado a cabo por un grupo de expertos interdisciplinario, que dividieron el proceso en subsistemas y cada subsistema fue analizado considerando las variables críticas de la operación que tomaban en consideración tanto los valores normales de operación como de diseño. Se identifica un peligro cuando existe una desviación en el estado de la operación normal.

El grupo de análisis identificó las protecciones existentes y si éstos no eran suficientes para neutralizar el peligro o para atenuar sus consecuencias, se propusieron acciones específicas para lograr la mitigación del riesgo. El estudio HAZOP comprende las etapas siguientes: 1) Selección de los nodos de estudio (líneas de proceso, recipientes y/o equipos de proceso) de acuerdo al flujo de proceso y considerando los servicios auxiliares como se muestra en la Tabla N° 3; 2) Definir la intención del diseño del equipo; 3) Seleccionar la palabra guía conjuntamente con un parámetro de proceso para desarrollar la desviación en un nodo del estudio; 4) Evaluación de consecuencias (considerando que todas las salvaguardias han fallado); 5) Listar las causas de la desviación y listar todas las salvaguardias existentes; y 6) Listar las acciones y recomendaciones necesarias para atenuar dichas desviaciones. Este procedimiento fue aplicado a cada nodo de estudio. Finalmente, esta información fue documentada en una hoja de trabajo de HAZOP como se muestra a modo de ejemplo en la Tabla N.° 4 para el nodo 1.

*Estudio hidrodinámico.* En este estudio, la herramienta YAXUM/3D fue utilizada para modelar la dispersión en medio acuático de un derrame de lechada de recortes o vertido de recortes derivado de un error en la operación. Tres escenarios fueron modelados en un periodo de 61 días: periodo seco (febrero a primera mitad de junio, siendo la estación más caliente del

año), periodo lluvioso (segunda mitad de junio a primera mitad de octubre, siendo caracterizado por la presencia de ciclones tropicales, tormentas y lluvias convectivas) y periodo de los “Nortes” (segunda mitad de octubre a enero, caracterizado por la presencia de fuertes vientos en zonas costeras y marinas). El modelo euleriano-lagrangiano de YAXUM/3D soluciona las ecuaciones para la hidrodinámica de flujos superficiales libres en tres dimensiones y se basa en un esquema numérico propuesto (Casulli y Cheng, 2002). Del estudio Hazop se identificaron dos casos: Caso 1) Una falta de supervisión en el tanque de retención de 500 barriles podría causar en el peor caso, un derrame de 250 barriles; Caso 2) una ruptura en la línea de 2” al pozo de inyección debido a la corrosión podía causar un derrame de la mezcla al océano.

El proceso de la inyección no es continuo, no obstante al principio de la inyección hay una cantidad importante de mezcla dentro del tanque de retención (500 barriles), por esta razón podría ser considerado como proceso continuo, por lo cual en caso de una fuga, el material continuará escapándose hasta que exceda la capacidad del tanque de retención. La duración de este proceso depende del lapso de tiempo que se tome para detectar la fuga, para analizar el incidente y para terminar las acciones correctivas. Actualmente, el sistema de vigilancia “SMART” no está funcionando y solamente un calibrador de presión mide la presión de la inyección en el pozo, por lo tanto, la detección de operación es visual y el aislamiento depende de las válvulas manuales. Para el caso 1, el derrame tendría un volumen máximo de 250 barriles. El diámetro de la línea de inyección es de 2” y la tasa de inyección podría ser de hasta 4 barriles/min. Por lo tanto, el lapso de tiempo para detectar y tomar medidas para interrumpir el derrame sería de 40 minutos y el volumen del derrame sería 4 barriles/minuto x 40 minutos = 160 barriles para el caso 2. El punto de descarga tiene las coordenadas iniciales para la localización correspondiente de la plataforma.

La información batimétrica fue obtenida de la Base de Datos Mundial ETOPO 2 (NCAR, 2006), la cual contiene una resolución de dos minutos (4 kilómetros aproximadamente) de topografía alrededor del mundo entero, y los mapas batimétricos del golfo de México con una resolución de un minuto (INEGI, 2008). De la base de datos batimétrica, fue generado el acoplamiento numérico del área de estudio usando el programa ARGUS ONE. Este programa crea una división del cuerpo de agua en elementos con formas geométricas regulares usando el contorno del cuerpo del agua en formato DFX, los valores numéricos de la batimetría en formato ASCII y las características deseadas acoplando la malla. En este caso, elementos



**Tabla N.º 4.** Hoja de trabajo HAZOP para el nodo 1, Escenario 1.01: Grúa y estibado.

ESTUDIO HAZOP												
Datos Generales												
Nombre del proyecto:		PROCESO DE REINYECCIÓN DE RECORTES EN POZOS NO PRODUCTIVOS										
ID Nodo:	1	Nodo :	Grúa y estiba	Inten- sión de diseño:	Cargas de relleno en un rango máximo de 12 t							
Fecha:	Octubre 21, 2005	ID Figura:	Figura 1	Organigrama del proceso de reinyección de los cortes de perforación								
No. Riesgo Evento	Desviación	Causas	Consecuencias	Protecciones	S					F	R	Recomendaciones
					STAFF	POBLACIÓN	AMBIENTE	PRODUCCIÓN	INSTALACIONES			
1.01	Falla de Grúa	Falla en el programa de mantenimiento	Caída del contenedor y posible derrame de recortes									Operar de acuerdo con la grúa y el programa de mantenimiento de sistemas auxiliares
		Exceso de carga										Revisar y actualizar los programas de mantenimiento de grúas
		Equipo obsoleto	Caída del contenedor en campo de operaciones	4	1	5	2	1	5	25		Barcos y proveedores de lodo deberán asegurar las tapas de contenedores para disminuir la abertura en caso de caída
		Expiro el tiempo de vida del cable	Caída del brazo de grúa	4	1	2	2	1	1	4		Proveedores de servicios a contenedores sustituirán o darán mantenimiento a los envases en malas condiciones
		Cable inadecuado										
		Falla mecánica en engrane de grúa	Proceso de inyección interrumpida									

rectangulares con espacios constantes fueron utilizados. El dominio de estudio consideraba cuatro clases de mallas: una malla de 10 x 10 kilómetros con espacios constantes de 50 m en ambas direcciones; una malla de 10 x 10 kilómetros con espacios constantes de 500 m en ambas direcciones y dos mallas de 1 x 1 kilómetros en los alrededores de cada plataforma con espacios constantes en ambas direcciones de 20 m.

Para realizar simulaciones de dos dimensiones en el dominio de 10x10 kilómetro y generar los parámetros hidrodinámicos iniciales en el dominio de 3x3 kilómetros, era necesario procesar las velocidades marinas de corrientes (diversos armónicos fueron obtenidos para diversos puertos del golfo de México: Madero-Tamaulipas, Tuxpan-Veracruz, Alvarado-Veracruz, Coatzacoalcos Veracruz, Carmen-Campeche y Progreso-Yucatán), intensidades del viento (González, 2005; Barrios, 2005) y variación de mareas

(González, 2005; Barrios, 2005; Salas, 1997; Gómez y Vélez, 2004).

Los vectores de la velocidad para las corrientes en una secuencia de 15 días en el dominio de 10x10 kilómetros fueron resueltos para cada periodo climático, encontrando una dirección actual predominante del este al oeste con una desviación ligera hacia el cuadrante del noroeste para los tres periodos. Los dominios de 3x3 kilómetros fueron adaptados a la malla de 10x10 kilómetros, tal como el contorno de cada uno coincidieron con el contorno de cada celda con 500 m de espaciamiento en las fronteras de cada pozo. Los perfiles verticales de velocidades fueron determinados y celdas de 60 m de espaciamiento constante en ambas direcciones (x, y) considerando las profundidades de la zona de estudio fueron adaptados tomando 15 capas con 2 m de grueso en una dirección vertical para ambos dominios.

El estudio de la dispersión fue limitado a la fase líquida, porque la fase sólida no tiene un efecto importante sobre la columna de agua debida a un tiempo de residencia corto, puesto que éstos se depositan en un corto periodo de tiempo en el lecho marino.

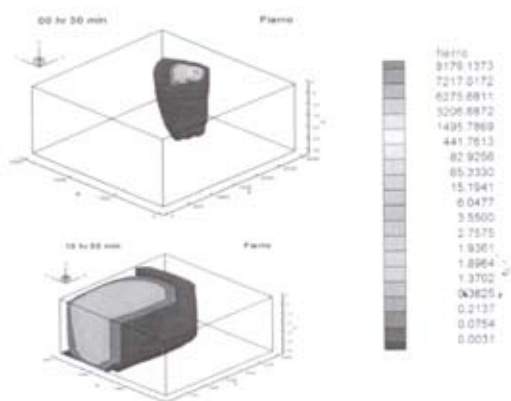
Los efectos y la duración de un derrame dependen del espesor o de la magnitud del derrame, del estado original del sedimento, de la concentración de la sustancia derramada y de las condiciones locales ambientales que controlan la persistencia del material depositado.

Los estudios de dispersión para metales y para los hidrocarburos totales del petróleo fueron realizados considerando posibles escenarios de derrames de la lechada de recortes de perforación al medio marino derivado de un error en la operación. La dispersión de la fase líquida incluyó metales y los hidrocarburos totales del petróleo (HTP's). De la caracterización química de las muestras de la mezcla, Fe, Al y Be, mostraron concentraciones por arriba de los valores criterio para proteger la vida de marina con un tiempo de permanencia entre 5 y 8 horas (DOF, 2006; EPA, 1986; DOF 2003; EPA CFR). La Figura N.º 3 muestra, a modo de ejemplo, la dispersión tridimensional para el Fe en la plataforma A para la estación de lluvia. Figuras similares fueron generadas para Fe, Al, Be y HTP's para ambas plataformas (A y B) para los tres diferentes periodos climáticos.

### III. RESULTADOS

#### Análisis de riesgo

*Análisis Hazop.* Cada riesgo identificado fue evaluado considerando daños al personal y a la población, impactos ambientales, pérdidas económicas y pérdidas en la producción según el procedimiento descrito en



Nota: Las concentraciones se encuentran expresadas en  $\mu\text{g/l}$ .

Figura N.º 3. Dispersión tridimensional de Hierro (época de lluvias, Plataforma "A").

la sección de metodología. Estos resultados fueron utilizados para crear la matriz de riesgo que contiene el número de escenarios correspondientes a cada combinación de la razón *frecuencia/consecuencia* (figuras 4a a 7b). Estas figuras muestran la reducción prevista del riesgo tan pronto como se ejecuten las recomendaciones. La matriz del riesgo demuestra los diversos niveles de riesgo para cada desviación, detecta acontecimientos inaceptables y ayuda a identificar las desviaciones que requieren acciones oportunas para su mitigación.

*Estudio hidrodinámico.* La concentración máxima de los HTP's en muestras de mezcla de recortes fue de 19 673  $\text{mg/l}$ . Los criterios recomendados (EPA, 1997) establecen que la concentración máxima permisible para cualquier efluente que contenga aceite descargado al océano desde una localización en 12 millas náuticas de la costa debe ser menor a 100 PPM. Cuando la localización del punto de descarga se encuentra a distancias menores a 12 millas náuticas de la costa, el límite máximo debe ser menor que 15 PPM. Los riesgos más importantes fueron asignados dentro de la categoría 1, riesgos moderados dentro de la categoría 2 y riesgos menos importantes dentro de la categoría 3, respectivamente. Las concentraciones encontradas a partir de la caracterización química de las muestras de lechada de recortes y de recortes de perforación y las concentraciones máximas encontradas 10 horas después de efectuado el derrame excedieron los criterios de protección al medio marino, por esta razón este parámetro fue asignado bajo la categoría 1.

La clasificación del riesgo de un derrame según los resultados de dispersión para metales en ambas instalaciones se muestra en la Tabla N.º 8.

Estas categorías fueron asignadas según criterios de toxicidad para la vida acuática, de acuerdo con las concentraciones encontradas en las muestras analizadas y, al tiempo requerido para dispersar y alcanzar las concentraciones mínimas permisibles. Para la plataforma B, las concentraciones de metales y HTP's fueron mayores que las encontradas para la plataforma A. En la Tabla 8 la columna *Peor escenario* muestra el periodo climático donde las concentraciones máximas excedieron los valores permitidos para proteger la vida marina y para cumplir los requisitos de la calidad del agua, indicando la duración máxima de este escenario. La plataforma A para los tres periodos climáticos mostró concentraciones de HTP's de aproximadamente tres veces el valor reportado para la calidad del agua marina (374 016  $\mu\text{g/l}$ ) después de un periodo de 30 minutos de haberse efectuado el derrame.

Después de dos horas de efectuarse el derrame, las concentraciones permitidas fueron alcanzadas para



los tres escenarios modelados. La dispersión no es buena en periodo seco, por esta razón este escenario fue asignado con categoría 1. Los escenarios modelados para periodos lluviosos y nortes fueron asignados dentro de la categoría 2, debido a que sus efectos se pueden atenuar en dos horas mediante la actuación del sistema de control de derrames.

En la plataforma B para los tres periodos climáticos, las concentraciones encontradas después de 30 minutos de haberse efectuado el derrame fueron de aproximadamente el doble del valor de los criterios

reportados para la calidad del agua de marina (202 971.36  $\mu\text{g/l}$ ). Después de dos horas en periodos lluviosos y de nortes, las concentraciones permitidas fueron alcanzadas. En la estación seca, después de dos horas de haberse efectuado el derrame, la concentración se mantuvo aún en 202 971.36  $\mu\text{g/l}$  y la concentración mínima permisible fue alcanzada después de ocho horas.

El peor escenario de la plataforma B fue obtenido en la estación seca y fue asignado dentro de la categoría 1, los escenarios modelados en los periodos de nortes

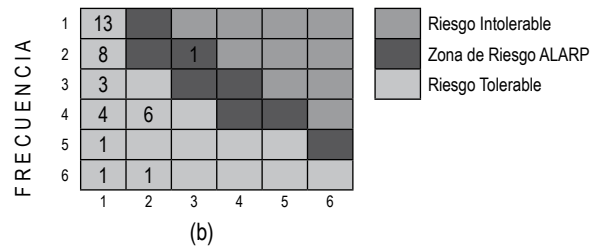
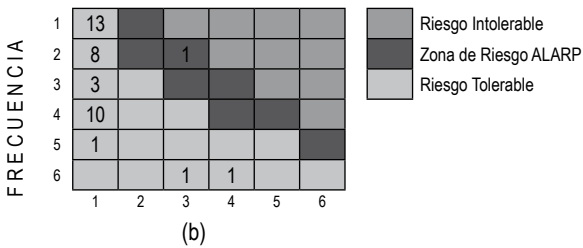
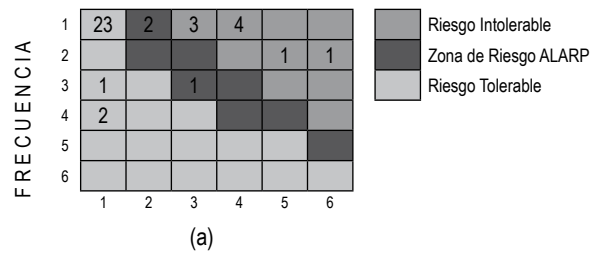
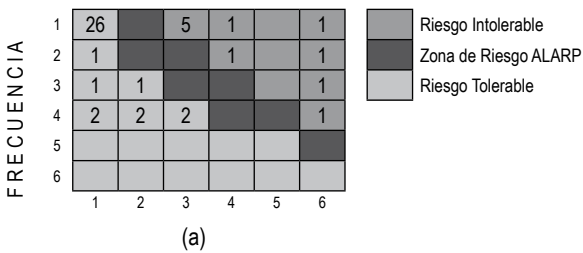


Figura N.º 4. Matriz de riesgo para daños al personal: a) Condiciones actuales y b) reducción prevista del riesgo si se ejecutan las recomendaciones.

Figura N.º 5. Matriz de riesgo para consecuencias en el medio ambiente: a) Condiciones actuales y b) reducción prevista del riesgo si se ejecutan las recomendaciones.

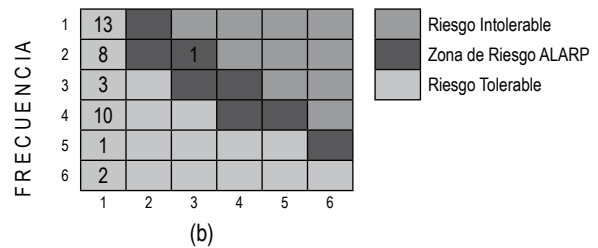
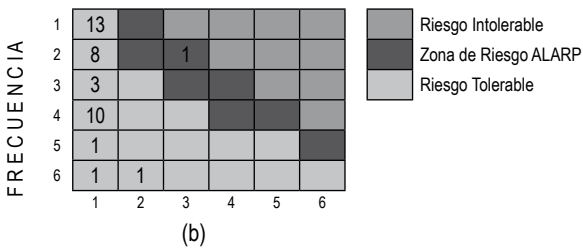
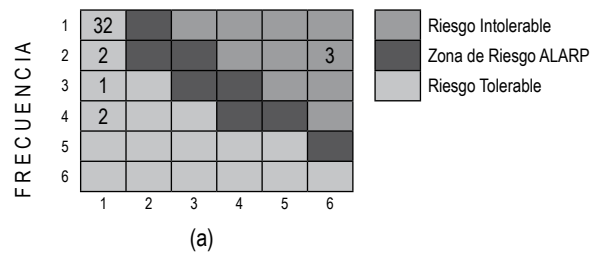
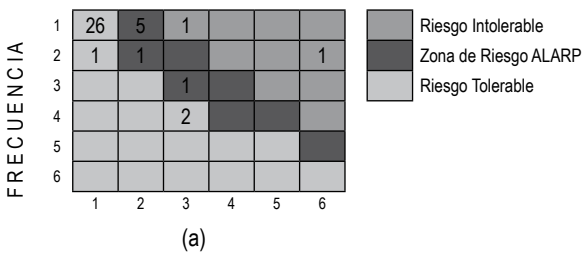


Figura N.º 6. Matriz de riesgo para daños/pérdidas en producción: a) Condiciones actuales y b) reducción prevista del riesgo si se ejecutan las recomendaciones.

Figura N.º 7. Matriz de riesgo para daños a las instalaciones: a) Condiciones actuales y b) reducción prevista del riesgo si se ejecutan las recomendaciones.

y lluvias fueron asignados dentro de la categoría 2 debido a que sus efectos se pueden atenuar después de dos horas de haberse iniciado el derrame mediante la actuación del sistema de control de derrame.

Los resultados de la simulación del escenario de derrame de la mezcla de recortes de perforación mostraron que el nivel de riesgo es tolerable, incluso cuando las concentraciones en el punto de descarga exceden los criterios recomendados para proteger la vida marina y la calidad del agua.

El derrame se dispersa rápidamente alcanzando niveles permitidos en un periodo de 5 a 8 horas; significa que estas concentraciones están diluidas a niveles tolerables antes que el equipo del control de derrame llegue al sitio, pues el desplazamiento de dicho equipo de control de derrames desde el Puerto de Ciudad del Carmen a la zona de plataformas en la Sonda de Campeche toma de seis a ocho horas.

**IV. CONCLUSIONES**

A partir de los resultados del análisis de riesgo fueron hechas algunas recomendaciones y los riesgos se clasificaron dentro de dos zonas: zona de riesgo no tolerable y zona de riesgo tolerable, se consideraron daños al personal, impactos ambientales, pérdidas en producción y daños a las instalaciones. Un total de 63 recomendaciones fueron hechas, algunas de las más importantes son las siguientes: Utilizar única y exclusivamente las bombas de agua contra incendio según el NFPA 20 (NFPA, 2007); Instalar la red y el gabinete de agua contra incendio en la cubierta de la plataforma; Proporcionar suficientes botes salvavidas según el número de personas en las plataformas considerando personal fijo y de visita; Instalar alarmas audibles y visibles para la detección de presencia de fuego, de humo y de gas en la cubierta de la plataforma e instalar equipos de detección de gas

**Tabla N.º 8.** Clasificación de los diversos escenarios de riesgo de derrame de la mezcla de recortes, resultados de la modelación hidrodinámica en ambas instalaciones (plataformas A y B, respectivamente).

Categoría	Parámetro	Tiempo requerido para alcanzar el criterio de calidad del agua		Peor Escenario	
		Plataforma A	Plataforma B	Plataforma A	Plataforma B
1	Fe	5 hrs WQC: 1000 µg/l	8 hrs WQC: 1000 µg/l	NP DPS: 2 hrs MC: 8 330.14 µg/l	DP DPS: 5 hrs MC: 38 680.82 µg/l
1	Be	5 hrs WQC: 130 µg/l	5 hrs WQC: 130 µg/l	NP DPS: 2 hrs MC: 530.16 µg/l	NP DPS: 2 hrs MC: 1752.72 µg/l
1	Al	5 hrs WQC: 750 µg/l	5 hrs WQC: 750 µg/l	NP DPS: 2 hrs MC: 2 637 µg/l	RP DPS: 2 hrs MC: 34 943.01 µg/l
2	Ba	15 min WQC: 50 000 µg/l	15 min WQC: 50 000 µg/l	Máxima concentración permisible alcanzada en 15 min	Máxima concentración permisible alcanzada en 15 min
3	Ca	No existe criterio para proteger la vida marina	No existe criterio para proteger la vida marina	Valores de MC fueron altos, sin embargo no es considerado como un metal tóxico	Valores de MC fueron altos, sin embargo no es considerado como un metal tóxico
3	Na	No existe criterio para proteger la vida marina	No existe criterio para proteger la vida marina	Valores de MC fueron altos, sin embargo no es considerado como un metal tóxico	Valores de MC fueron altos, sin embargo no es considerado como un metal tóxico

Nota: NP: Periodo Nortes; DP: Periodo Seco; RP: Periodo lluvioso DPS: Periodo de Duración de Escenario; WQC: Criterio de calidad de agua; MC: Máxima Concentración.

tóxico y equipo de respiración autónomo en el área de operaciones; y cumplir con los programas de mantenimiento para la red y monitores contraincendio en plataformas, grúas y servicios auxiliares. Es deseable proporcionar equipo de radio al personal clave en actividades críticas en las plataformas; entrenar al personal implicado en maniobras; desarrollar procedimientos de estibado, manejo y aseguramiento de los contenedores; recomendar a los proveedores de los contenedores y al personal de las plataformas de origen de los residuos, un buen aseguramiento del sello de las tapas de los contenedores para disminuir la posibilidad de la apertura en caso de caída; mejorar el sistema de sellos de la tapa del contenedor durante el proceso de vaciado al embudo y sistema de clasificación de recortes; solicitar a los abastecedores de servicios que sustituyan las cajas en mal estado y proporcionar mantenimiento a las que la requieran; seguir los procedimientos operativos; realizar cambios periódicamente en el personal expuesto directamente a vapores posibles de H<sub>2</sub>S para que pueda ser reducida esa exposición (rotación de personal); habilitar la operación del sistema de monitoreo de procesos "SMART" y del sistema de comunicación en plataformas.

Es necesario tener un mejor control sobre los requerimientos de recepción de los residuos a ser procesados, ya que las concentraciones del fluido de proceso de la plataforma B fueron mayores a las de la plataforma A. Se puede concluir que aun cuando los recortes de perforación y la lechada de recortes de perforación no se encuentran considerados como residuos peligrosos de acuerdo a la legislación mexicana actual, los resultados del análisis de riesgo permitieron establecer su condición de peligro dentro de la categoría de riesgo tolerable. Por lo anterior, es posible considerar al proceso de reinyección de recortes de perforación a los pozos no productivos como una buena opción para disponer esta clase de residuos.

## V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NOM-052-Semarnat-2005. Norma Oficial Mexicana que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos. DOF, México. 23 de junio de 2006.
2. Morillon, A., Vidalie, J., F., Syahnudi, U., Suripno, S., Hadinoto, E., K. 2002. Drilling and Waste Management, SPE 73931, presented at the SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Kuala Lumpur, Malaysia, March 20-22.
3. Paulsen, J., E., Omland, T., H., Aas N. 2003. Drill Cuttings Disposal, Balancing Zero Discharge and Use of Best Available Technique. Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 20-22 October.
4. Quintero L., Limia J., Stocks-Fischer S. (2001). *Silica Micro-encapsulation Technology for Treatment of Oil and/or Hydrocarbon-contaminated Drill Cuttings*. Society of Petroleum Engineers.
5. Saasen A., Paulsen JE., Holthe K. 2000. Environmental Priorities of Re-injection and Land Based Handling of Drilled Cuttings and Affiliated Fluids The SPE International Conference on Health, Safety, and the Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Stavanger, Norway, 26-28 June.
6. El-Sayed A., Abu El-Naga K. 2001. Treatment of Drill Cuttings. The SPE/EPA/DOE Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, Texas, 26-28 February.
7. Perry ML., Griffin JM. 2001. Chemical Treatment of Cuttings Drilled with Oil-based Mud Employing a Laboratory Simulated Soil Washing Procedure. Exploration and Production Environmental Conference, San Antonio, Texas, 26-28 February.
8. Saintpere S., Morillon-Jeanmaire A. 2000. Supercritical CO<sub>2</sub> Extraction Applied to Oily Drilling Cuttings. Annual Technical Conference and Exhibition Dallas, Texas, 1-4 October.
9. Growcock FB., Curtis GW., Hoxha B., Brooks WS., Candler, JE. 2002. Designing Invert Drilling Fluids to Yield Environmentally Friendly Drilled Cuttings IADC/SPE 74474, IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, TX, February 26-28.
10. Getliff JM., Bradbury AJ., Sawdon CA., Candler JE., Loklingholm, G. 2000. Can Advances in Drilling Fluid Design Further Reduce the Environmental Effects of Water and Organic-phase Drilling Fluids? SPE 61040, SPE International Conference on Health, Safety, and the Environment, Stavanger, Norway, June 26-28.
11. Fija J., Gonet A., Stryczek S., Czekaj L. 2002. Sposób usuwania toksycznych zwieków organicznych ze rodowisk mineralnych. Wniosek patentowy nr P-352202.
12. García, E. (1973). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Editorial Enriqueeta García de Miranda, 4a. edición, México, D. F., 1988, 220 p.
13. EPA Method 3052. Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices
14. EPA Method 8015. Nonhalogenated organics by Gas Chromatography.

15. EPA Method 5035. Closed-System purge-and-trap and extraction for volatile organics in soil and waste samples.
16. Lineamiento para la Determinación del Nivel de Riesgo Tolerable en las Instalaciones de La Región Marina Noreste, clave 250-22100-SI-212-0001, versión 1 Enero, 2003.
17. Casulli V. y Cheng RT. (1992). *Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow*. International Journal for numerical methods in fluids, Volume 15, pp. 629-648.
18. World Data Base ETOPO 2 from the National Center for Atmospheric Research, USA.
19. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), <http://www.inegi.org.mx>
20. <http://www.argusint.com>
21. <http://www.noaa.gov>
22. González SR. (2005). *Modelación numérica de circulación de corrientes oceánicas para el Golfo de México*. Generación de escenarios hidrodinámicos, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, México D. F.
23. Barrios, P. H. (2005). *Modelación baroclínica y dispersión de partículas en medios marinos. Aplicación al Golfo de México*. Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, México D. F.
24. Salas DLD y Monreal, GM. (1997). *Mareas y circulación residual en el Golfo de México. Contribuciones a la oceanografía física en México*. Monografía N.º 3, Unión Geofísica Mexicana.
25. Gómez RE. y Vélez MH. (2004). *Medición de corrientes con perfilador acústico doppler, Reporte Análisis de Datos*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, México D. F.
26. <http://oceanografia.cicese.mx>
27. Current National Recommended Water Quality Criteria (<http://www.epa.gov/waterscience/criteria/wqcriteria.html>).
28. Quality Criteria for Water, 1986. EPA 440/5-86-001.
29. NOM-001-Semarnat-1993. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. DOF, México. 23 de abril de 2003.
30. 33 CFR Ch. 1 (7-1-97-Editon) Document EPA 151.11.
31. NFPA 20. Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection. 2007 Edition. National Fire Protection Association.