

EVALUACION DE CONSECUENCIAS DE FALLA EN PLATAFORMAS MARINAS FIJAS

Dante Campos¹, Miguel Martínez¹, Mauricio Rodríguez¹, Rafael Ramos¹ y Víctor Valdes²

1. Instituto Mexicano del Petróleo

2. Petróleos Mexicanos

RESUMEN

Los Estados Límites y Factores de Seguridad para el diseño de plataformas marinas están definidos de acuerdo a niveles apropiados tanto del riesgo como de las cargas ambientales, accidentales y operacionales. La probabilidad de falla asociada con esos niveles de riesgo debe de estar de acuerdo con las consecuencias de falla, en el que se debe salvaguardar la vida humana, disminuir el impacto ecológico y cuidar la económica. En este trabajo se presenta un criterio para la evaluación de las consecuencias de falla de plataformas típicas instaladas en la Sonda de Campeche. La seguridad de la vida humana es evaluada en términos de la probabilidad de pérdidas potenciales de vidas humanas, mientras que el impacto ecológico es evaluado en términos de un posible derrame de crudo así como de posibles consecuencias posteriores. Las consecuencias económicas son evaluadas en términos del costo total, que incluye los costos iniciales desde la planeación hasta la puesta en operación de la plataforma, y costos futuros a largo plazo debido a inspección, mantenimiento, rehabilitación y/o remplazo de la estructura.

1. INTRODUCCIÓN

Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha desarrollado una importante infraestructura para la explotación de hidrocarburos motivado por el gran potencial de la Sonda de Campeche, y al mismo tiempo ha tomado importantes compromisos tales como el de salvaguardar vidas humanas, el medio ambiente, la seguridad de las instalaciones y asegurar adecuados niveles de producción de crudo y gas.

Actualmente en la Sonda de Campeche existen alrededor de 200 plataformas marinas (Fig. 1). El conjunto de estas plataformas producen en promedio 2.0 millones de barriles de crudo por día (MBPD) y 1.5 billones de pies cúbicos de gas por día (MMPCD).

En octubre de 1995 el huracán Roxanne, que se inició en el oeste del mar del caribe y se convirtió en una tormenta de categoría 3, cruzó la Península de Yucatán, y después se introdujo en la Sonda de Campeche. Permaneció allí por varios días, causando destrucciones significativas en las costas de México y algunos daños en la infraestructura de PEMEX.

En octubre de 1996, PEMEX y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) iniciaron el desarrollo de especificaciones para el diseño y evaluación de plataformas para la Sonda de Campeche basado en la cuantificación y administración del riesgo (CAR).

En las últimas décadas, el CAR ha adquirido gran importancia en una gran variedad de industrias, debido a la necesidad de incrementar la eficiencia y la competitividad de éstas, así como mejorar los estándares de seguridad de sus trabajadores, de las instalaciones, además de la protección al medioambiente.

El CAR brinda las herramientas necesarias para tomar decisiones adecuadas con respecto al diseño de nuevas estructuras o para el mantenimiento de estructuras existentes, que involucra, entre otros aspectos, evaluaciones de las consecuencias de falla, la seguridad de los usuarios y los posibles daños ambientales asociados a la falla de la estructura.

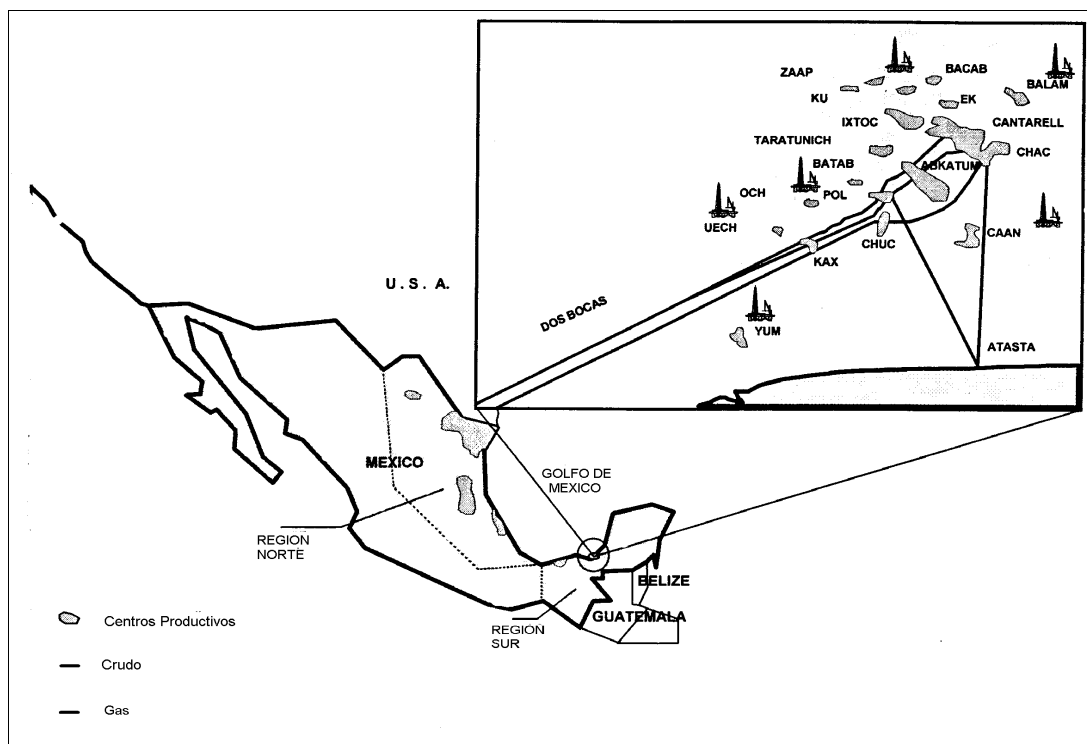


Fig. 1 Ubicación de la Sonda de Campeche y sus Principales Complejos Productores.

2. CATEGORIZACION DE PLATAFORMAS

Las nuevas especificaciones para diseño y evaluación de plataformas fijas en la Sonda de Campeche (PEMEX e IMP, 1998) proporcionan niveles aceptables y deseables de seguridad y de servicio. En estas especificaciones, las estructuras costa-fuera fueron categorizadas en tres niveles de acuerdo a la producción que ellas manejan: muy alta, alta y moderada (Tabla 1). En estas especificaciones se acepta que las plataformas con mayor volumen de producción manejada están sujetas a mayores riesgos.

Actualmente se está trabajando en una metodología congruente para la evaluación y el diseño de las plataformas de la Sonda de Campeche, donde se consideran los niveles de producción de las plataformas y las consecuencias de falla que estas puedan llegar a tener durante un evento catastrófico, como huracán, sismo, etc. Las consecuencias de falla están en función del daño al medio ambiente, impacto económico originado por la suspensión de la producción, los costos de reparación y reemplazo de la estructura, y de la posible pérdida de vidas humanas.

SERVICIO	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN MANEJADO	CATEGORIA DE EXPOSICIÓN (CONSECUENCIA DE FALLA)	
		EVALUACIÓN	DISEÑO
Enlace	-	Muy Alta	Muy Alta
Medición	-	Muy Alta	
Compresión	-	Alta	
Habitacional	-	Moderada	
Inyección	-	Alta	
Mixto ^a	> 100,000 BPD	Muy Alta	
	< 100,000 BPD	Alta	
Perforación	> 100,000 BPD	Muy Alta	
	50,000 BPD - 100,000 BPD	Alta	
	< 50,000 BPD	Moderada	
Producción Temporal	> 100,000 BPD	Muy Alta	
	< 100,000 BPD	Alta	
Producción Permanente	-	Muy Alta	
Rebombeo	-	Muy Alta	
Recuperación de Pozos	50,000 BPD - 100,000 BPD	Alta	Muy Alta
	< 50,000 BPD	Moderada	
Telecom	-	Moderada	

Tabla 1. Categorización de plataformas (PEMEX y IMP, 1998)

3. PLATAFORMA ANALIZADA

El desarrollo de los análisis para la evaluación de las consecuencias de falla en plataformas marinas se muestra mediante el estudio de la plataforma Pol-A Compresión. Seleccionada por la gran importancia que tiene dentro del sistema productivo de PEMEX. Debido a la gran cantidad de producción que maneja, sus consecuencias tienden a ser grandes. Las pérdidas son relativamente muy altas cuando la comparamos con la infraestructura costa-fuera de los Estados Unidos y del Mar del Norte.

Su función es la de comprimir el gas a la presión necesaria para su transporte a la estación de recompresión Atasta, en la costa, mediante un gasoducto submarino, así como su acondicionamiento para el consumo interno de la plataforma. Este tipo de instalaciones permite aprovechar el gas natural

que se genera en la Sonda evitando el quemado en la atmósfera y sus efectos sobre el medio ambiente de la región.

Pol-A esta localizada en la Región Suroeste de la Sonda de Campeche y forma parte del complejo Pol Alfa. Pol, significa "cabeza" en Maya, un nombre apropiado ya que Pol -A es el punto en el cual se concentra el crudo tipo Istmo y casi el 80% de la producción total de gas, enviándolo por gasoductos hacia Atasta, en la costa (Fig. 1).

Descripción de la plataforma Pol-A

La plataforma Pol-A Compresión es una estructura (jacket) de acero tipo templete (Fig. 2) ubicada en la bahía de Campeche, desplantada a una altura de agua de 34m. Está conectada a plataformas de producción y quemadores por medio de puentes.

Fue diseñada por Proyectos Marinos en 1980-1981 acorde con los lineamientos del API RP 2A, edición 1980. La plataforma fue instalada en octubre de 1981. En su fabricación se empleó el acero A-36 para la mayoría de elementos estructurales. Para las juntas se emplearon los aceros de alta resistencia ASTM A-537 Clase 1 y ASTM A-633 Grados C y Grado D. La sección horizontal de la planta inferior es 27.96 x 64.54 m y la superior de 18.59 x 55.17 m con una elevación de 4.57 m arriba del nivel medio del mar, con una inclinación de patas de 1:10. La estructura tiene ocho piernas de 155 cm de diámetro.



Fig.2. Plataforma Pol-A Compresión

4. COSTOS TOTALES DE POL-A

Costos Iniciales

Los costos de inversión fija también conocidos como gastos de inversión inicial son todos los gastos en que se incurre para el diseño, construcción y puesta en operación de las instalaciones. Además al costo del equipo de proceso y servicios auxiliares deben incluirse los gastos de almacenes, laboratorios, helipuertos y de todos aquellos componentes que son parte de la instalación.

Los gastos que integran la inversión inicial de cualquier instalación generalmente son agrupados como costos directos y costos indirectos, los primeros están relacionados en forma directa con los suministros de equipos, materiales y componentes (módulos, paquetes, instrumentos, etc.), los costos indirectos son los gastos en que se incurre para llevar a cabo la obra, ingeniería, construcción, etc. Sin embargo esta clasificación no es determinante, por el contrario, es más representativo agrupar el costo de acuerdo a las actividades programadas para cada uno de los proyectos (Fig. 3).

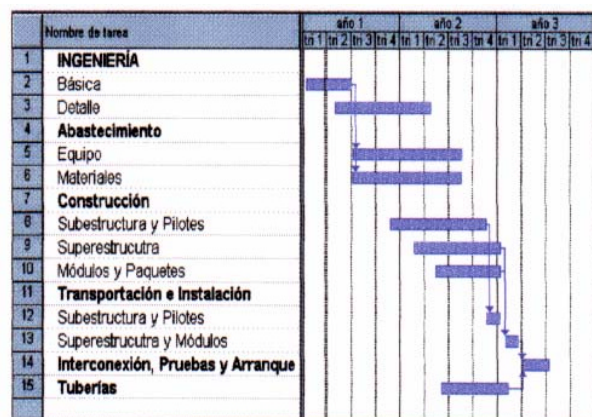


Fig. 3. Programa de construcción de la plataforma (IMP, 1998)

Para determinar la inversión inicial de alguna instalación pueden emplearse diferentes tipos de estimados (orden de magnitud, preliminar, detallado, definitivo, etc.), cuya selección dependerá de la cantidad de información disponible y de la precisión que se pretenda alcanzar con el estimado.

Para determinar la inversión inicial para la plataforma Pol-A se empleó un estimado detallado (IMP, 1998). Obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 2). Estos costos incluyen:

- a) Costos de Ingeniería
- b) Costos de Construcción, transportación e instalación de la subestructura, superestructura y pilotes.
- c) Suministro, transportación e instalación de equipos.
- d) Líneas submarinas.
- e) Interconexión, pruebas y arranque.
- f) Costos indirectos.

CONCEPTO	COSTO (USD)
Estructura	71194,610
Equipos	107825,000
Costo Total	179'019,610

Tabla 2. Inversión Inicial.

Para volúmenes de producción y tirantes similares de plataformas de compresión se muestra (Fig. 4) una relación entre el peso de las diferentes estructuras de la plataforma en función del tirante de agua, que puede ser útil en la estimación de los costos iniciales. Estudios similares se han realizado para plataformas de producción, perforación, enlace, de telecomunicaciones, trípodes de apoyo, etc., instaladas en la Sonda de Campeche (Martínez y Rodríguez, 1999).

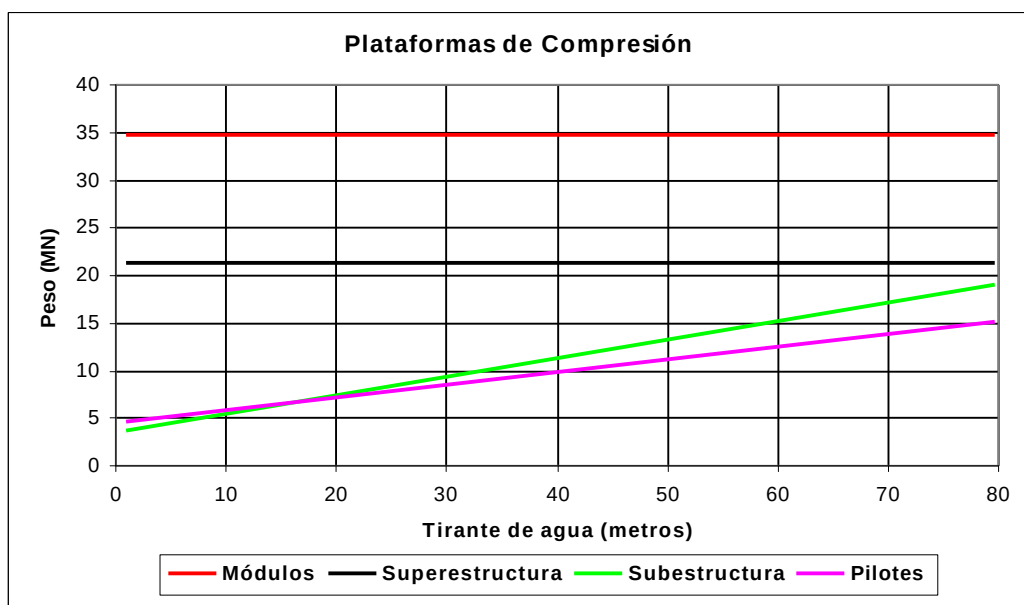


Fig. 4. Peso de los componentes de la estructura vs. Tirante de agua

Pérdida de Producción

Actualmente, en la Sonda de Campeche, PEMEX tiene una producción de 2.0 MBPD de crudo y 1.5 MMPCD de gas, del cual Pol-A maneja 1.2 MMPCD de gas (IMP, 1997).

La presencia de un huracán o de alguna falla en la plataforma o de los equipos, provocará que se ejecute un Plan de Contingencia, que traerá consigo la disminución de la producción. Así una falla en el equipo como la de los compresores, provocaría un paro en cadena con las demás plataformas.

PEMEX tiene la filosofía de no disminuir los niveles de producción cuando ocurre alguna falla en la plataforma, ya que se tienen planes de acción bien definidos para poder diferir la producción por rutas de envío alternas, que permitirán normalizar los niveles de producción. Para el caso de un huracán los niveles de producción disminuyen, pero sin llegar al paro total. Para ilustrar lo mencionado anteriormente, en la Fig. 5 se muestra la historia de la producción diferida de la Sonda de Campeche durante el paso del huracán MITCH el 23 de octubre de 1998. En esta ocasión no se tuvo daño alguno en la plataforma, sin embargo se difirió la producción debido a la aplicación del Plan de Contingencia.

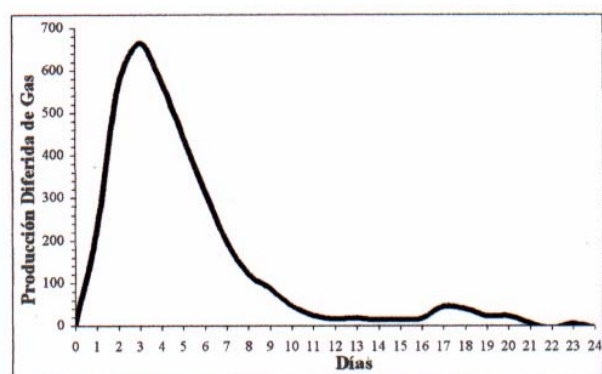


Fig. 5. Producción diferida de gas durante el huracán Mitch.

Para determinar los costos asociados a la suspensión de la producción, tenemos que obtener el costo de oportunidad, entendiendo por este, como la cantidad que dejamos de ganar por no producir en ese lapso de tiempo o como los costos que surgen como consecuencia de no producir en ese momento.

A partir de lo mencionado anteriormente y de la invaluable experiencia obtenida durante el huracán MITCH, se concluye que en los costos de producción asociados a la falla de la plataforma se deben incluir costos como aquellos debido al cambio de ruta del flujo de la producción y el incremento en el costo de operación en el ajuste del sistema productivo. Esto se explica con la Fig. 6, en la cual se supone que existe la presencia de un huracán que origina el cierre temporal de operaciones en la plataforma. Debido al colapso de la plataforma, su producción manejada V puede ser suspendida por algún tiempo mientras es activada la ruta de emergencia para el transporte del crudo o gas, en donde la capacidad de la nueva ruta es V_a ($V_a < V$). El intervalo desde el comienzo de la aplicación de la ruta alterna hasta el restablecimiento de la producción total es denominado tiempo de recuperación T_R . El costo de producción para el envío del gas por la ruta alterna sufre un incremento ΔP_g por unidad de volumen. Entonces el costo asociado a la producción diferida es:

$$C_{pd} = T_a V P_g + T_R (V - V_a) P_g + T_R V \quad (1)$$

en donde P_g es el precio de venta del gas en condiciones normales.

Por otro lado, para obtener el costo de oportunidad es necesario hacer una diferencia entre los costos fijos y variables, entendiendo por estos como aquellos costos que no dependen del nivel de producción y aquellos que si dependen del nivel de producción, respectivamente.

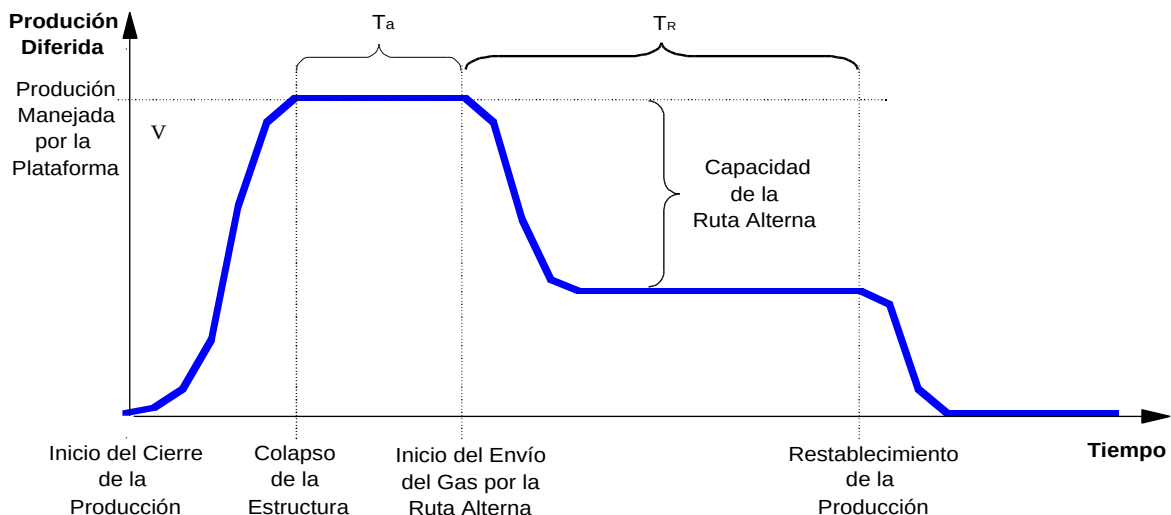


Fig. 6. Comportamiento de la producción diferida en caso de colapso de la plataforma

Costos asociados a la pérdida de una Vida Humana

Esta metodología no intenta valorar la vida humana, el objetivo es analizar las consecuencias económicas asociadas a la pérdida de la vida de un trabajador de plataforma.

Para evitar la pérdida de vidas humanas en caso de huracán, PEMEX cuenta con un Plan de Respuesta a Emergencias por Huracanes en la Sonda de Campeche (PEP, 1997), el cual considera que ninguna persona esté en plataforma en presencia de un huracán, como resultado de las bien definidas fases de evacuación en función de la cercanía del huracán. Sin embargo, en un sismo o en una falla operacional o estructural, existe la posibilidad que se presenten condiciones desfavorables, provocando la muerte de uno o varios trabajadores.

Para valorar el costo asociado con la pérdida de una vida humana, existen diferentes filosofías que recurren a diversos factores que difícilmente van a lograr satisfacerse por completo, debido a la complejidad para determinarlos.

Los factores que se incluyen para dichos costos se simplifican en los siguientes tres grupos:

- a) Legales
- b) Sociales
- c) Familiares

El modelo general para obtener el valor por la pérdida de una vida humana es:

$$V_{HL} = E_C \text{ PVF} \quad (2)$$

Donde:

V_{HL} = Valor actual debido a la pérdida de la vida humana

E_C = Costos asociados a la pérdida de una vida humana

PVF = Función de valor presente

Costos asociados a la pérdida de una vida humana (E_C)

Este término es el más difícil de valuar debido a los diferentes puntos de vista, en donde se incluyen los 17 factores más importantes (M. Cornell, 1976) que son:

- a) Pérdida del Salario
- b) Oportunidad Familiar
- c) Oportunidad Comunitaria
- d) Pérdidas de la Empresa
- e) Seguros Administrativos
- f) Costos Legales y de la Corte
- g) Daños y Perjuicios
- h) Hospital y Médicos
- i) Costos del Funeral
- j) Costos Indirectos
- k) Daños a Propiedades
- l) Pérdida de Bienes de la Víctima
- m) Prestaciones Laborales
- n) Impuestos
- o) Consumo de la Víctima
- p) Costos de Programas de Seguridad

Para cuantificar cada uno de los factores antes mencionados, se tomo como base la pérdida del salario, por lo que se requiere información estadística de: edad, sexo, ingresos anuales, incremento anual de su productividad y porcentaje anual de ahorro, de los trabajadores que laboran en las plataformas, así como las tasas de interés, inflación y crecimiento real del salario. La Ec. 3 presenta el modelo empleado para cuantificar la pérdida del salario.

$$P = A \frac{1 + (1 + j)^n}{i - j} \quad (3)$$

Donde:

P = Valor presente del salario perdido

A = Ingreso anual del trabajador

n = Periodos a partir de la muerte hasta la vida útil del trabajador

i = Tasa de interés bancaria promedio

j = Tasa de cambio (aumento o disminución) del flujo de efectivo (salario) entre un periodo y el siguiente hasta la vida útil del trabajador

Finalmente, se obtuvo el valor esperado del costo asociado a la pérdida de una vida humana cuyo monto es de US\$ 400, 000.

Impacto Ambiental

Se calcula que anualmente se derraman en los océanos de 5 a 10 millones de toneladas de petróleo crudo y productos derivados. En el medio ambiente costero, donde más amenazados están los recursos vivos del mar, la contaminación del petróleo viene a sumarse a la producida por aguas negras, insecticidas, desechos de las refinerías y de la industria de productos químicos y alimenticios. También a este proceso, se agrega la acción de la sobrepesca.

Todos los petróleos crudos son venenosos, pero muchos destilados de petróleo crudo lo son aun más, debido a que contienen proporciones más elevadas de compuestos inmediatamente tóxicos. La toxicidad a largo plazo puede dañar a la flora y fauna marinas que no perecen inmediatamente amenazadas a causa de los derrames de hidrocarburos, y pueden incorporarse en el organismo de los animales marinos y en el hombre.

Los componentes más tóxicos de los hidrocarburos son hidrosolubles; por lo tanto, de poco sirve, si se exceptúa el punto de vista estético, eliminar las películas de hidrocarburos que flotan sobre el agua. El tratamiento con detergentes, incluso con detergentes no tóxicos, es peligroso, porque expone a los organismos marinos a mayores concentraciones de hidrocarburos solubles y tóxicos, y dispersa el petróleo en gotas minúsculas que pueden ser ingeridas por muchos organismos y acumularse en ellos.

La acción natural de las bacterias termina por descomponer los hidrocarburos presentes en el océano; de todas formas, las partes más tóxicas son más lentas en desaparecer en razón de que los hidrocarburos son muy estables en los animales y sedimentos marinos.

La contaminación por petróleo crudo o derivados de petróleo daña el ecosistema marino, provocando diferentes efectos como:

- Muerte directa de los organismos provocada por asfixia (Arthur, 1968).
- Muerte directa por envenenamiento de los organismos marinos (Blumer 1970).
- Muerte directa provocada por la exposición de los organismos a los componentes tóxicos del petróleo en solución.
- Destrucción de las especies jóvenes ya que son las más sensibles por la contaminación.
- Destrucción de las fuentes de alimentación de los organismos superiores.
- Incorporación de acumulamientos subletales de petróleo y derivados del petróleo en los organismos, reduciendo su resistencia a infecciones y otras enfermedades; por ejemplo, ésta es la causa principal de la muerte de aves inmediatamente después de sobrevivir a la exposición de petróleo (Beer, 1968).
- Destrucción del valor de las especies comerciales y sus derivados provocada por la incorporación de petróleo.
- Incorporación de cancerígenos en la cadena alimenticia marina y en las fuentes de comida humana.
- Efectos leves que interrumpen algunos de los procesos necesarios para la reproducción de las especies y para la supervivencia de especies mayores que participan en la cadena alimenticia marina.

El comportamiento que tiene la mancha de petróleo en un derrame depende de muchos factores. Entre los más importantes encontramos las características del petróleo, condiciones meteorológicas y oceanográficas del lugar y efectos de los procesos naturales como la evaporación, difusión, oxidación, biodegradación, etc. (Fig. 7). La complejidad y variabilidad de estos factores hace muy difícil pronosticar con exactitud su comportamiento.

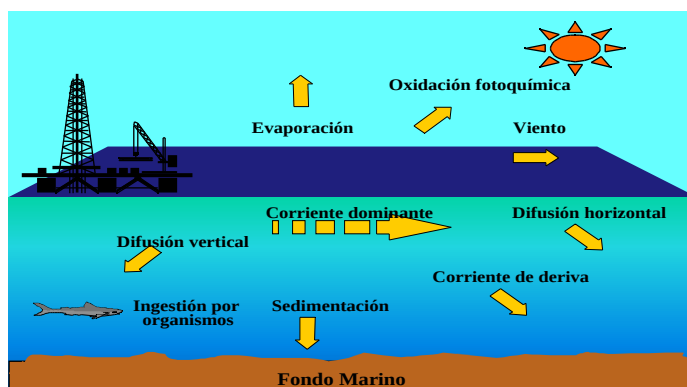


Fig. 7. Esquema de propagación de crudo en el mar

Para determinar el comportamiento de la mancha de petróleo se empleo la Regla de Blokker (1964) (Fig. 8), a la cual se adicionaron algunos factores para considerar los efectos del viento y las corrientes.

Una de las filosofías de PEMEX es la protección al medio ambiente y sobre todo de las reservas ecológicas que rodean la Sonda de Campeche. Para cumplir con sus políticas PEMEX Explotación y Producción cuenta con el Plan de Contingencias para Combatir Derrames de Hidrocarburos, el cual incluye equipos especializados y de personal altamente capacitado para la recolección de hidrocarburos en instalaciones marinas, con una capacidad de respuesta a nivel regional de 5,000 barriles/hora. Además se cuenta con equipos de apoyo, barreras de contención de hidrocarburos, vehículos marinos y aéreos de distintos tipos, y equipos contra incendios (SEMERNAP, INE, 1997). Los costos de recolección de crudo del mar se presentan en la Fig. 9.

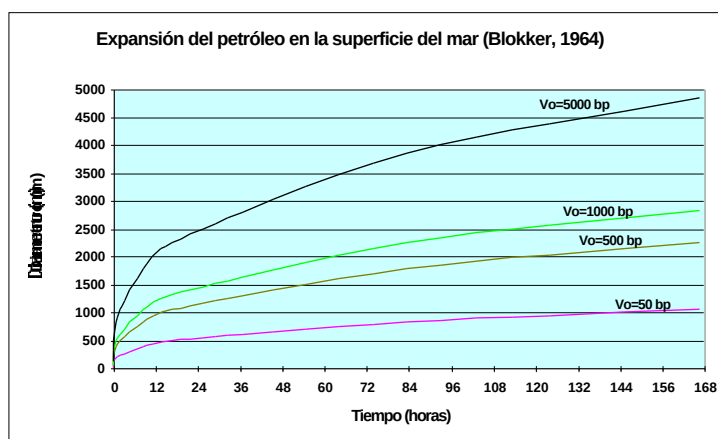


Fig. 8. Expansión del derrame en función del tiempo

En el caso de la Sonda de Campeche se han presentado dos derrames considerables, el primero en junio de 1979 en el pozo Ixtoc I, y el segundo en octubre de 1986 en el pozo Abkatum 91. Se derramaron 530,000 y 39,000 toneladas de petróleo crudo respectivamente (REGINAVE, 1996).

El derrame del pozo Ixtoc dio lugar a que el gobierno Mexicano organizara un programa de investigación de carácter multidisciplinario integrado por la Secretaria de Marina, la Secretaria de Pesca y Petróleos Mexicanos. A este organismo se le denominó "Programa coordinado de Estudios Ecológicos en la Sonda de Campeche".

Sus objetivos agruparon estudios relacionados con la meteorología, la oceanografía física, la oceanografía química, la oceanografía biológica y pesquera y actividades colaterales de apoyo. La información generada en estas matrices de acción ha permitido evaluar a plazos el impacto ambiental del derrame de petróleo sobre la ecología y las pesquerías del Golfo de México.

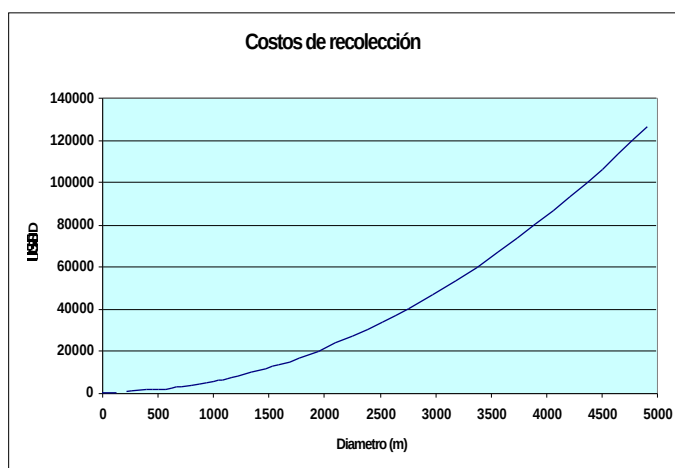


Fig. 9. Costos de recuperación del crudo

Los estudios realizados por las instituciones que participaron en el Simposio Internacional Ixtoc I, realizado del 2 al 5 de junio de 1982; llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se encontró que existe variación en la sucesión estacional de las especies de un año a otro, sin embargo, estas variaciones pueden deberse a las variaciones estocásticas propias de la naturaleza y no a los efectos del derrame de Ixtoc I (Licea et al, 1982).
- Se registraron variaciones en la densidad de organismos, biomasa y biodiversidad de especies, lo que se debe también a variaciones naturales (Licea et al, 1982).

- c) No se encontraron cambios apreciables en la composición taxonómica de las especies al hacer la comparaciones estadísticas antes y después del derrame (Licea et al, 1982).
- d) Se encontraron variaciones en biodiversidad y densidad de los organismos durante el tiempo en que duró el derrame. Sin embargo no se afectó en absoluto la ecología del fitoplacton de la Sonda de Campeche, aunque esto no significa que su efecto pudiera haberse sentido en otras áreas fuera de la Sonda (Licea et. al., 1982).
- e) Que el camarón, ostión, lisa, guachinango, mero, sierra, robalo y pulpo que son algunas de las pesquerías más importantes que se desarrollan en la zona costera del Golfo de México no se vieron afectadas por el derrame de crudo del pozo Ixtoc I (Carranza et al, 1982).

5. ANALISIS DE CONFIABILIDAD DE LA PLATAFORMA

Se considera que la plataforma está compuesta por tres subsistemas principales: la cimentación, subestructura y superestructura, para los cuales los mecanismos de colapso se presentan de manera independiente. Lo que significa que las subestructuras, o componentes estructurales, forman un sistema en serie sin correlación entre sus capacidades resistentes. Mediante el principio de los trabajos virtuales se determinan la capacidad lateral última de cada componente donde se consideran la geometría y materiales no lineales.

En este análisis, la combinación de cargas correspondientes a la condición de carga de huracán es tomada tal que la componente de la velocidad del viento y de la corriente marina ocurre al mismo tiempo y en la misma dirección que la máxima altura de ola esperada. El periodo de la ola es tomado como el valor esperado del periodo asociado con dicha altura de ola.

Por otro lado, la condición de carga sísmica es caracterizada mediante espectros elásticos de piso de tres componentes, dos horizontales y uno vertical. Las componentes horizontales presentan la misma intensidad y representan la energía de entrada como carga lateral sobre el pilote de cimentación a una profundidad equivalente a 5 o 10 diámetros del pilote debajo del piso marino. La componente vertical representa la energía de entrada como carga axial sobre los pilotes de cimentación a lo largo del tercio más bajo de la altura penetrada.

El análisis de confiabilidad fue realizado usando el programa de computadora ULSLEA (Ultimate Limit State Limit Equilibrium Analyses). La clave principal del análisis de confiabilidad está en el modelado de las propiedades aleatorias de la estructura. Las incertidumbres fueron caracterizadas mediante la relación entre los valores verdaderos y los valores predichos. Las incertidumbres fueron caracterizadas por el valor medio y la desviación estándar, tanto para la capacidad estructural como de las cargas actuantes (cargas de tormenta y de sismos). Las funciones de densidad de probabilidades empleadas se consideran del tipo Log-normal (Xu y Bea, 1998).

Probabilidad de falla debido a condiciones extremas de huracanes

El programa de computadora ULSLEA, desarrollado en la Universidad de California, Berkeley, fue utilizado para evaluar la carga de huracán (Bea y Xu, 1997). Los procedimientos sobre el análisis de las cargas de huracán: viento, oleaje y corrientes que se incorporaron al ULSLEA han sido verificados con mediciones de cargas en plataformas, tanto en campo como en laboratorio. Además, el procedimiento para el cálculo de las fuerzas ha sido verificado con resultados de programas de análisis más sofisticados.

Tabla 3. Resumen del modelo aleatorio (Bea, 1997)

	SESGO MEDIO	COV
CARGA DE HURACAN		
Ola en cubierta		
Ola en Jacket	0.89 (suelo rígido) 1.0 (suelo blando)	0.3 (suelo rígido) 0.3 (suelo blando)
CAPACIDADES		
Brazo Tubular	1.0	0.1
Junta Tubular	1.87	0.2
Lateral del Pilote en Arcilla	2.5	0.4
Axial del Pilote en Arcilla	1.35	0.25
Lateral del Pilote en Arena	0.95	0.4
Axial del Pilote en Arena	1.1	0.3

Las características estadísticas en el análisis para carga de huracán son mostradas en la tabla 3. La componente "cimentación" es el elemento más crítico en el análisis de confiabilidad debido a la mayor incertidumbre, mayor dispersión, asociada con su modelado.

Se observa que los efectos de suelo blando no reducen demasiado la probabilidad de falla bajo cargas extremas. El índice de confiabilidad de la plataforma cimentada en suelo rígido es $\beta=1.2$, mientras que el índice de seguridad de la misma plataforma pero cimentado en suelo blando es $\beta=1.4$. La razón es que las incertidumbres asociadas con la cimentación piloteada son mucho mayores que los efectos de interacción del oleaje con el suelo marino, los cuales se convierten en un efecto secundario.

Además, para la condición de suelo blando se ejecutaron una serie de análisis (Xu y Bea, 1998) para determinar la probabilidad de falla condicional ($P_{f|H}$) para 1, 25, 100, 200, 500 y 2400 años de periodo de retorno. H es la altura de ola para diferentes periodos de retorno. La probabilidad de falla total es estimada por:

$$P_f = \int_H P_{f|H} f_H(h) dh \quad (4)$$

Y se obtiene una probabilidad de falla anual que está en el intervalo de 1×10^{-4} y 3×10^{-4} .

Probabilidad de falla debido a la condición de carga sísmica extrema

La desviación estándar de la aceleración horizontal máxima anual debido al sismo fue tomada como $\sigma_{lnG}=1.1$; la desviación estándar de las condiciones de la geología local y del suelo fue tomada como $\sigma_{lnGS}=0.5$; las características de la plataforma, masa, rigidez, y amortiguamiento, fueron tomadas con una desviación estándar $\sigma_{lnS}=0.3$. Resulta que las fuerzas sísmicas inducen una desviación estándar total de $\sigma_{lnE}=1.2$. La media del sesgo para la máxima fuerza sísmica fue determinada como $B_E=1.0$. Los cálculos de estas incertidumbres se basaron en los criterios del ISO y en el nuevo Criterio del IMP (Bea, 1997). La capacidad estructural tiene el mismo modelo que fue empleado en el análisis de cargas de huracán.

Se encuentra una excelente correlación con los modos de falla encontradas para el caso de cargas de huracán. La falla crítica corresponde a los pilotes de cimentación, sin embargo los índices de seguridad resultantes del análisis sísmico son notoriamente mayores que sus correspondientes debido a cargas de huracán.

Dado el resultado del análisis de confiabilidad para un periodo de retorno de 500 años, se hicieron una serie de análisis para determinar las probabilidades condicionales de falla ($P_{f|E}$) para cargas sísmicas con periodos de retorno de 100, 200, 500, 1000 y 5000 años.

La probabilidad total de falla puede ser estimada como:

$$P_f = \int_E P_{f|E} f_E(e) de \quad (5)$$

La probabilidad anual de falla fue determinada en el intervalo de 1.5×10^{-5} a 4×10^{-5} . La probabilidad de falla anual debido a carga de sismo es más pequeña que la correspondiente a carga de huracán (Xu y Bea, 1998).

Probabilidad de falla debido a peligros operacionales

Los estudios analíticos y experimentales basados en evaluación indican que para eventos con catastróficas consecuencias, la plataforma Pol-A compresión tiene una probabilidad de falla $P_{fo}=3.2 \times 10^{-4}$ por año, mientras que para eventos no destructivos, que interrumpen la producción y resultan en algunas consecuencias de daños fueron evaluadas como 6×10^{-2} por año (HAE, 1997a y 1997b; Bea 1997). Un resumen de los resultados de HAE para fallas catastróficas se muestra en la figura 10.

Dos probabilidades de falla total son mostradas en la Fig. 10, una que incluye el daño por huracanes y otra sin dicho efecto. Dada la evaluación de las probabilidades de falla asociadas con las cargas

accidentales ambientales (huracanes y sismos), la probabilidad de falla por operación se estima $P_{fo}=3.2 \times 10^{-4}$ por año (Bea, 1997).

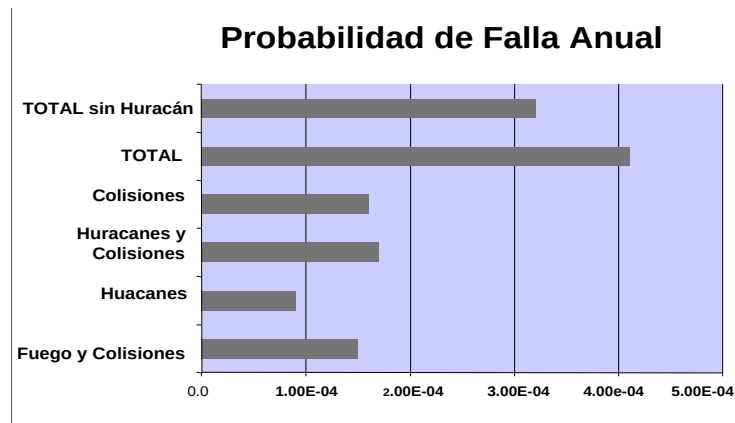


Fig. 10. Probabilidad anual de falla estimada por HAE (1997a)

Probabilidades de falla debido a peligros operacionales (P_{fo}) y ambientales (P_{fa})

La probabilidad de falla total (P_{fT}) puede ser expresada como:

$$P_{fT} = P_{fo} + P_{fa} \quad (6)$$

en donde

$$P_{fa} = P_{fH} + P_{fE} \quad (7)$$

En ambas expresiones se considera que ambos eventos son mutuamente excluyentes.

Se encuentra que la probabilidad de falla total (falla catastrófica) de la Pol-A Compresión es de $P_{fT}=6.7 \times 10^{-4}$ a 7.9×10^{-4} por año. Un valor adecuado de esta probabilidad es $P_{fT}=7 \times 10^{-4}$ por año (Fig. 11), considerando las contribuciones de falla por operación de 3.2×10^{-4} por año (46%), de huracanes 3.0×10^{-4} por año (43%), y de sismos de 0.8×10^{-4} por año (11%) (Bea, 1997).

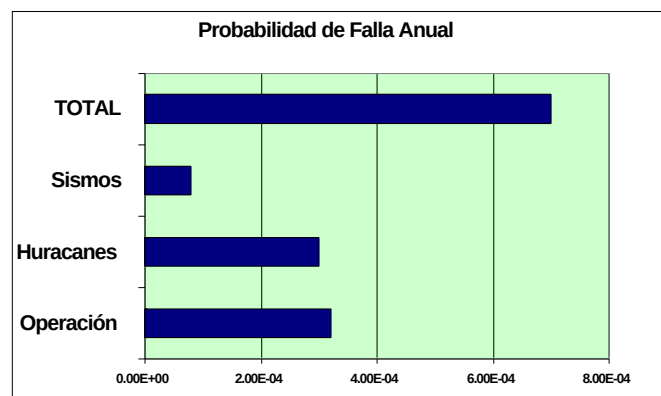


Fig. 11. Probabilidad de falla anual de la plataforma POL-A Compresión (Bea, 1997)

6. COSTO DEL RIESGO

En esta etapa se analiza el caso cuando la falla significa el colapso total, es decir, se pierde la instalación, y será necesario construir una nueva plataforma que al menos cumpla con las funciones de la antigua instalación.

Los costos que implica construir una plataforma nueva están compuestos por los costos de construcción y por las consecuencias causadas por dicha falla.

EVENTO	PROBABILIDAD DE FALLA ANUAL	COSTO ANUAL ESPERADO DE LAS CONSECUENCIAS DE FALLA
Total	7.0×10^{-4}	\$1'050,000
Sismos	0.8×10^{-4}	\$120,000
Huracanes	3.0×10^{-4}	\$450,000
Operación	3.2×10^{-4}	\$480,000

Tabla 4. Costos de consecuencias de falla

Estas consecuencias consisten en el retiro de la plataforma fallada, la construcción de la nueva instalación, la implementación de las operaciones, conservación del ambiente, pérdida de la producción, accidentes, pérdidas de vidas humanas, etc. Un valor supuesto preliminar de las consecuencias por fallar la plataforma Pol-A alcanza los 1,500 millones de dólares. Los costos esperados debido a la falla para los diferentes eventos son obtenidos mediante la expresión:

$$E[C_F] = P_f C_F PVF \quad (8)$$

En el cual P_f es la probabilidad de falla de la plataforma debido a la acción de la carga correspondiente, C_F el costo de las consecuencias de falla, y PVF es la función para actualizar los costos a una fecha de referencia. En la tabla 4 se presentan los costos esperados de falla, obtenidos con la Ec. 8 para diferentes acciones.

CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para cuantificar las consecuencias de falla de plataformas marinas, que permitirá tomar decisiones bien fundamentadas para la administración del riesgo.

El modo predominante de falla que se presenta en la cimentación es debido a las grandes incertidumbres que presenta su conocimiento, a pesar de los efectos beneficiosos que aporta el suelo blando.

En la Bahía de Campeche prevalecen los efectos de los huracanes con respecto a las acciones sísmicas. Las fuentes sísmicas más importantes están bastante alejadas de la región y no se han encontrado evidencias de amplificación sísmica.

Los altos costos de la producción manejada por la plataforma Pol-A Compresión implica que, ante un colapso de las instalaciones, se deje de tener grandes beneficios. Los costos de las estructuras son relativamente pequeños. Otras plataformas de la Bahía de Campeche también manejan grandes volúmenes de crudo y de gas. Esta situación refuerza la situación de realizar la clasificación de plataformas en función del volumen de producción manejado.

REFERENCIAS

- Arthur, P. R. (1968), "The biological problems of littoral pollution by oil and emulsifiers-assuming up", *Fld. Stud.*, 2 (suppl): 154-64.
- Bea, R. G. (1997), "Reliability Characteristic of the Pol A Compression Platform – Platform Reassessment and Requalification Evaluations", Reporte No. 2 para PEMEX, IMP, and Brown & Root International Inc., Marine Technology & Management Group, Universidad de California, Berkeley, Noviembre.
- Bea, R. G. y DesRoches, R. (1993), "Development and Verification of a Simplified Procedure to Estimate the Capacity of Template-Type Platforms", *Memorias del Fifth International symposium Integrity of Offshore Structures IOS '93 Glasgow*, D. Faulkner et al., Emas Scientific Publications, pp. 129-148.
- Beer, J. V. (1968), "Post mortem findings in oiled auks during attempted rehabilitation", *Fld. Stud.*, 2 (suppl): 123-9.
- Blokke, P. C. (1964), "Spreading and evaporation of petroleum products on water", Artículo presentado en el 4th International Conference of Port, Amberes, Bélgica, Junio.
- Blumer, M. (1970), "Oil pollution and living resources of the sea", Woods Hole Oceanographic Institution, *Memorias de la Conferencia de Polución Marina y sus Efectos sobre la Vida de los Recursos y Pesca*. Organizado por el Departamento de Pesquería, División de Recursos Pesqueros de la FAO. Diciembre.
- Campos, D. (1999), "Definición del riesgo de falla estructural aceptable", Sección 3.4 del Primer Curso de Aplicación del Criterio Transitorio: Plataformas Marinas, 25-29 de enero, Ciudad del Carmen, México.
- Carranza, J., Salgado, M. y Meneses M. D. (1982), "Comportamiento de la producción pesquera antes y después del derrame del pozo Ixtoc I", Instituto Nacional de Pesca, Junio.
- Cornell, M., Daniels, P., Kirland, J. y Wolff, A. (1976), "A Survey of Methods for Estimating the Cost Value of Human Life", Operations Research, Inc. Silver Spring, Maryland, Mayo.

Hopper and Associates Engineers (1997a), "PEMEX Pol Compression Platform Development and Application of Methods to Determine if the Platform is adequate for Functioning", Reporte para CISIND, Dr. Mario Chavez, Redondo Beach, CA, Diciembre.

Hopper and Associates Engineers (1997b), "PEMEX Pol Compression Platform Developed and Application of Methods to Minimize the Economic Risk and to Increase the Platform's Safety," Reporte para CISIND, Dr. Mario Chavez, Redondo Beach, CA, Diciembre.

IMP (1997), Reporte Interno, Departamento de Civil-Acero, J.L. Monrroy, R. Ramos and R Vázquez. Eje Central Lázaro Cárdenas, México, D.F.

IMP, Depto. de Costos, (1998), "Resumen ejecutivo de costos promedio de estructuras típicas ubicadas en la Sonda de Campeche", México, Septiembre.

Licea, S., Luna, R. y Torres, P. (1982). "Evaluación de los posibles efectos del derrame del pozo Ixtoc I sobre las comunidades de fitoplacton y la producción primaria de la Sonda de Campeche", Universidad Autónoma de México, México, Junio.

Martínez M. y Rodríguez M. (1999), "Cuantificación de las consecuencias de falla de plataformas marinas", Tesis en desarrollo para obtener el título de Ingeniero Industrial en el Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.

Mortazavi, M. y Bea, R. G. (1995), "Screening Methodologies for Use in Platform Assessments and Requalifications". Reporte Final para la Joint Industry-Government Sponsored Project, Marine Technology and Management Group, Dept. of Civil Engineering, Universidad de California, Berkely, Junio.

Pemex Exploración y Producción (1997), "Plan de respuesta a emergencias por huracanes en la Sonda de Campeche", Cd. Del Carmen, Campeche, Junio.

PEMEX e IMP (1998), "Criterio Transitorio para el Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche", Segunda Edición, México, Abril.

REGINAVE, (1996). Artículo 801.01.01, Revista "Guardacostas", ejemplar No. 84, Argentina. Prefectura Naval de Argentina.

SEMARNAP, INE (1997), "Resumen ejecutivo de impacto ambiental del proyecto Abkatum consistente en la construcción de dos oleogasoductos y la perforación de seis pozos", México, Junio.

Xu, T. y Bea, R. G. (1998), "Reliability Characteristic of the Pol A Compression Platform – Updated Platform Ultimate Limit State Limit Equilibrium (ULSLEA) and Reliability Analyses", Reporte No. 1B para PEMEX, IMP, y Brown & Root International Inc., Marine Technology & Management Group, Universidad de California, Berkeley, Abril.