



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología  
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología

**ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN DE LOS HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS EN EL SEDIMENTO DEL SUR DEL  
GOLFO DE MÉXICO**

**(Campañas oceanográficas SGM-2003, SGM-2004, SGM-2005, SGM-2006)**

**TESIS**

que para optar por el grado de Maestro en Ciencias

(Química marina)

Presenta:

Alejandro Bustamante García

Director de tesis:

Dr. Joaquín Eduardo Aguayo Camargo, Facultad de Ingeniería

Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez † ICMYL

Comité tutorial:

Dr. Alfonso Vázquez Botello, ICMYL

M. en C. Santiago Capella Vizcaíno, ICMYL

Dra. Rosario Iturbe Argüelles, Instituto de Ingeniería

Dra. María del Carmen Durán Domínguez, Facultad de Química

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, Enero de 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

A la UNAM, por ser universal.

Al ICMYL, por el apoyo, tiempo y espacio.

Al Dr. Felipe Vázquez G. †, por las enseñanzas, el tiempo y la oportunidad de desarrollo.

Al Dr. Joaquín Eduardo Aguayo Camargo, por darle seguimiento a este proyecto.

A todo el comité tutorial por sus valiosas aportaciones y su compromiso para culminar este trabajo.

A todos los compañeros del laboratorio de físico química marina, por el tiempo y las enseñanzas. Al M. en C. Héctor Alexander Valdez, al Biólogo Antonio Frausto y al M. en I. Gustavo Enciso por el apoyo para culminar este trabajo.

A mi familia por el apoyo. Especialmente a Karla Jenny y a Nori Sofía por todo el amor y las lecciones de vida.

## DECLARATORIA

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce del presente es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditarlas mediante los recursos editoriales convencionales”.

IQ. Alejandro Bustamante García

	ÍNDICE	Página
<b>ABSTRACT</b>		8
<b>RESUMEN</b>		9
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>		10
<b>2 OBJETIVOS E HIPÓTESIS</b>		12
2.1 OBJETIVO GENERAL		12
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES		12
2.3 HIPÓTESIS		12
<b>3 ANTECEDENTES</b>		13
3.1 LOS HIDROCARBUROS		13
3.1.1 El petróleo		13
3.1.1.1 Efectos del petróleo en el mar		14
3.1.2 Los hidrocarburos en los sedimentos		15
3.1.3 Hidrocarburos alifáticos		15
3.1.3.1 Hidrocarburos alifáticos como indicadores de contaminación		16
3.1.3.2 Isoprenoides		16
3.1.3.3 Propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos alifáticos		17
3.1.3.4 Toxicidad de los hidrocarburos alifáticos		17
3.1.4 Índices referenciales de los hidrocarburos		17
3.1.4.1 Mezcla no resuelta de compuestos ( <i>UCM</i> )		17
3.1.4.2 Índice preferencial del carbono (IPC)		17
3.1.4.3 Índice pristano/fitano (pri/fit)		18
3.1.4.4 Índices n-C17 /pristano, n-C18 /fitano		18
3.2 Área de estudio		18
3.2.1 Oceanografía geológica		19
3.2.2 Clima		20
3.2.3 Hidrología		21
3.2.4 Ecología y productividad biológica		21
3.2.5 Oceanografía física		22
3.2.6 Indicadores químicos		23
3.2.7 Pesca		24
3.2.8 El petróleo en México		24
3.2.9 Tráfico marino y accidentes marítimos		25
<b>4 MATERIALES Y MÉTODO</b>		26
4.1 Análisis en sedimento		27
4.2 Obtención de la muestra		27
4.3 Preservación y transporte de la muestra		27
4.4 Procedimiento experimental		28
4.4.1 Homogeneización, secado y macerado		28
4.4.2 Extracto Soxhlet		28
4.4.3 Preparación del extracto		29

4.5 Interpretación y análisis de resultados	29
4.6 Alcance y campo de aplicación	30
4.7 Control y aseguramiento de calidad	30
4.8 Manejo estadístico	30
<b>5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	32
5.1 Hidrocarburos alifáticos totales (HAT)	32
5.2 Mezcla no resuelta de compuestos (UCM)	33
5.3 Índice preferencial del carbono (IPC)	35
5.4 Índice pristano/fitano (pri/fit)	37
5.5 Índice C17/pristano	38
5.6 Índice C18/fitano	40
5.7 Análisis entre los muestreos	41
5.7.1 Análisis de varianza entre campañas	41
5.7.2 Análisis de varianza entre niveles	42
<b>6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	43
6.1 Conclusiones	43
6.2 Recomendaciones	44
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	45
<b>ANEXO A Propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos alifáticos</b>	51
<b>ANEXO B Figuras de las distribuciones de estaciones por campaña y de las distribuciones de los índices referenciales de los hidrocarburos alifáticos</b>	52

#### DEFINICIONES, SIGLAS Y ACRONIMOS

Bioturbación	
C <sub>17</sub> /pristano	Índice de compuestos alifáticos menores a 17 carbonos/pristano
C <sub>18</sub> /fitano	Índice de compuestos alifáticos menores a 18 carbonos/fitano
Deposicional	
D.O.F.	Diaria oficial de la federación
Ec.	Ecuación
<i>Fuel</i>	Combustible en inglés
HAT	Hidrocarburos alifáticos totales
IPC	Índice preferencial de carbono
<i>MSD</i>	Por sus siglas en inglés, Mode Scan Detector (detector en modo de barrido)
<i>NIST</i>	Por sus siglas en inglés, National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Estándares y Tecnología)
ppb	Partes por billón (µg/kg)
<i>PAH</i>	Por sus siglas en inglés, Polyaromatic hydrocarbons (hidrocarburos poliaromáticos)
pri/fit	Índice pristano/fitano
rpm	Revoluciones por minuto
<i>seston</i>	Water candid particulate matter (Broman et al.,1987)
<i>UCM</i>	Mezcla no resuelta de compuestos

ZEE	Zona Económica Exclusiva	
		<b>Índice de tablas</b>
		<b>Página</b>
Tabla 3.1	Características de los componentes de los derivados del petróleo (Iniasta y Blanco, 2005)	13
Tabla 3.2	Envejecimiento de un vertido de hidrocarburos en la fase inicial de un derrame (Iniasta y Blanco, 2005)	14
Tabla 3.3	La pesca en México (porcentaje de consumo humano y de captura en el litoral del Golfo de México)	24
Tabla 3.4	Producción de crudo por región, miles de barriles diarios (PEMEX, 2007)	24
Tabla 3.5	Incidentes marinos importantes	25
Tabla 4.1	Características de las campañas de muestreo realizadas	26
Tabla 4.2	Límites de detección metodológicos	31
Tabla 5.1	Valores máximo, promedio y mínimo de hidrocarburos alifáticos totales (ppb) en sedimento seco, por año y nivel	32
Tabla 5.2	Suma de cadenas impares y pares, año-nivel	33
Tabla 5.3	Valores máximo, promedio y mínimo de mezcla no resuelta de compuestos ((ppb) en sedimento seco, por año y nivel	33
Tabla 5.4	Datos obtenidos para el índice preferencial de carbono por año y nivel	35
Tabla 5.5	Índice pristano/fitano año-nivel	37
Tabla 5.6	Índice nC17/pristano por año-nivel	39
Tabla 5.7	Índice nC18/fitano por año-nivel	40
Tabla 5.8	Promedios por campaña	41
Tabla 5.9	Prueba de Tukey para campañas	42
Tabla 5.10	Promedio de HAT por nivel durante las cuatro campañas	42
Tabla 5.11	Prueba de Tukey para niveles	42
Tabla 5.12	Prueba de Fischer	42
Tabla 6.1	Límites máximos permisibles (NOM-138-SSA1-2012)	44

<b>Índice de figuras</b>		<b>Página</b>
Figura 3.1	Subprovincias económicas de México ( <a href="http://www.deforest.mx/territorio-maritimo-mexicano/zona-economica-exclusiva.html">http://www.deforest.mx/territorio-maritimo-mexicano/zona-economica-exclusiva.html</a> )	19
Figura 3.2	Las siete provincias del Golfo de México (Antoine, 1972)	20
Figura 3.3	Mapa de las corrientes marinas estacionales en el Golfo de México (Atlas oceanográfico del Golfo de México y Mar Caribe, 1974)	22
Figura 4.1	Estaciones realizadas durante los cruceros oceanográficos SGM 2003-2006	26
Figura 4.2	Procedimiento experimental	28
Figura 4.3	Ejemplo de cromatograma de hidrocarburos alifáticos	29
Figura 5.1	Hidrocarburos alifáticos totales (ppb), nivel-año	32
Figura 5.2	Mezcla no determinada de compuestos (ppb), nivel-año	34
Figura 5.3	Índice preferencial de carbono, año-nivel	35
Figura 5.4	Índice pristano/fitano año-nivel	37
Figura 5.5	Índice nC <sub>17</sub> /pristano por año-nivel	39
Figura 5.6	Índice nC <sub>18</sub> /fitano por año-nivel	40

**NOTA: Esta tesis usa el punto decimal (DOF, 2009)**



## Abstract

Hydrocarbons benchmark indexes were analyzed in 1728 sediment samples that were obtained in 4 oceanographic campaigns (SGM 2003-2006), in the southeastern Gulf of Mexico, in the research vessel Justo Sierra owned by UNAM. These aliphatic hydrocarbons (or lipid) reference indexes were: total aliphatic hydrocarbons (HAT), unresolved compounds mixture (UCM), carbon preference index (CPI), pristane/phytane (pri / fit), n-C<sub>17</sub>/pristane and n-C<sub>18</sub>/ phytane. The first two indexes (HAT, UCM) provide information on contaminated areas; the following two (IPC, pri / fit) provide the source of hydrocarbons in the study area and the last indexes (n-C<sub>17</sub>/pristane, n-C<sub>18</sub>/phytane) provide information about degradation processes of sediments. In evaluations of total aliphatic hydrocarbons during oceanographic campaigns the values were observed in the range of 5 to 7505 ppb, these indices showed predominance of unpolluted areas, areas with influence of biogenic hydrocarbons associated with rivers, lagoons and mangroves. In addition to confirming that high values of both indices (presence of petrogenic hydrocarbons and anthropogenic) they are associated with the oil producing zone (platforms in the southeastern Gulf of Mexico) and in some cases associated with sites associated with "human development". The pri indices / fit (values in the range 39-4840) and CPI (values in the range 351-11906) reported a predominance of petrogenic hydrocarbons (constant contributions associated with natural hydrocarbon emissions, to oil production and operations) and anthropogenic much of the study area. The indexes n-C<sub>17</sub>/pristane (values in the range 592-2441) and n-C<sub>18</sub>/phytane (values in the range 16-4000) indicate that there are large areas in decline (in open areas near the coast and sea) and some others with degraded materials (related to the area of oil production and pollutant-saturated systems). It was found that the variability between campaigns is related to the activities and events that happen over time, and that the contributions of hydrocarbons are constants and variables within the sampling area, mainly depend on the sampling area and previous events the sampling (geohidrometeorológicas conditions, human and productive activities). Variability in depth provides information about existing processes (bacterial and geochemical) degradation in the area to help maintain the ecological balance of the study area also evidence accumulation of anthropogenic hydrocarbons in the lower parts of the sediments. As for the information of different levels obtained it was found that: the first level is influenced by the dynamics and instability of the surface layer, the second and third level has increased activity (to be consolidated sediments) of bacterial and geochemical processes and therefore further degradation. The presence of aliphatic hydrocarbons is the product of the biogenic synthesis of the activities associated with the production of oil and anthropogenic inputs.

**Key words:** Aliphatic hydrocarbons, reference indices, sediments

## RESUMEN

Se analizaron índices referenciales de los hidrocarburos en 1728 muestras de sedimentos, obtenidas en 4 campañas oceanográficas, (SGM 2003-2006), en el Sureste del Golfo de México, a bordo del buque oceanográfico Justo Sierra propiedad de la UNAM. Estos índices referenciales (o lipídicos) de los hidrocarburos alifáticos fueron: hidrocarburos alifáticos totales (HAT), mezcla no resuelta de compuestos (*UCM*), índice preferencial del carbono (IPC), índice pristano/fitano (pri/fit), índice n-C<sub>17</sub>/pristano y n-C<sub>18</sub>/fitano. Los primeros dos índices (HAT, *UCM*) ofrecen información de zonas contaminadas; los siguientes dos (IPC, pri/fit) proveen información del origen de los hidrocarburos en el área de estudio y los últimos índices (n-C<sub>17</sub>/pristano, n-C<sub>18</sub>/fitano) proporcionan información acerca de los procesos de degradación de los sedimentos. En las evaluaciones de los hidrocarburos alifáticos totales durante las campañas oceanográficas se observaron valores dentro del intervalo de concentración de 0.005-7.505 partes por billón, estos índices mostraron predominio de zonas no contaminadas, zonas con influencia de hidrocarburos biogénicos asociadas a ríos, lagunas y manglares. Además, confirmó que los valores altos de ambos índices (presencia de hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos) se encuentran asociados a la zona productiva petrolera (plataformas en el Sureste del Golfo de México) y en algunos casos asociados a sitios asociados al “desarrollo humano”. Los índices pri/fit (valores dentro del intervalo entre 0.039-4.840) e IPC (valores en el rango 0.351-11.906) manifestaron un predominio de hidrocarburos petrogénicos (aportes constantes asociados a las emanaciones naturales de hidrocarburo, a la producción de petróleo y sus operaciones) y antropogénicos en gran parte de la zona estudiada. Los índices n-C<sub>17</sub>/pri (valores dentro del intervalo de 0.592-2.441) y el n-C<sub>18</sub>/fitano (valores en el intervalo 0.016-4.000), indican que hay amplias zonas en proceso de degradación (zonas cercanas a la costa y de mar abierto), y algunas otras con materiales degradados (relacionados a la zona de producción petrolera y con sistemas saturados por contaminantes). Se encontró que la variabilidad entre campañas está relacionada con las actividades y eventos que suceden a través del tiempo. Los aportes de hidrocarburos son constantes. Las variables dentro de la zona de muestreo dependen fundamentalmente de la zona de muestreo y de los eventos anteriores a los muestreos (condiciones geohidrometeorológicas, actividades humanas y productivas). La variabilidad en la profundidad proporciona información acerca de procesos de degradación (bacterianos y geoquímicos) existentes en la zona que contribuyen a mantener el equilibrio ecológico de la zona de estudio. Además, manifiesta la acumulación de hidrocarburos antropogénicos en las partes más bajas de los sedimentos. En cuanto a la información de los diferentes niveles obtenidos se encontró que: el primer nivel está influenciado por la dinámica e inestabilidad de la capa superficial, el segundo y tercer nivel tiene mayor actividad (al ser sedimentos consolidados) de los procesos bacterianos y geoquímicos y, por ende, mayor degradación. La presencia de los hidrocarburos alifáticos es producto de la síntesis biogénica, de las actividades asociadas a la producción de petróleo y de los aportes antropogénicos.

**Palabras clave:** Hidrocarburos alifáticos, índices referenciales, sedimentos

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

A través del tiempo el hombre en busca de mejorar sus condiciones de vida ha actuado de manera tal que ha alterado los ecosistemas que sustentan un delicado equilibrio dinámico natural. A pesar del llamado de la comunidad científica, casi nadie se preocupó por realizar actividades sustentables, sostenibles y ecológicas (planear, hacer, verificar y actuar). Durante mucho tiempo se pensó que el planeta poseía la capacidad degradativa y amortiguadora para superar los desequilibrios causados, hasta que surgieron eventos que evidenciaron lo contrario. En la actualidad es visible el daño en los diversos ecosistemas y su efecto en el ambiente.

El análisis del contenido de hidrocarburos en sedimentos es de gran importancia, ya que es el lugar donde se acumulan diversos materiales y puede revelar los valores básicos anteriores a la iniciación de actividades que generan contaminantes entre los que destacan

- Los derrames de petróleo
- Las infiltraciones naturales
- La contaminación crónica generada por una refinería
- Las precipitaciones atmosféricas a lo largo del tiempo

o como resultado de los hidrocarburos asociados con las partículas que se depositan, como gránulos fecales, organismos muertos o vivos y minerales diversos y a estas partículas se debe, por lo general, la remoción de los hidrocarburos de la columna de agua. Además, los hidrocarburos disueltos pueden ser absorbidos directamente por los sedimentos según su contenido de materia endógena.

Los hidrocarburos se clasifican en dos grupos principales, de cadena abierta (alifáticos) y cíclicos (aromáticos y no aromáticos). Los hidrocarburos alifáticos son compuestos frecuentemente utilizados como disolventes de aceites, grasas, caucho, resinas, en la industria de la obtención y recuperación de aceites, fabricación de pinturas, tintas, pegamentos y adhesivos, así como materia prima de síntesis orgánica.

Los hidrocarburos ingresan al ambiente marino principalmente desde fuentes terrestres y marinas, que van desde emisiones volcánicas, quemas forestales y gases de combustión hasta plantas de tratamiento de aguas residuales, operación y limpieza de transportes marítimos; incluso la industria petrolera genera un riesgo de contaminación ambiental debido a la emisión de humos, polvos, gases, y descargas residuales originadas durante la perforación de pozos petroleros, refinación, producción de petroquímicos, transporte marítimo y submarino, operaciones de embarque y almacenamiento, accidentes en operaciones como rupturas de los oleoductos submarinos, derrames y explosiones de plataformas. Algunos hidrocarburos se evaporan a la atmosfera y se adhieren a partículas sólidas que pueden viajar largas distancias antes de depositarse en fondos de ríos, lagos, mares o suelos. Otro aporte importante son las emisiones naturales de petróleo, que según el Consejo Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, representa el 46% anual de los hidrocarburos que ingresan al ambiente oceánico ([www.itopf.com](http://www.itopf.com)) Las estimaciones de emanaciones de hidrocarburos fósiles al ambiente marino en el suroeste del Golfo de México, fueron de 100 barriles/ día por 1000 m<sup>2</sup>, mientras que en el norte de la misma zona se aporta 0.1 barriles/día por 1000 m<sup>2</sup> (Wilson et al., 1974). Existe, también, el proceso de biosíntesis; organismos del ambiente

marino, que genera cierto número de hidrocarburos (Bedair y Al Saad, 1992). Todo esto hace pensar que el suroeste del Golfo de México es una zona con un alto potencial de emisiones y por ende impactada.

Mucho se desconoce de los procesos fisicoquímicos y biológicos que influyen y afectan a los ecosistemas costeros y marinos. Este trabajo se enfoca a la fracción alifática sus índices referenciales y sus relaciones para la determinación de los posibles orígenes de los hidrocarburos en la zona.

## **CAPÍTULO 2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Relacionar las concentraciones de hidrocarburos alifáticos totales (HAT), obtenidas de muestras de sedimento superficial colectados durante los años 2003, 2004, 2005 y 2006, de la zona sur del Golfo de México, ofreciendo un panorama ambiental de la zona de estudio a partir de índices referenciales de los compuestos mencionados.

### **2.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

- Comparar a través de técnicas estadísticas los datos obtenidos en las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 de los hidrocarburos alifáticos, así como, de sus índices referenciales
- Mostrar en mapas la distribución de los hidrocarburos alifáticos y la distribución de los índices referenciales de las campañas oceanográficas SGM 2003-2006
- Analizar la distribución de las concentraciones de hidrocarburos alifáticos en las campañas oceanográficas SGM 2003-2006
- Discutir sobre el posible origen de los hidrocarburos en la zona de estudio

### **2.3 HIPÓTESIS**

El crudo es la fuente principal de los hidrocarburos en el Sur del Golfo de México. Los procesos de degradación compensan los aportes biogénicos y antropogénicos.

## CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

### 3.1 Los hidrocarburos

Los hidrocarburos son los compuestos orgánicos más simples formados por átomos de carbono e hidrógeno, de gran abundancia en la naturaleza, presentes principalmente en el petróleo (Chapín y Summerlin, 1988; PEMEX, 1988, <http://www.pemex.com/index>). Pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos. Los hidrocarburos, de acuerdo con sus características químicas, se clasifican en dos grupos principales, de cadena abierta (alifáticos) y los cíclicos (aromáticos); de acuerdo con su origen se clasifican en biogénicos y antropogénicos.

#### 3.1.1 El petróleo

El petróleo es una mezcla compleja de compuestos orgánicos de ocurrencia natural, de los cuales los hidrocarburos son los más abundantes llegando a comprender más del 85%. Pueden existir en los tres estados de agregación de la materia y esto depende de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1 Características de los compuestos de los derivados del petróleo (Iniesta y Blanco, 2005)**

Grupo	Subgrupo	Características	Proporción en los combustibles (%)
Saturados	1. Alcanos (hidrocarburos alifáticos): n-alcanos lineales (parafinas); Isoalcanos ramificados. 2. Ciclo alcanos: Anillos saturados 3. Ceras: Compuestos saturados de gran tamaño	Alta degradación microbiana hasta 22 carbonos. Baja solubilidad en agua (excepto <C16) Baja toxicidad	Gasolina: 50-60 Diésel: 65-95 Crudo ligero: 55-90 Crudo pesado: 25-80 <i>Fuel</i> pesado: 20-30
Aromáticos	1. Mono aromáticos: Anillos sencillos de benceno 2. Poli aromáticos: 2-6 anillos de benceno	Baja tasa de degradación Moderada-baja (PAH) solubilidad en agua Alta toxicidad	Gasolina: 25-40 Diésel: 5-25 Crudo ligero: 1-15 Crudo pesado: 5-40 <i>Fuel</i> pesado: 30-50
Compuestos polares	1. Resinas: Contienen S, N u O 2. Asfáltenos: Compuestos de gran tamaño	Muy baja degradación Muy baja solubilidad en agua	Gasolina: 0 Diésel: 0-2 Crudo ligero: 1-15 Crudo pesado: 5-40 <i>Fuel</i> pesado: 10-30

Los productos derivados del petróleo se pueden agrupar en cuatro grandes grupos: gases, carburantes ligeros, carburantes pesados y residuos sólidos o semisólidos. Estos productos se obtienen mediante diferentes procesos físicos y químicos de separación, llevados a cabo en las refinerías. Existen una gran variedad de productos derivados del petróleo, Algunos de estos derivados, son sustancias relativamente puras, pero la mayoría están constituidos por varios hidrocarburos, fundamentalmente hidrocarburos alifáticos y aromáticos. (Tabla 3.2).

### 3.1.1.1 Efectos del petróleo en el mar

El petróleo o sus derivados, tras ser derramados, experimentan una serie de cambios fisicoquímicos que alteran sus propiedades y modifican su composición (envejecimiento). Estos cambios se atribuyen al proceso de intemperización, el cual incluye: evaporación, disolución, dispersión, oxidación, emulsificación, sedimentación y biodegradación. El grado de envejecimiento que puede llegar a sufrir cualquier hidrocarburo depende de muchos factores, tanto propios (composición, origen y características), como ajenos (factores ambientales y biológicos) (Iniesta y Blanco, 2005) (Tabla 3.2).

**Tabla 3.2 Envejecimiento de un vertido de hidrocarburos en la fase inicial de un derrame (Iniesta y Blanco, 2005)**

	Composición inicial			Composición al llegar a la costa		
	Saturados	Aromáticos	Asfáltenos y resinas	Saturados	Aromáticos	Asfaltenos y resinas
Gasolina	50-60 %	25-40 %	0%	0 % (evaporación)	0 % (evaporación)	0%
Diésel	65-95 %	5-25 %	0%	0% (dispersión y disolución)	0% (dispersión y disolución)	0%
Crudo ligero	55-90 %	10-35 %	1-15 %	20-40 % (evaporación y disolución)	5-15 % (evaporación y disolución)	1-15 %
Crudo pesado	25-80 %	15-40 %	5-40 %	20-70 % (evaporación y disolución)	12-35 % (evaporación y disolución)	5-40 %
<i>Fuel</i> pesado	20-30 %	30-50 %	10-30 %	18-30 % (evaporación y disolución)	25-50 % (evaporación y disolución)	10-30 %

El derrame de petróleo y sus derivados es uno de los procesos contaminantes más graves que puede sufrir cualquier ecosistema, incluyendo el océano y la costa; puede causar importantes pérdidas económicas sobre todo en los sectores turísticos y pesquero. Su acción directa desaparece al retirar el hidrocarburo de las zonas afectadas, sin embargo, los efectos sobre los recursos marinos pueden prolongarse durante varios meses o años. El efecto físico más dañino es el recubrimiento de los organismos que entran en contacto directo con la mancha de hidrocarburo, especialmente aves, mamíferos marinos y organismos bentónicos. Estos efectos dependen fundamentalmente de la magnitud del vertido, tipo, localización, duración y características de las especies afectadas. Si los

organismos son susceptibles disminuyen las poblaciones, mientras que si acumulan los hidrocarburos se convierten en una amenaza para sus consumidores (redes tróficas donde el consumidor final es el humano).

Según datos de “The International Tanker Owners Pollution Federation Ltd” ([www.itopf.com](http://www.itopf.com)), la producción mundial de hidrocarburos es de aproximadamente 3 000 millones de toneladas métricas, la mitad de la cual se transporta por mar. Este informe estimó que el valor de aporte total de hidrocarburos al medio marino, tomando en cuenta todas las fuentes, es de aproximadamente 3.2 millones de toneladas métricas al año. Además se calcularon los porcentajes de aportes según las distintas fuentes posibles, siendo la mayor la contribución la que proviene de las fuentes terrestres con un 50%, principalmente como desechos industriales y urbanos; por su parte la exploración y producción aportan un 2% mientras que por accidentes de buques tanques se registra un 5%, por operaciones de embarcaciones 19%, por fuentes naturales 11% y por procesos atmosféricos 13%.

### 3.1.2 Los hidrocarburos en los sedimentos

En zonas contaminadas las concentraciones de hidrocarburos en sedimentos de origen fósil pueden permanecer en el medio, de 3 a 10 años, según la velocidad de degradación de los hidrocarburos y las características del ecosistema pueden ser mayores que las concentraciones de hidrocarburos biogénicos (Guieysse et al., 2004).

El sedimento se comporta como una fuente constante de hidrocarburos, sobre todo de aquellos que no son solubles en agua y no se han perdido por evaporación o disolución en la fase inferior, pues éstos se irán liberando a la columna de agua de manera progresiva.

El tipo de sustrato sobre el que se depositan los hidrocarburos influye en su persistencia y toxicidad. Los sustratos blandos de grano grueso (arena y grava) no retienen hidrocarburos en la superficie. Los sustratos no consolidados de grano fino, donde predominan los limos y arcillas, retienen mucho mejor los hidrocarburos en la superficie, impidiendo su hundimiento. Este tipo de sustrato tiene una gran capacidad de acumulación de hidrocarburos porque su menor granulometría ofrece una mayor superficie de adsorción a los hidrocarburos que, al ser fuertemente hidrófobos, tienen una tendencia natural a adherirse al sedimento, además que la materia orgánica, mayor en este tipo de sedimentos, también favorece la acumulación de hidrocarburos. Los sustratos rocosos son impermeables a los hidrocarburos. Los residuos depositados sobre este tipo de superficie permanecerán sobre ella hasta que la acción de los agentes ambientales y biológicos los degrade o retire.

### 3.1.3 Hidrocarburos alifáticos

Los hidrocarburos alifáticos son compuestos con cadenas de carbono, saturadas o insaturadas. Las moléculas alifáticas consisten, generalmente, de un esqueleto de átomos de carbono y otros átomos unidos a esta, generalmente hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, azufre y haluros. Son hidrocarburos en que los átomos de carbono se unen en cadenas abiertas pudiendo ser lineales o ramificadas. Los hidrocarburos alifáticos forman una fracción importante de los hidrocarburos del petróleo, entre el 10 y el 50% (Pouliceck, 1994).



### 3.1.3.1 Hidrocarburos alifáticos como indicadores de contaminación

La formación de compuestos aromáticos y alifáticos de baja masa molecular se da conforme el tiempo de descomposición de la materia orgánica; estos compuestos pueden ser condensados para dar lugar a sustancias de mayor masa molecular como lo explican Schnitzer y Khan (1978) y Blummer y Youngblood (1975).

Los hidrocarburos biogénicos son sintetizados por casi todas las plantas, animales terrestres y marinos, incluyendo la microbiota, bacterias, plancton marino, diatomeas, algas y plantas superiores (Clark y Blumer, 1967; Bedair y Al-Saad, 1992). La síntesis de este tipo de hidrocarburos está controlada por rutas metabólicas, lo cual trae como resultado mezclas de compuestos de limitada complejidad estructural relacionada directamente con una función biológica específica. Las características de los hidrocarburos biogénicos son:

- Los formados recientemente exhiben un alto nivel de n-alcenos de número impar
- Los aportes por detritus de plantas terrígenas se caracterizan por n-alcenos de número impar en la región de C<sub>21</sub>-C<sub>33</sub>
- Los aportes de origen marino se ven marcados por la presencia de los alcanos C<sub>15</sub>, C<sub>17</sub> y C<sub>19</sub>
- Las contribuciones biogénicas notan el predominio del isoprenoide pristano

Los hidrocarburos alifáticos pueden ser biosintetizados por los organismos o bien, pueden ser ingeridos con el alimento y alterados después de su ingestión. Éstos se degradan con facilidad; sin embargo, el C<sub>27</sub> al ser relativamente resistente a la degradación se transforma en compuestos que se utilizan como indicadores del petróleo intemperizado (Albaigés y Albrecht, 1979; Dastillung y Albrecht, 1979; Boehm et al., 1997).

### 3.1.3.2 Isoprenoides

El pristano y el fitano son terpenoides que se derivan estructuralmente del isopreno (2 metil-1,3 butadieno). El isopreno es el precursor de una gran variedad de moléculas vegetales y animales incluyendo esteroides, terpenos y carotenoides (Dydyck et al., 1978; Tissot y Welte, 1978).

Debido a la semejanza estructural del pristano (2, 4, 10, 14-tetrametil pentadecano) con el fitol y a su presencia en la fracción lipídica de ciertos crustáceos marinos, es posible que esta molécula sea el producto de la conversión de la clorofila ingerida por el zooplancton herbívoro. El pristano se forma por la oxidación y descarboxilación del fitol (Ikan et al., 1975). El pristano es especialmente abundante en los copépodos. La baja reactividad de este compuesto se manifiesta en que pasa inalterado a través de la cadena trófica, ya que se encuentra en el zooplancton carnívoro, tiburones y ballenas (Blummer y Thomas, 1964).

El fitano (2, 6, 10, 14-tetrametil hexadecano) no se presenta en organismos marinos y/o terrestres, por lo que es post-deposicional. Según Welte y Waples (1973), es posible que el fitano se haya producido en ambientes reductores donde la molécula de fitol sufre una deshidratación y reducción. El posible origen biológico del fitano se atribuye a bacterias aerobias y anaerobias, aunque se presenta en cantidades menores a las del pristano. El fitano y pristano son compuestos que se encuentran comúnmente en el petróleo; en los organismos sólo se conoce el pristano que, al parecer, ingresa con el alimento (Padilla, 1989).

### 3.1.3.3 Propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos alifáticos

Es importante conocer las características fisicoquímicas de los contaminantes para determinar su comportamiento en el ambiente (Anexo A, Tabla 1). En general los hidrocarburos son compuestos hidrofóbicos. La mayoría de hidrocarburos son sólidos a 25°C (lo cual no aplica cuando son emitidos por fuentes de combustión). Como sustancias puras, los hidrocarburos existen generalmente como sólidos incoloros, blancos o verdes amarillosos pálidos y tienen un olor leve y agradable. En general son muy poco solubles en agua y, por tanto, se encuentran fundamentalmente en la fracción no soluble asociados a materia orgánica disuelta y particulada. Forman parte de tejidos, coloides y gotas lipídicas formando micelas y pueden ser adsorbidos por partículas de sedimento o en estado sólido (Neff, 2002).

### 3.1.3.4 Toxicidad de los hidrocarburos alifáticos

La toxicidad de compuestos alifáticos para seres humanos es mínima en gases y sólidos, moderada en materiales líquidos. Algunos organismos (*Neurospora crassa*) son protegidos de las radiaciones gamma al ser recubiertos por algunos hidrocarburos alifáticos. Además pueden inhibir el crecimiento de otros organismos (*Bacillus megaterium*). Casi todos estos compuestos son susceptibles a la degradación biológica (Clayton y Clayton, 1981).

### 3.1.4 Índices referenciales de los hidrocarburos alifáticos

Los hidrocarburos alifáticos y sus índices han sido utilizados en estudios de contaminación de hidrocarburos fósiles, para distinguir entre aportes biogénicos y petrogénicos (Calva et al., 2005; Pelletier et al., 1991), además de conocer el estado en el que se encuentra el ambiente.

#### 3.1.4.1 Mezcla no resuelta de compuestos

La determinación de compuestos alifáticos está asociada a otro tipo de compuestos, que pueden ser una amplia gama de compuestos orgánicos y que en ocasiones representan mayores concentraciones que los hidrocarburos alifáticos. Usualmente se asocia este tipo de compuesto a la presencia de hidrocarburos del petróleo. Venkatesan y Kaplan (1982), sugieren que este índice da una idea de degradación bacteriana de la materia orgánica. Además, Farrán et al. (1987) consideran que concentraciones superiores a 4 500 ppb muestran zonas contaminadas por petróleo.

#### 3.1.4.2 Índice preferencial del carbono (IPC)

El Índice Preferencial de Carbono (IPC) se obtiene a partir de la evaluación de varios hidrocarburos de cadena larga (Broman et al., 1987):

$$IPC = \frac{2(C_{27} + C_{29})}{C_{26} + 2C_{28} + C_{30}} \left( \frac{\text{Biogénicos}}{\text{Antropogénicos}} \right) \quad \text{Ec. (3.1)}$$

Permite obtener un diagnóstico del enriquecimiento de las cadenas impares de carbono sobre las cadenas pares en el rango de 20 a 32 carbonos, además de diferenciar el origen de los hidrocarburos

que reciben los sedimentos. Esto señala las características químicas de los hidrocarburos alifáticos totales, con base en el acomodo de los carbonos entre su estructura molecular.

Cuando este índice (IPC) presenta valores que oscilan entre 3.0-6.0, el origen de los hidrocarburos es biogénico y en consecuencia se trata de un ambiente no contaminado (Colombo *et al.*, 1989). Commendatore y Esteves (2004) señalan que en ambientes donde los niveles de IPC van de 0.25 hasta 53.93 y con una media de 16.9, los hidrocarburos están asociados a ambientes no contaminados, los cuales son generados por las plantas vasculares y en consecuencia el aporte antropogénico es escaso. Cuando se encuentran valores aproximados a 1 son indicativos de hidrocarburos de origen antropogénicos (González, 1990).

#### 3.1.4.3 Índice pristano/fitano (pri/fit)

Este índice engloba a las especies de hidrocarburos que son fácilmente detectables. Es la relación entre un compuesto de origen biogénico (pristano) y otro derivado del petróleo (fitano). Además, evalúa si los hidrocarburos son de origen biogénico o no. Broman *et al.* (1987) proponen que los valores cercanos a 1 ppb (1,000 µg/kg) corresponden a hidrocarburos del petróleo y señalan que valores de 0.56 a 1.06 ppb (560 a 1,060 µg/kg) muestran que los hidrocarburos son de origen antropogénico y, según Lecaros *et al.* (1991), valores desde 1.4 hasta 6.7 indican hidrocarburos de origen biogénico.

#### 3.1.4.4 Índices (n-C<sub>17</sub>/pri), (n-C<sub>18</sub>/fit)

Estos índices evalúan la presencia del petróleo y la biodegradación de los n-alcanos. Cuando los valores son bajos indican la presencia de hidrocarburos degradados, mientras que los valores altos corresponden a una baja degradación (Commendatore y Esteves, 2004).

De acuerdo con el criterio de Commendatore y Esteves (2004), un valor global para n-C<sub>17</sub>/pri de 1.1 en sedimentos estuarinos indican procesos degradativos de los hidrocarburos, mientras que valores promedio de 25-56 señalan escasa degradación. Además señalan que para un valor global del índice n-C<sub>18</sub>/fit de 0.8 para los sedimentos estuarinos indican un proceso degradativo de los hidrocarburos.

### 3.2 ÁREA DE ESTUDIO

México al igual que otros países cuenta con una Zona Económica Exclusiva (ZEE) que denomina a la porción de 200 millas náuticas (370.4 km) hacia el océano, a partir de la línea costera, que define el nivel medio del mar de la zona litoral (LFM; Título segundo, art. 25). Cuando esta extensión se traslapa con la de otros países, la delimitación de las respectivas zonas se hace de común acuerdo entre los afectados. México cuenta con 2 946 825 km<sup>2</sup> de superficie marina, en la que ejerce libre soberanía para explorar, explotar y administrar los recursos vivos y no vivos de los fondos marinos, incluidos los del subsuelo y del agua suprayacente (artículo 27, CPEE.UU.MM.). También se reserva el derecho exclusivo y de jurisdicción para islas arrecifales, establecer estructuras artificiales (plataformas petroleras) e implementar el desarrollo de actividades científicas, además de preservar el medio marino y eliminar los agentes contaminantes de esta zona (LFM). Con base en estas reglas jurídicas, México tiene la posibilidad de explorar, inventariar y explotar en forma racional los recursos vivos y no vivos del mar, a lo largo y ancho de más de 10 000 km de extensión y 500 000 km<sup>2</sup> de superficie en la plataforma continental, lo que representa un poco más del 20% de

su ZEE, área de potencial económico que se extiende de la línea de costa hasta la profundidad de 200 metros.

La ZEE se divide en seis subprovincias, tomando como base la situación geográfica de cada una de ellas, así como las características geológicas, climatológicas, biológicas e hidrológicas de dichas zonas (Figura 3.1).

I. Baja California- Pacífico

II. Golfo de California

III. Región panámica del Océano Pacífico

IV. Suroeste del Golfo de México

V. Banco de Campeche

VI. Caribe Mexicano

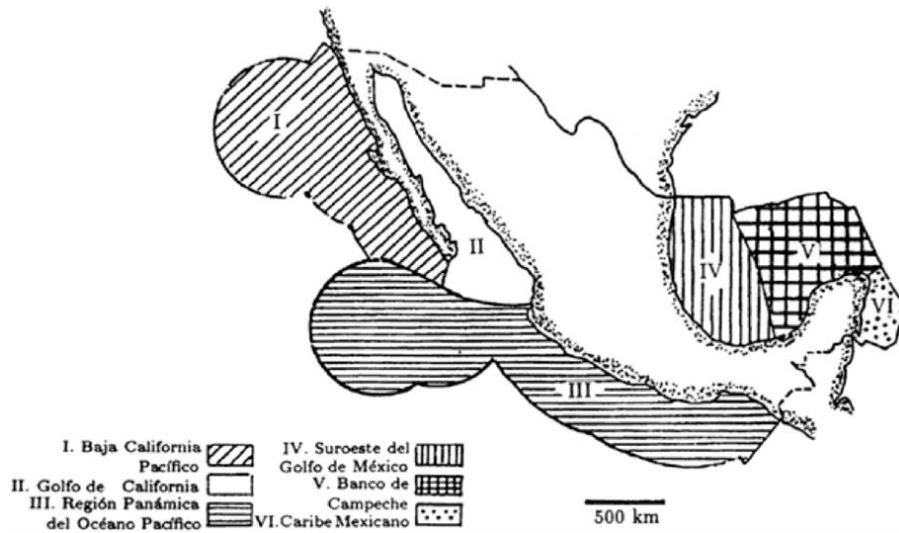


Figura 3.1 Subprovincias económicas de México (<http://www.deforest.mx/territorio-maritimo-mexicano/zona-economica-exclusiva.html>)

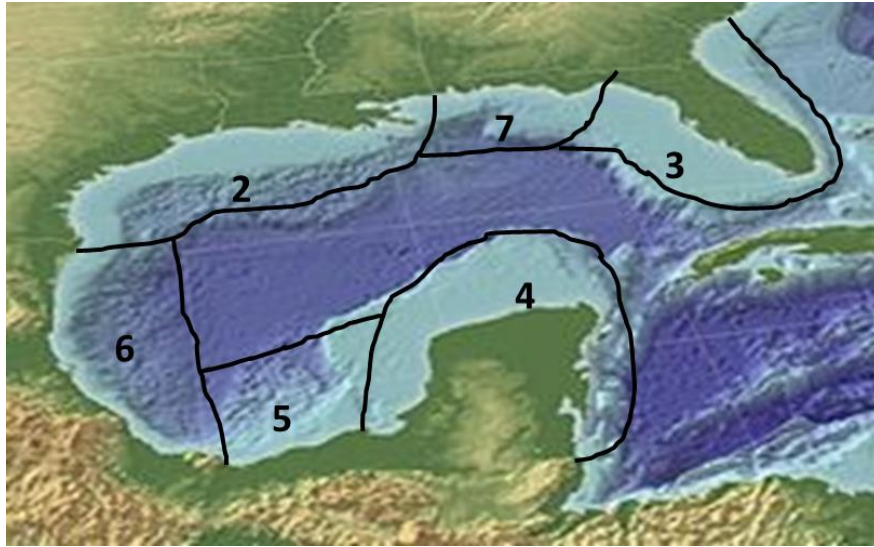
### 3.2.1 Oceanografía geológica

Existen teorías diversas del origen de la zona del Golfo de México y a pesar de la aceptación de la tectónica de placas, no explica en su totalidad su origen. Los datos de anomalías magnéticas sugieren que la apertura del Golfo de México sucedió hace 165 millones de años (Sclater et al., 1977).

El Golfo de México es una cuenca oceánica semicerrada que tiene un área de aproximadamente 2 millones de km<sup>2</sup>, un volumen de 20 millones de km<sup>3</sup> y su dimensión E-O es de alrededor de 1 600 km. En su parte occidental tiene una extensión N-S de 1 300 km, y entre Yucatán y Florida mide aproximadamente 900 km. La profundidad promedio es de aproximadamente 1 615 m (Caso et al., 2004) y en algunas regiones, la profundidad supera los 3 400 m.

La distribución de los sedimentos que constituyen el piso del Golfo de México, tipo y origen, está relacionada con las características de la cuenca. Antoine (1972) propone siete provincias (Figura 3.2):

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1. Cuenca del Golfo de México                 | 2. Noreste del Golfo de México        |
| 3. Sur de la Florida y plataforma continental | 4. Banco de Campeche                  |
| 5. Bahía de Campeche                          | 6. Este de México y talud continental |
| 7. Norte del Golfo de México                  |                                       |



**Figura 3.2 Las siete provincias del Golfo de México (Antoine, 1972)**

En este estudio se consideran las provincias 4 y 5. En ambas provincias existen sedimentos carbonatados de origen biogénico y con influencia de sedimentos ricos en materia orgánica.

### 3.2.2 Clima

La zona de estudio presenta clima cálido húmedo con lluvias abundantes en verano y una precipitación anual extrema de hasta 4 500 mm en la tierras bajas. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 21.1 y 29.7°C de acuerdo con datos obtenidos en el Servicio Meteorológico Nacional, y la precipitación anual varía entre los 1 100 y 2 000 mm (Cuesta y García, 2002). La variación media es de 6°C. El valor más alto de temperatura se registra en junio y el más bajo para el mes de enero. Los valores extremos registrados en la zona son: 41.5°C como máxima y 11.8°C la mínima. La zona de estudio presenta tres zonas bien definidas: (1) lluvias de junio a septiembre, (2) nortes de octubre a febrero y (3) secas de febrero a mayo. Durante todo el año soplan vientos del N, con variación en los meses de mayo-agosto, los cuales provienen de NE y S. En invierno, la dirección de los vientos se presenta hacia el E, con ligera tendencia hacia el S y mayor hacia el N. El promedio de velocidad del viento varía de 11 a 14.8 hm/h. En el Golfo de México se observan variaciones térmicas verticales espaciales y temporales, resultado de la formación de giros ciclónicos (fríos) y anticiclónicos (calientes); estos últimos debido al estrangulamiento de la Corriente del Lazo (De-la-Lanza-Espino, 1991).

### 3.2.3 Hidrología

El carácter hidrográfico de la zona está afectada por las corrientes litorales, la fisiografía costera, y el aporte de las aguas epicontinentales y estuarinas presentes en la zona. Todos estos sistemas son susceptibles a la contaminación.

El Golfo de México en su parte oeste y sur, recibe la esorrentía de los Ríos: Panuco, Nautla, Papaloapan, Coatzacoalcos, Tonalá, Grijalva, Usumacinta, Champotón y de la Laguna de Términos. Los principales ríos por su escurrimiento medio anual, en miles de millones de m<sup>3</sup>, son: Usumacinta (56); Papaloapan (47); Grijalva (25); Coatzacoalcos (22); Balsas (14.5); Bravo (13); Panuco (12); Hondo (11); Lerma-Santiago (8.5); Tecolutla (5.5); y Fuente (5). Los cuatro principales ríos llevan al Golfo de México un total de 2.2 m<sup>3</sup>/s de agua. El Usumacinta contribuye con 900 m<sup>3</sup>/seg, el Grijalva 700 m<sup>3</sup>/seg, el Coatzacoalcos 400 m<sup>3</sup>/seg y el Papaloapan con 200 m<sup>3</sup>/seg (INEGI, 2005).

### 3.2.4 Ecología y productividad biológica

Los principales ambientes ecológicos de la zona costera son: manglares, arrecifes de ostión, pastos marinos y plataforma adyacente con algunos arrecifes coralinos.

El fitoplancton, constituye el primer eslabón de la cadena alimenticia y es responsable, en forma directa, de la productividad primaria. Su nivel de presencia en el mar puede servir como indicador de variaciones anormales en el medio. En el Golfo de México, existen dos grandes e importantes zonas para la productividad primaria. La primera abarca la parte Sur, principalmente la Sonda de Campeche, la segunda comprende el Noroeste del Golfo de México entre los ríos Bravo y Mississippi. Las variaciones estacionales determinadas sobre la densidad de organismos que durante el invierno y la primavera se registra la mayor abundancia de fitoplancton, especialmente en áreas costeras.

La productividad de la zona lagunar-estuarina adyacente a la Sonda de Campeche varía en un intervalo de concentración de clorofila a de 0.3-8.2 mg/m<sup>3</sup>. En la zona marina se encuentran concentraciones más bajas que van de 0.53-0.86 mg de clorofila a/m<sup>3</sup>. Estas características de producción primaria de la zona contrastan con los valores del océano abierto. Por ejemplo, para el Golfo de México los valores de productividad primaria son en general bajos con un valor medio de 0.1 g de clorofila /m<sup>2</sup>/día y son valores típicos para regiones tropicales (Margalef y Estrada, 1980). En relación con los datos de clorofila a, El Sayed et al. (1972), indican un valor promedio para el Golfo de México de 0.2 mg de clorofila a/m<sup>3</sup>, y enfatizan que el valor más alto para la costa de México se localiza en el área de Veracruz-Tabasco con un valor de 2.35 mg de clorofila a/m<sup>3</sup>. Licea y Santoyo (1991) consideran que los valores de biomasa fitoplanctónica más altos se encuentran en la zona costera, en especial en áreas de influencia fluvial; el intervalo que reportan consideran valores promedio de 0.5 mg de clorofila a/m<sup>3</sup> en épocas de secas; agrega que la zona oceánica adyacente presenta valores promedio de 0.05 mg de clorofila a/m<sup>3</sup> sin fuertes cambios a través del año. Las amplias diferencias en concentración de clorofila pueden ser debidas no solamente a la estacionalidad fitoplanctónica, sino también a los aspectos metodológicos.

### 3.2.5 Oceanografía física

Las masas de agua del Golfo de México han sido objeto de estudio desde 1932, Parr (1935) realizó el primer estudio extensivo en el Golfo empleando ilustraciones de temperatura-salinidad, las cuales hasta la fecha han facilitado el análisis e identificación de sistemas complejos de corrientes y masas de agua (Figura 3.3).

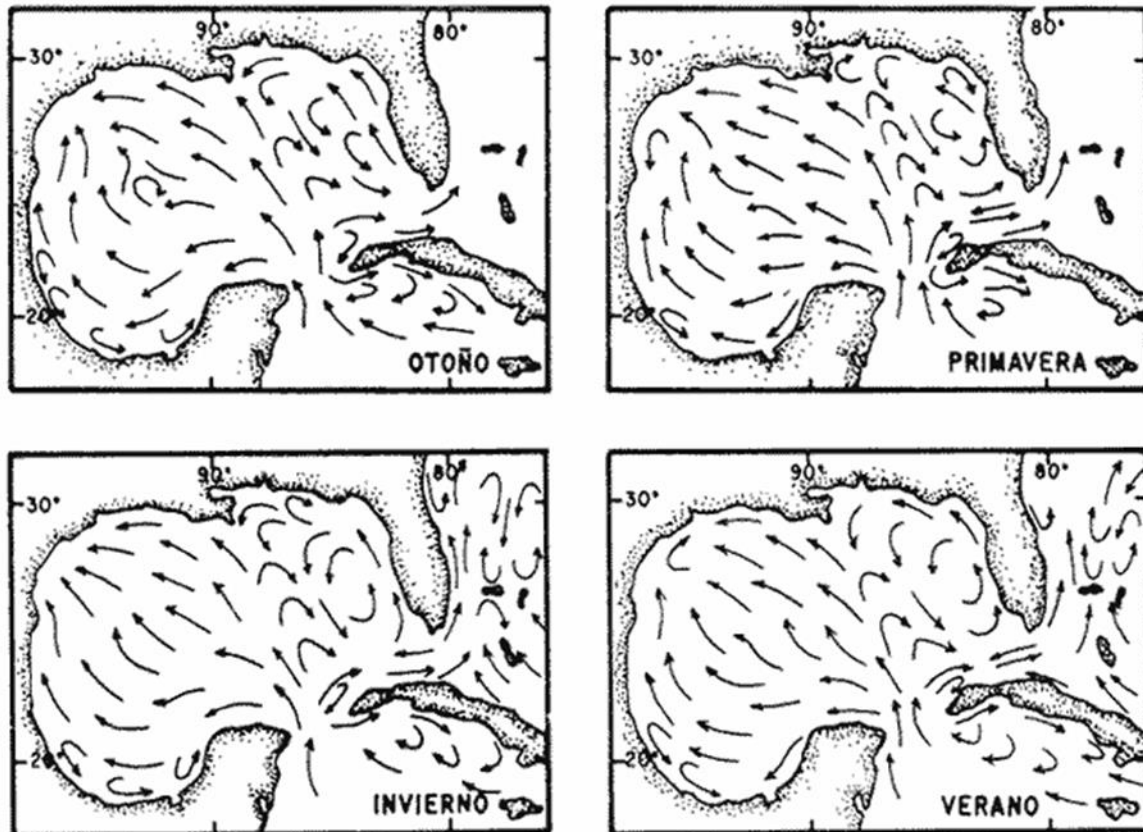


Figura 3.3 Mapa de las corrientes marinas estacionales en el Golfo de México (Atlas Oceanográficos del Golfo de México y Mar Caribe, 1974)

Se observó la presencia de dos masas de agua, una que caracterizaba al Caribe y otra propia del Golfo. La circulación del Golfo de México está relacionada con la influencia de las aguas cálidas y salinas que entran a través del estrecho de Yucatán y salen por el estrecho de Florida. Parte de esta agua se devuelve por contracorrientes (Cuesta y García, 2002).

En el Golfo de México la temperatura está determinada por el influjo de las aguas cálidas de la Corriente del Lazo, que se introduce por el Canal de Yucatán y la zona del Caribe, cuya dinámica afecta aproximadamente al 50% del Golfo de México donde, además, la evaporación supera la precipitación (Biggs, 1992). Se caracteriza por tener una temperatura superficial de 28 a 29°C, durante el verano, con un incremento en las aguas superficiales de Noreste-Sureste, debido a la intromisión de la Corriente del Lazo, en invierno disminuye hasta los 19 o 20°C, ya que los vientos

fríos provenientes del norte ponen resistencia a las aguas cálidas procedentes del Sureste, las cuales, en su trayectoria hacia el Noroeste del Golfo de México, van transmitiendo su calor a las aguas de menor temperatura (Nowlin y McLellan, 1967). Müller et al (1991) señalan que la temperatura superficial de las regiones Oeste y Este del Golfo de México, de julio a septiembre, tienen una temperatura mayor a 29°C, pero de diciembre a abril la región Oeste tiene aproximadamente 4°C menos que la región Este. Debido a que las aguas de la región Oeste están más alejadas de la influencia de la Corriente del Lazo, sus temperaturas mínima y máxima se mantienen durante largos periodos en comparación a las del Este, que tienen una menor duración, por la continua intromisión de las aguas cálidas del Caribe que entran al Golfo de México vía la Corriente del Lazo.

Al igual que la temperatura, la distribución de la salinidad está fuertemente relacionada con la Corriente del Lazo, la cual tiene una salinidad mayor a 36.8 por arriba de los 200 m, como resultado del predominio de la evaporación sobre la precipitación en la región del Caribe (Biggs, 1992). Las salinidades en invierno son menores en el Golfo de México con 32.16, debido a la época y a la influencia de los ríos (Nowlin y McLellan, 1967).

### 3.2.6 Indicadores químicos

El oxígeno disuelto superficial de las aguas del Caribe Mexicano es homogéneo en el transcurso del año, manteniendo niveles de 4 a 5 mL/L con un máximo a los 50 m de profundidad de 6.1 mL/L y a los 200 m de 3.2 mL/L (Dela Lanza-Espino, 1991). Debido a que esta agua conforma la Corriente del Lazo, que representa más del 50% del agua que entra al Golfo de México, el contenido de oxígeno en el Golfo de México es uniforme en la capa superficial de mezcla de 0 a 150-250 m de profundidad, con 4.5 mL/L; como se observa en la plataforma de Campeche, Veracruz y el Caribe. Otra característica importante del Golfo de México es la presencia de la capa mínima de oxígeno a una profundidad entre los 200 y 600 m aproximadamente, con una concentración de 2 mL/L al noroeste y a una profundidad de 600 m en la Corriente de Lazo menor a 3 mL/L (Morrison y Nowlin, 1977). Esta capa mínima de oxígeno se observa también en aguas propias del Golfo de México (Nowlin, 1971; El-Sayed et al., 1972). Dicha capa está en función de los factores climáticos y su grosor depende de las características locales de circulación, ya que asciende en los giros ciclónicos y desciende en los giros anticiclónicos y se origina en el mar Caribe por la masa de agua central del Atlántico tropical, dada su similitud en el contenido de oxígeno (Vidal et al., 1990).

Es difícil precisar concentraciones específicas, dado que los nutrientes son “no conservativos” y su contenido depende de la asimilación fitoplanctónica y su temporalidad. En general, se observa que la distribución espacial de los nutrientes disueltos en el Golfo de México está determinada por el campo de circulación barométrica. La vorticidad de los giros y su interacción acoplada generan un sistema natural de bombeo dentro del Golfo de México, pues transfieren movimientos verticales ascendentes y descendentes de las masas de agua que se ubican dentro de sus zonas de influencia (Vidal et al., 1990). Se debe aclarar que su variación temporal y espacial depende en buena medida de la asimilación fitoplanctónica y sus florecimientos.

La materia orgánica forma parte del material suspendido, la fracción inorgánica está formada por material arcilloso. Los sólidos suspendidos totales y el material orgánico son muy abundantes encontrándose valores de hasta 54.6% en aguas de la plataforma continental y 49.5% en aguas



superficiales en mar abierto (Harris, 1972). Los niveles lipídicos más altos se han observado en áreas cercanas a la costa y aún mayores en costas donde se realizaron operaciones petroleras.

### 3.2.7 Pesca

En el litoral del Golfo de México aproximadamente 140 000 habitantes están involucrados en la pesca (INEGI, 2005).

Las aguas del Golfo de México, por su geomorfología, se encuentran en condiciones productivas. La actividad pesquera en el país es intensa (Carta Nacional Pesquera, 2006; Anuario estadístico de acuicultura y pesca, 2006; Tabla 3.4).

**Tabla 3.3 La pesca en México, % de consumo humano y de captura en el litoral del Golfo de México (Anuario estadístico de pesca, 2006)**

Año	Masa viva (Ton)*	% del total para consumo humano	% de total que se captura en el litoral del Golfo de México
2001	1 520 938	96.80	20.62
2002	1 554 452	98.05	18.10
2003	1 564 966	88.84	18.89
2004	1 483 220	97.48	20.24
2005	1 458 197	99.59	18.66
2006	1 531 524	99.60	17.29

\*En la tabla original dice peso, pero peso y masa no son sinónimos

### 3.2.8 El petróleo en México

En los últimos años se ha intensificado la explotación petrolera en México (Tabla 3.4). Para México, PEMEX aporta aproximadamente el 35% del total de los ingresos financieros recaudados por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Al cierre de 2007 PEMEX pagó impuestos por 676 278 millones de pesos (Cuenta Pública Federal, SHCP, 2007).

**Tabla 3.4 Producción de crudo por región, miles de barriles diarios (Anuario estadístico de PEMEX, 2007)**

Año	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Región marina noroeste	1 985.8	2 151.6	2 416.3	2 440.8	2 357.0	2 204.7
Región marina suroeste	554	452.2	397.6	388.2	396.3	475.1
Región sur	508.7	498.4	483.3	472.7	496.6	491.3
Región norte	78.5	74.9	73.6	81.2	83.5	84.5
Total	3 127	3 177.1	3 370.9	3 382.9	3 333.3	3 255.6

En México la producción de energía primaria consistió principalmente en hidrocarburos, los cuales aportaron el 89.4% de este rubro (Balance Nacional de Energía, 2005). La zona marino-costera mexicana del Golfo de México es una de las mayores cuencas de hidrocarburos a nivel mundial con una producción a 3 millones de barriles diarios (Tabla 3.4).

### 3.2.9 Tráfico marino y accidentes marítimos

El tráfico marítimo en el Golfo de México es muy intenso. En la zona existen registradas 34 569 embarcaciones de diverso tamaño (lanchas, cayucos, pangas y barcos) (INEGI, 2003). Son 21 los puertos importantes construidos en la zona, que reciben aproximadamente 7 533 buques de carga y 1 845 cruceros de pasajeros por año (Anuario Estadístico de los Puertos de México, 2004).

El Golfo de México se encuentra en la cuenca del Gran Caribe y dicha cuenca se considera una de las zonas de mayor densidad de líneas de transporte de hidrocarburos en el mundo. Además, está sujeta a un intenso tráfico de buques petroleros que movilizan más de 5 millones de barriles diarios y donde vierten más de 7 millones de barriles al año por lavado de tanques, los mismos que ejercen una presión ambiental en los principales ríos, lagunas costeras y estuarios de la zona (Botello et al., 1997).

Toda industria existente conlleva desastres, causados por negligencia, descuido, eventos naturales y/o mala planeación entre otros. La industria del petróleo no es ajena a estos incidentes (Tabla 3.5).

**Tabla 3.5 Incidentes marinos importantes (1967-2005) (Tabla propia)**

Evento/País afectado	Año	Volumen	Consecuencias
Buque: Torrey Canyon. Arrecife Stevens Stones	1967	120 000 toneladas de crudo derramado	Mancha de hidrocarburo de 70 km de largo, 40 km de ancho. Más de 20000 aves muertas
Buque: Metula. Estrecho de Magallanes. Chile	1974	53 000 toneladas de crudo derramado	Desconocidas
Buque: Urquiola. Coruña, España.	1976	100 000 toneladas de crudo derramado	Desconocidas
Buque: Amoco Cadíz. Costa francesa de Bretaña	1978	200 000 toneladas de crudo derramado	Primer caso donde se fincan responsabilidades legales
Pozo Ixtoc 1. Sonda Campeche, México	1979	530 000 toneladas de crudo derramado	Desconocidas
Buque: Exxon Valdez. Alaska, USA.	1989	41 600 toneladas de crudo derramado	Desconocidas
Buque: Mar Egeo. Coruña, España.	1992	80 000 toneladas de crudo derramado	Desconocidas
Buque: Prestige, España	2002	77 000 toneladas de crudo derramado	Desconocidas

## CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se consideraron 4 muestreos en el sur del Golfo de México (SGM 2003-2006). El número de estaciones (Figuras B1-B4) de cada muestreo es variable así como las temporadas de muestreo (Figura 4.1, Tabla 4.1). Se analizaron 3 niveles de sedimento (1cm, 5 cm, 10 cm).

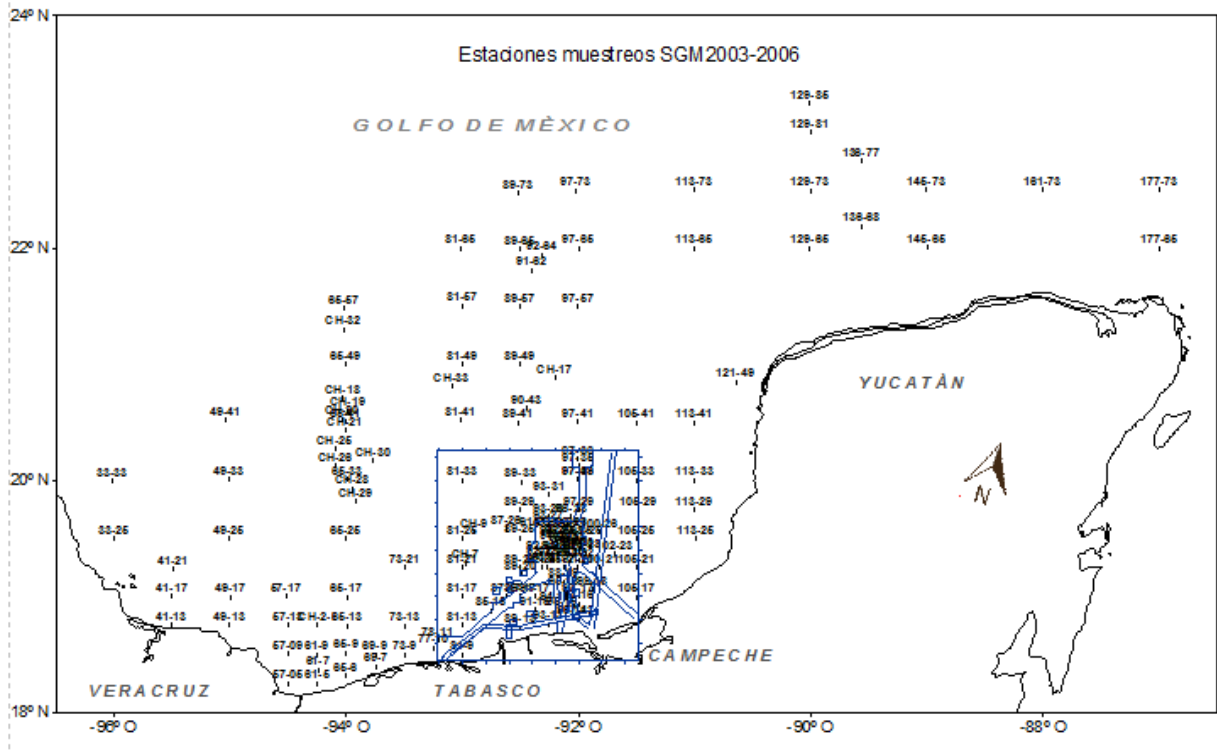


Figura 4.1 Estaciones realizadas durante los cruceros oceanográficos SGM 2003-2006

Tabla 4.1 Características de las campañas de muestreo realizadas

Campaña oceanográfica	Temporada/año de muestreo	Fechas de realización		Estaciones	# Niveles (1, 5, 10 cm)
SGM-2003	Lluvias/2003	09/09/2003-08/10/2003		112	3
SGM-2004	Secas/2004	11/05/2004-06/06/2004		127	3
SGM-2005	Nortes/2005	1a parte	15/11/2005 04/12/2005	145	3
		2a parte	07/12/2005 19/12/2005		
		3a parte	27/01/2006 06/02/2006		
SGM-2006	Secas/2006	18/05/2006-26/06/2005		192	3

#### 4.1 Análisis en sedimentos

Los análisis de sedimentos por sus características presentan ventajas y desventajas siendo las siguientes las más importantes:

##### Ventajas

- Concentran contaminantes por periodos más largos que algunos organismos
- Son estacionarios y más fáciles de analizar que los organismos
- Representan el hábitat de muchos organismos
- Son la principal base de cadenas tróficas en los ecosistemas marinos
- Son fáciles de obtener y en muchos casos, repetir en aquellas zonas donde exista una tendencia de incremento o persistencia de contaminantes
- Dan información precisa sobre áreas pequeñas y su distribución regional

##### Desventajas

- Los niveles reales o potenciales de contaminantes en sedimentos son algunas veces el producto de una compleja interacción y transformación antes de que el contaminante esté incorporado en ellos
- En algunas áreas, la erosión y sedimentación alternada da como resultado un registro geológico fragmentado. En áreas de baja sedimentación, la bioturbación puede alterar la historia de deposición de los contaminantes
- Los sedimentos usualmente no concentran contaminantes en el mismo grado que lo hacen los organismos, lo cual dificulta la detección de aportes antropogénicos a cierta distancia del origen del aporte

#### 4.2 Obtención de la muestra

La obtención de muestras de sedimento marino se realizó a bordo del B/O “Justo Sierra”, considerando que:

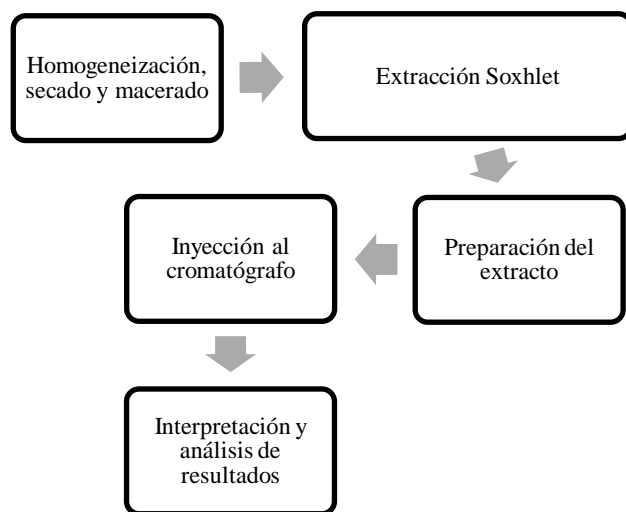
- Los sedimentos se colectaron haciendo uso de un nucleador de caja.
- En cada estación se lanzó dicho equipo en las coordenadas preestablecidas y se obtuvieron 3 tomas de sedimento en niveles diferentes. La primera de 0-1 cm de profundidad, la segunda de 4-5 cm y la tercera de 8-10 cm.
- Cada colecta se realizó con una espátula de metal, en frascos de vidrio, de aproximadamente 1 kg de sedimento.

#### 4.3 Preservación y transporte de la muestra

Los sedimentos se guardaron en frascos de vidrio, los cuales fueron previamente lavados con solución de extrán y mezcla crómica para después enjuagarlos con agua destilada, acetona y cloruro de metileno. Posteriormente a la obtención del sedimento, las muestras se mantuvieron a una temperatura de 4°C hasta su análisis en laboratorio.

#### 4.4 Procedimiento experimental

La Figura 4.2 presenta el diagrama de bloques de la fase experimental.



**Figura 4.2 Procedimiento experimental**

##### 4.4.1 Homogeneización, secado y macerado

El procedimiento se llevó a cabo como sigue:

1. Se vació cada muestra de sedimento en una charola de aluminio y se mezcló con una pala de metal hasta su homogeneización
2. Se colocó el sedimento dentro de una cámara de secado a 40°C.
3. Una vez seca se maceró, con la ayuda de un mortero de porcelana.

##### 4.4.2 Extracción Soxhlet

La extracción Soxhlet se realizó de la siguiente manera:

1. Se pesaron 50 g de cada una de las muestras de sedimento, homogéneo, seco y macerado; y se depositaron en cartuchos de celulosa.
2. Se encendió el baño recirculador, programado a la temperatura de 6 a 10°C para que funcionara como sistema de enfriamiento.
3. Se prepararon en la campana de extracción 200 mL de mezcla de solventes (hexano: cloruro de metileno 1:1) y se vertieron en un matraz bola, el cual fue etiquetado con los datos de la muestra.
4. Se depositó el cartucho con la muestra en el interior del matraz condensador, el cual se acopló al matraz de bola y se colocó en la parrilla de calentamiento a una temperatura de 45°C durante ocho horas.
5. Se desacopló y vertió el solvente contenido en el matraz condensador al matraz bola, se colocó a este matraz una tapa de aluminio para prevenir contaminación.

#### 4.4.3 Preparación del extracto

La preparación del extracto se realizó en varias fases:

1. Se concentró el extracto hasta que se alcanzó un volumen de 5 mL en el sistema de evaporación que consta de: rotavapor (rango de 100 rpm), bomba de vacío, baño térmico (rango de temperatura de 40-45°C), y sistema de enfriamiento (temperatura controlada de 8-10°C).
2. Una vez concentrado, se retiró la muestra y se dejó que el extracto alcanzara la temperatura ambiente, se le colocó una tapa de aluminio para preservar la muestra.
3. Se preparó la columna de purificación. Se ensambló con su llave y empaques respectivos. Se cerró la llave y se agregaron 50 mL de hexano. Se pesaron y adicionaron a la columna: 7.5 g de gel de sílice, 5 g de alúmina, 1 g de sulfato de sodio anhidro y 10 g de cobre metálico granular. Se colocó un matraz bola para recibir el exceso de hexano. Se abrió la llave hasta que el nivel del líquido alcanzó 2 mL por arriba del cobre.
4. Se realizó la purificación del extracto de hidrocarburos proveniente de la extracción Soxhlet en la columna de separación. Se vertió el extracto obtenido de la evaporación en la columna de purificación. Se enjuagaron las paredes internas del matraz que contenía el extracto, utilizando 5 mL de hexano con ayuda de una pipeta Pasteur y se vertió en la columna, se repitió el procedimiento dos veces, recuperando en cada enjuague el extracto purificado. Se evaporó la fracción obtenida y se transfirió a un vial de 2 mL, el cual se tapó con septa PTFE y se selló con engargoladora manual.

#### 4.5 Interpretación y análisis de resultados

La determinación analítica se realizó por medio de cromatografía de gases, en un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas Agilent con inyector automático y cuadrupolo con impacto electrónico de ionización química negativa. La determinación de compuestos y sus concentraciones en cada cromatograma fue hecha con el software del equipo Agilent (Figura 4.3 Ejemplo de cromatograma de hidrocarburos alifáticos).

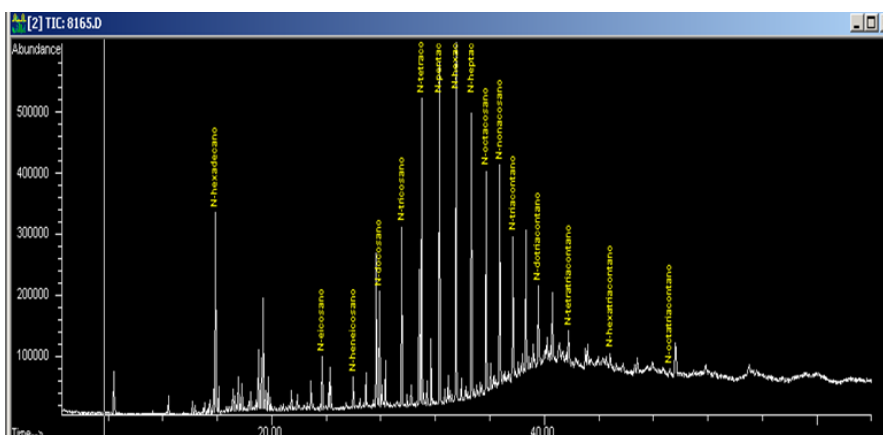


Figura 4.3 Ejemplo de cromatograma de hidrocarburos alifáticos

Las especificaciones de operación de la columna fueron:

Columna Agilent HP-5 MS de 30 m de longitud x 0.25 mm de diámetro x 0.25  $\mu\text{m}$ .

Se inyectó 1  $\mu\text{L}$  en modo *splitless* con un flujo constante (1.2 mL/min) de helio 4.6 como gas acarreador y el detector MSD en modo *scan* (de barrido).

#### 4.6 Alcance y campo de aplicación

La presente técnica se usó para la determinación de los hidrocarburos alifáticos en sedimentos marinos.

#### 4.7 Control y aseguramiento de la calidad

Durante el estudio se siguieron los lineamientos de los manuales de calidad internos (LFQM/PT/CG/001) para la selección de materiales del muestreo, el muestreo, el transporte y la preservación de las muestras y su análisis.

El límite de detección instrumental se calculó como 3 veces el ruido electrónico. Y el límite de detección metodológico (Tabla 4.2) se calculó como 3 veces el límite de detección instrumental

Se inyectó una mezcla de estándares de referencia *NIST* a diferentes concentraciones para obtener curvas de calibración. Además, se repitió la inyección de muestras aleatoriamente para corroborar los resultados obtenidos y tener un control de calidad sobre los muestreos. La mezcla inyectada fue procesada de la misma forma que las muestras problema para obtener los porcentajes de recuperación.

#### 4.8 Manejo estadístico

Considerando el número de variables en el estudio se tomó la decisión de realizar estadística descriptiva. Para analizar si existe la diferencia significativa entre las medias de los índices por niveles y campañas se usaron métodos de comparación de medias (Tukey y Fischer) con la ayuda del software Minitab 17.

Para el análisis comparativo de los datos y uso de estadística paramétrica se requirieron datos que cumplieran con los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

**Tabla 4.2 Límites de detección metodológico**

	Límite de detección metodológico (ppb)
N-decano	4.817
N-dodecano	8.517
N-tetradecano	0.204
N-pentadecano	0.080
N-hexadecano	0.070
N-heptadecano	0.044
Pristano	0.069
N-octadecano	0.100
Fitano	0.056
N-nonadecano	0.046
N-eicosano	0.048
N-heneicosano	0.046
N-docosano	0.047
N-tricosano	0.012
N-tetradecano	0.055
N-pentadecano	0.055
N-hexadecano	0.051
N-heptadecano	0.051
N-octacosano	0.085
N-nonacosano	0.047
N-triacontano	0.042
N-dotriacontano	0.036
N-tetratriacontano	0.027
N-hexatriacontano	0.058
N-octatriacontano	0.129
N-tetracontano	0.127



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Hidrocarburos alifáticos totales (HAT)

Se analizaron 1728 muestras de los tres niveles de muestreo, durante los cuatro años que abarcó el estudio y se obtuvieron los siguientes resultados:

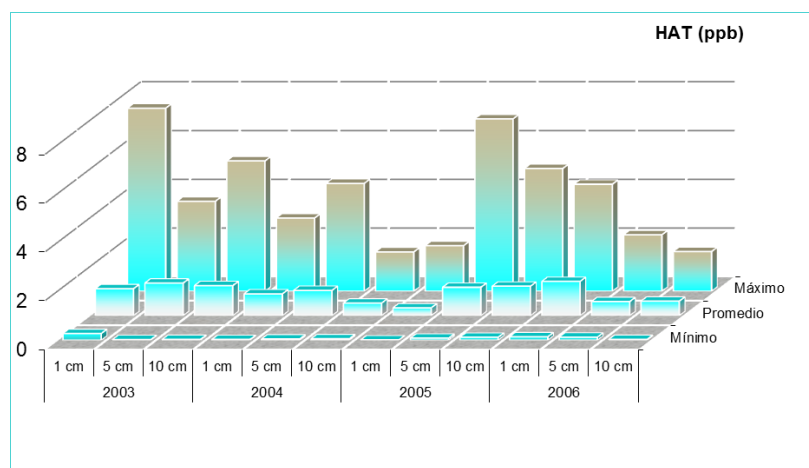
En las evaluaciones de los HAT durante las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 se observan valores dentro del intervalo de 0.005-7.505 ppb (Tabla 5.1, Figura 5.1), donde el máximo valor para el primer nivel está presente en el año 2003, para el segundo nivel se encuentra en el año 2005 y en el tercer nivel en el año 2003.

**Tabla 5.1 Valores máximo, promedio y mínimo de hidrocarburos alifáticos totales (ppb) en sedimento seco, por año y nivel**

Parámetro	Estadístico	2003			2004			2005			2006		
		1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm
Totales	Máximo	7.505	3.685	5.339	2.997	4.418	1.609	1.861	7.065	5.028	4.384	2.312	1.624
	Promedio	1.101	1.330	1.228	0.891	1.033	0.511	0.317	1.159	1.204	1.401	0.573	0.592
	Mínimo	0.268	0.021	0.025	0.021	0.042	0.052	0.005	0.076	0.113	0.134	0.119	0.026

La distribución horizontal de los HAT es mayor en los dos primeros estratos, debido posiblemente a los aportes constantes de hidrocarburos en la zona, los estratos profundos (8-10 cm), a pesar de estar consolidados pueden ofrecer una idea de la degradación en la zona.

**Figura 5.1 Hidrocarburos alifáticos totales (ppb), nivel-año**



Existe un predominio, tanto en campañas como en niveles, de los hidrocarburos alifáticos impares menores a 17 carbonos (<math><C\_{17}</math>) (Tabla 5.2) en comparación con los compuestos pares menores a 22 carbonos (<math><C\_{22}</math>), mostrando zonas no contaminadas a través del tiempo en que se realizó este estudio y que, además, están fuertemente influenciadas por los sistemas lagunares y de mangle existentes en la zona. Esto complementa a estudios realizados en la laguna de Sontecomapan, Veracruz (Calva et al., 2005), donde se muestra que los valores de hidrocarburos dependen del sitio de colecta de la muestra.

**Tabla 5.2 Suma de cadenas impares y pares, año-nivel**

Suma/1000 de compuestos alifáticos	2003			2004			2005			2006		
	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10cm	1cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10cm
<C <sub>17</sub>	43.8	45.5	43.2	30.4	27.2	12.3	20.2	72.5	67.1	109.1	42.8	33.9
<C <sub>22</sub>	12.7	21.9	16.4	9.7	11.0	5.5	9.3	19.0	15.3	26.2	13.6	12.8

Se encontraron HAT en toda la zona de muestreo (Anexo B, Figuras B-5 a B-16).

En el primer nivel (1 cm) se encontró que en el año 2003 hubo algunas áreas dentro de la zona de plataformas con los valores más altos de este muestreo (Figura B-5, Tabla 5.1). En el año 2004 la distribución fue homogénea en casi toda la zona de muestreo excepto por pequeñas zonas dentro del área de plataformas y una zona cercana a Sánchez Magallanes, Tabasco (Figura B-6). Para el año 2005 y 2006 la distribución fue homogénea en la zona de muestreo, excepto en la zona de plataformas que fue donde se encontraron los valores más altos (Figura B-7, B-8).

En el segundo nivel (5 cm) para los años 2003 y 2004 los valores más altos de HAT se encontraron en la zona de plataformas del Golfo de México (Figuras B-9 y B-10). En el año 2005 se encontraron varias zonas donde los HAT fueron los más altos (cercanos a 94-96°N, 18-22°O; además de pequeñas zonas dentro del área de plataformas y una al norte de dicha zona) (Figura B-11). Para el año 2006 la distribución fue casi homogénea (valores de 0-2 ppb) en la zona de muestreo, además de algunas zonas dentro del área de plataformas y una zona ubicada cerca de las coordenadas 95°N, 19.4°O (Figura B-12).

En el tercer nivel (10 cm) se encontró que en los años 2003 y 2004 los valores más altos de HAT se encontraban en la zona de plataformas (Figura B-13). En el año 2005 se encontraron 3 grandes zonas donde hubo valores altos, entre 4-8 ppm, dos zonas están asociadas a las plataformas de producción de petróleo y la tercera se encontró al norte de las plataformas (Figura B-15). En el año 2006 los valores más altos se encontraron en la zona de plataformas (Figura B-16).

## 5.2 Mezcla no resuelta de compuestos (UCM)

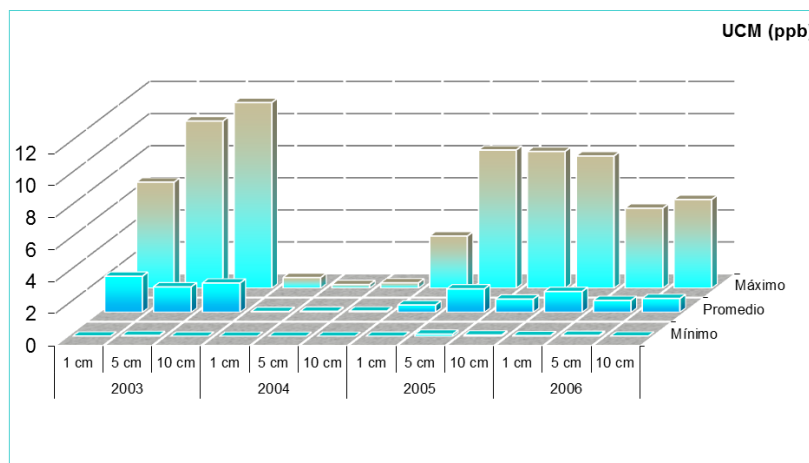
En las evaluaciones de los UCM durante las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 se observan valores dentro del intervalo de 0.002-11.568 ppb (Tabla 5.3, Figura 5.2), donde los máximos valores para el primer nivel se encontraron en el año 2006 y para los dos niveles restantes se encontraron en el año 2003.

**Tabla 5.3 Valores máximo, promedio y mínimo de mezcla no resuelta de compuestos (ppb) en sedimento seco, por año y nivel**

Parámetro	Estadístico	2003			2004			2005			2006		
		1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm
UCM	Máximo	6.606	10.418	11.568	6.580	2.260	3.280	3.243	8.607	8.518	8.239	4.982	5.524
	Promedio	2.243	1.584	1.818	0.520	0.610	0.700	0.455	1.462	0.824	1.300	0.738	0.854
	Mínimo	0.018	0.058	0.008	0.002	0.002	0.002	0.007	0.141	0.082	0.047	0.068	0.015

Las medias sugieren algunas zonas no contaminadas y con influencia de hidrocarburos biogénicos, aunque se encontraron zonas con hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos donde el factor que influyó fue la actividad petrolera (Commendatore y Esteves, 2004).

Figura 5.2 Mezcla no determinada de compuestos (ppb), nivel-año



Al igual que los HAT, la concentración de *UCM* es mayor en el estrato superficial (aportes constantes de hidrocarburos en la zona) que en los estratos profundos (2do y 3er nivel), donde al estar consolidados, ofrecen una idea de la degradación en la zona.

En el primer nivel (1 cm) se encontró que en 2003 los valores más altos de *UCM* se encontraron en la zona de plataformas del Golfo de México, además de algunas zonas al oeste de dicha zona, entre las ciudades de Sánchez Magallanes, Tabasco y Alvarado en Veracruz (Figura B-17). En el año 2004 la distribución fue homogénea, valores de 0 a 2 ppb, los valores más altos se encontraron en la zona de plataformas (Figura B-18). En el año 2005 hubo varias zonas donde se encontraron valores de *UCM* mayores a la media, pequeñas zonas dentro del área de plataformas y 2 más al Suroeste de dicha zona, cercanas a Alvarado y Sontecomapan en Veracruz (Figura B-19). Para el año 2006 hubo una gran zona dentro de la zona de plataformas con los valores de *UCM* más altos de este año y otra zona cercana a Sontecomapan en Veracruz (Figura B-20).

En el segundo nivel (5 cm) en el año 2003 los valores más altos de *UCM* se encontraron en la zona de plataformas del Golfo de México, además de algunas zonas al Suroeste de dicha zona, en las cercanías de Sontecomapan en Veracruz y una zona más al norte de la zona de plataformas (Figura B-21). En el año 2004 la distribución fue homogénea, valores de 0 a 2.26 ppb, los valores más altos se encontraron en la zona de plataformas (Figura B-22). En el año 2005 hubo varias zonas donde se encontraron valores de *UCM* mayores a la media, pequeñas zonas dentro del área de plataformas y 3 zonas más al Suroeste de dicha zona cerca de las costas de Alvarado en Veracruz; 2 zonas más, una al Oeste y la otra al Este de la zona de plataformas, en las costas de Campeche (Figura B-23). En el año 2006 hubo varias zonas con valores más altos al promedio, 2 de ellas cercanas a Alvarado en Veracruz. Los valores más altos se encontraron dentro de la zona de plataformas (Figura B-24).

En el tercer nivel (10 cm) se encontró que en el año 2003 los valores más altos de *UCM* estuvieron asociados a la zona de plataformas, también se encontraron varias zonas de valores altos en las

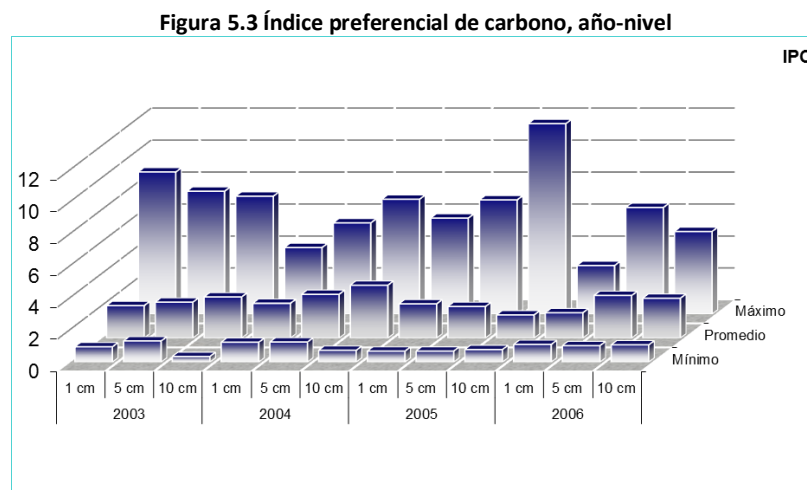
costas de Campeche, además de otras zonas al Suroeste de la zona de plataformas (Figura B-25). En los años 2004 y 2005 los valores más altos de HAT se encontraron en la zona de plataformas (Figuras B-26, B-27). En el año 2006 se encontraron varias zonas donde hubo valores mayores al promedio, 2-6 ppm, varias de estas zonas están asociadas a las plataformas de producción de petróleo y una más se encontró al norte de las plataformas (Figura B-28).

### 5.3 Índice preferencial de carbono (IPC)

En las evaluaciones de los IPC durante las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 se observan valores dentro del intervalo de 0.351-11.906 (Tabla 5.4, Figura 5.3), donde el máximo valor para el primer y segundo niveles están presentes en el año 2003 y en el tercer nivel en el año 2005.

Tabla 5.4 Datos obtenidos para el índice preferencial de carbono por año y nivel

Parámetro	Estadístico	2003			2004			2005			2006		
		1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm
IPC	Máximo	8.879	7.679	7.365	4.156	5.697	7.179	6.000	7.133	11.906	3.031	6.658	6.658
	Promedio	2.024	2.242	2.568	2.169	2.735	3.306	2.137	1.967	1.446	1.582	2.660	2.660
	Mínimo	0.955	1.320	0.351	1.235	1.252	0.733	0.684	0.688	0.785	1.100	1.029	1.073



Las evaluaciones de los IPC son parecidas a las que se han reportado en el Mar Caspio donde se han encontrado niveles mayores; desde 1.00 hasta 9.00 en la Patagonia (0.25-53.93) (Commendatore y Esteves, 2004) y parecidas a las encontradas en el mar de Bering (3.8-5) (Kennicutt *et al.*, 1991). Este índice referencial es indicativo de la presencia de hidrocarburos de origen antropogénico cuando se detectan valores aproximados a 1.0 (González, 1990); además, señala que tales niveles son característicos del Banco de Campeche. Propiamente al oeste de las plataformas petroleras de la Sonda de Campeche, donde se reportaron niveles de 0.10 a 10.0. En consecuencia son hidrocarburos de fuentes antropogénicas, situación reforzada por reportes efectuados en las zonas costeras de Argentina, donde las áreas detectadas con hidrocarburos con niveles de IPC próximos a 1.0, son de origen petrogénico (Commendatore y Esteves, 2004).

La variabilidad del IPC por años fue:  $[IPC_{2004}] > [IPC_{2003}] > [IPC_{2006}] > [IPC_{2005}]$ . Estos hidrocarburos son de origen antropogénico; posible aporte de las plataformas petroleras y chapopoterías que se encuentran en el área de estudio.

La variabilidad entre niveles es:  $[IPC_{3^{er} nivel}] \cong [IPC_{2^{o} nivel}] > [IPC_{1^{er} nivel}]$ . Esta situación posiblemente se debió a la baja degradación de este tipo de hidrocarburos en la zona o tal vez a la acumulación excesiva de estos contaminantes en etapas anteriores al estudio.

La distribución del IPC en el primer nivel (1 cm), en el año 2003 se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico ( $IPC \cong 1$ ). Se encontraron algunas zonas con influencia de hidrocarburos biogénicos ( $3 \geq IPC \geq 6$ ), cercanas a las costas de Tabasco (Dos Bocas y Sánchez Magallanes) y Veracruz (Coatzacoalcos), otra zona cercana a las coordenadas  $94.5^{\circ}O$ ,  $19.2^{\circ}N$ , además una zona cercana a la zona de producción de petróleo (Figura B-29). La distribución del IPC en el año 2004 fue influenciada por los hidrocarburos petrogénicos. Se encontraron algunas zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos (zonas cercanas a Sontecomapan en Veracruz y dentro de la zona de plataformas petroleras) (Figura B-30). El año 2005 se vio influenciado nuevamente por hidrocarburos de origen petrogénico, se encontraron varias zonas donde hubo hidrocarburos biogénicos (pequeñas zonas en área de plataformas, una zona al norte de y otra al suroeste de la zona de dicha zona petrolífera, en Alvarado, Veracruz) (Figura B-31). Para el año 2006 se encontró una distribución homogénea del IPC, influencia de hidrocarburos petrogénicos, valores cercanos a 1. Los valores más altos (hidrocarburos biogénicos) se encontraron dentro del área de plataformas (Figura B-32).

La distribución del IPC en el segundo nivel (5 cm), se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico. En el año 2003 se encontraron algunas zonas cercanas a las costas de Yucatán, Tabasco (terminal portuaria Dos Bocas) y Veracruz (Coatzacoalcos), además de pequeñas áreas dentro de la zona de producción de petróleo con influencias de hidrocarburos biogénicos. (Figuras B-33). La distribución del IPC en el año 2004 fue influenciada por los hidrocarburos petrogénicos. Se encontraron 2 grandes zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos (zonas costeras desde Dos Bocas, Tabasco, hasta Alvarado, Veracruz, costas de Campeche cercanas al sistema de Laguna de Términos y que se extiende hasta la Ciudad de Campeche, además se encontraron zonas dentro del área de plataformas petroleras) (Figura B-34). El año 2005 se vio influenciado nuevamente por hidrocarburos de origen petrogénico, se encontraron varias zonas donde hubo hidrocarburos biogénicos (pequeñas zonas dentro del área de plataformas, una zona al este, costas de Campeche, al norte de Laguna de Términos, y al norte de la zona de plataformas cerca de Celestún, Yucatán, y que se extendió hacia el canal de Yucatán) (Figura B-35). En 2006 la distribución del IPC fue influenciado por hidrocarburos de origen petrogénico, además hubo zonas con influencias de origen biogénico (zona de plataformas extendiéndose al mar abierto hacia el oeste de dicha zona petrolera, en las costas de Tabasco, Dos Bocas. En Veracruz, cerca de Alvarado y al oeste del puerto de Veracruz) (Figura B-36).

La distribución del IPC en el tercer nivel (10 cm) se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico. En el año de 2003 se encontraron algunas zonas con influencias de hidrocarburos biogénicos (4 cercanas a la zona de producción de petróleo, 1 al norte ( $92^{\circ}O$ ,  $21^{\circ}N$ ) y otras tres zonas al sureste de dicha zona, cerca de la costa y con posible influencia de los sistemas de Coatzacoalcos, Veracruz y Sánchez Magallanes, Tabasco). (Figura B-37). En el año 2004 la

distribución del IPC fue influenciada por los hidrocarburos petrogénicos; se encontraron 2 grandes zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos (1 área en zona de plataformas y otra al sureste, abarcó desde Sánchez Magallanes, Tabasco, hasta Sontecomapan, Veracruz) (Figura B-38). El año 2005 se vio influenciado nuevamente por hidrocarburos de origen petrogénico. Se encontraron 2 pequeñas zonas donde hubo hidrocarburos biogénicos ambas ubicadas en la zona de plataformas (Figura B-39). Para el año 2006 se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico, además se encontraron 4 zonas influenciadas por hidrocarburos biogénicos (1 zona dentro del área de producción petrolera y que se extiende al sureste de dicha zona, otra zona en las costas de Veracruz desde Sontecomapan hasta el puerto Veracruzano, una más al noroeste de la zona de plataformas y una última en el límite norte de la zona de producción petrolera (Figura B-40).

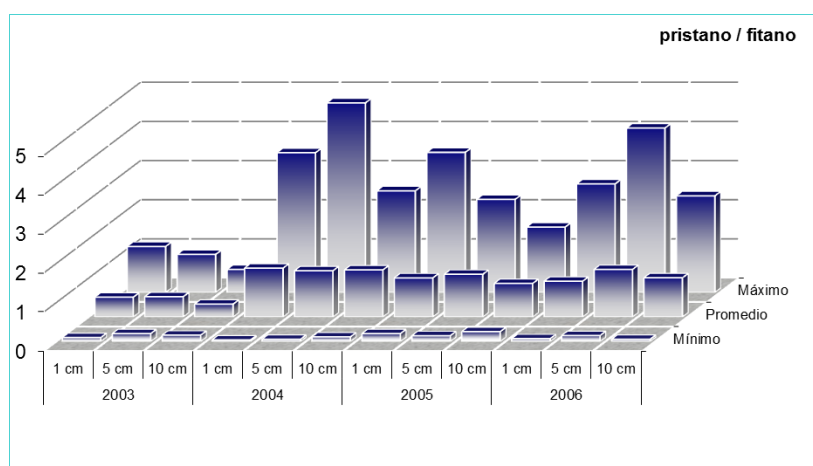
#### 5.4 Pristano/fitano

En las evaluaciones de los pri/fit durante las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 se observan valores dentro del intervalo entre 0.039-4.840 (Tabla 5.5, Figura 5.4), donde el máximo valor para el primer nivel está presente en el año 2005, para el segundo nivel se encuentra en el año 2004 y en el tercer nivel en el año 2004.

Tabla 5.5 Índice Pristano/fitano año-nivel

Parámetro	Estadístico	2003			2004			2005			2006		
		1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm
pri/fit	Máximo	1.172	0.967	0.585	3.567	4.840	2.594	3.576	2.375	1.667	2.769	4.197	2.466
	Promedio	0.502	0.515	0.325	1.246	1.179	1.200	0.996	1.087	0.855	0.911	1.213	0.999
	Mínimo	0.100	0.200	0.160	0.039	0.056	0.116	0.200	0.147	0.250	0.070	0.150	0.054

Figura 5.4 Índice pristano/fitano año-nivel



En estudios realizados sobre sedimentos fluviales del río Coatzacoalcos, se reportaron niveles de pri/fit de 660 a 860 ppb, donde los hidrocarburos isoprenoides derivan de fuentes biogénicas (Farrán *et al.*, 1987). En este estudio se reportaron niveles de pri/fit extremadamente bajos (0.039-4.840 ppb). A pesar de la variación, entre los diferentes años, los valores indican que hay hidrocarburos de origen petrogénico en toda la zona de estudio. Se pone de manifiesto el aporte de

los hidrocarburos petrogénicos en los dos primeros niveles y la disminución en el tercer nivel que sugiere degradación de dichos hidrocarburos (posible degradación de sedimentos consolidados).

La distribución del índice pri/fit en el primer nivel (1 cm), en el año 2003 se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico ( $\text{pri/fit} \cong 1$ ) y antropogénicos ( $0 \geq \text{pri/fit} \geq 1.4$ ), se encontraron algunas zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos ( $1.4 \geq \text{pri/fit} \geq 6.7$ ) (zonas cercanas a la zona de plataformas petroleras, al norte de dicha zona y una zona más cercana a las costas de Yucatán) (Figura B-41). La distribución del índice pri/fit en el año 2004 fue influenciada por los hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos; se encontraron algunas zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos (zonas cercanas a plataformas petroleras, al norte de dicha zona, una más cercana a las costas de Yucatán (21.8-22.4°N, 91.2-92.4°O) y otra cerca de Coatzacoalcos, Veracruz (Figura B-42). El año 2005 estuvo influenciado nuevamente por hidrocarburos de origen petrogénico y antropogénico, se encontraron varias zonas donde hubo hidrocarburos biogénicos (zona de plataformas y al norte de dicha zona, al suroeste de la zona de plataformas en Alvarado, Veracruz) (Figura B-43). El año 2006 estuvo influenciado nuevamente por hidrocarburos de origen petrogénico y antropogénico, se encontró una zona donde hubo hidrocarburos biogénicos (dentro de la zona de plataformas) (Figura B-44).

La distribución del índice pri/fit en el segundo nivel (5 cm), se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico y antropogénico. En el año 2003 se encontraron pequeñas áreas dentro de la zona de plataformas donde hubo hidrocarburos de origen biogénico (Figura B-45). La distribución del índice pri/fit en el año 2004 fue influenciada por los hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos. Se encontraron 2 grandes zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos (zona de plataformas petroleras y al norte de dicha zona) (Figura B-46). En los años 2005 y 2006 predominaron los hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos, se encontraron zonas donde había hidrocarburos biogénicos (área de plataformas, posible influencia del sistema lagunar de Laguna de Términos, Campeche) (Figuras B-47, B-48).

La distribución del pri/fit en el tercer nivel (10 cm) se vio influenciada por hidrocarburos de origen petrogénico y antropogénico. En el año 2003 solamente se encontraron hidrocarburos de origen antropogénico (Figura B-49). En el año 2004 la distribución del índice pri/fit fue influenciada por los hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos; se encontraron 2 grandes zonas donde hubo influencia de hidrocarburos biogénicos (1 zona cercana al área de plataformas petroleras, cercana al sistema Lagunar de Laguna de Términos y otra al norte de la zona de plataformas) (Figura B-50). En los años 2005 y 2006 se vio influenciado nuevamente por hidrocarburos de origen petrogénico y antropogénico. Se encontraron pequeñas zonas donde hubo hidrocarburos biogénicos, ubicadas en la zona de plataformas, posible influencia del sistema de Laguna de Términos en Campeche (Figuras B-51 y B-52).

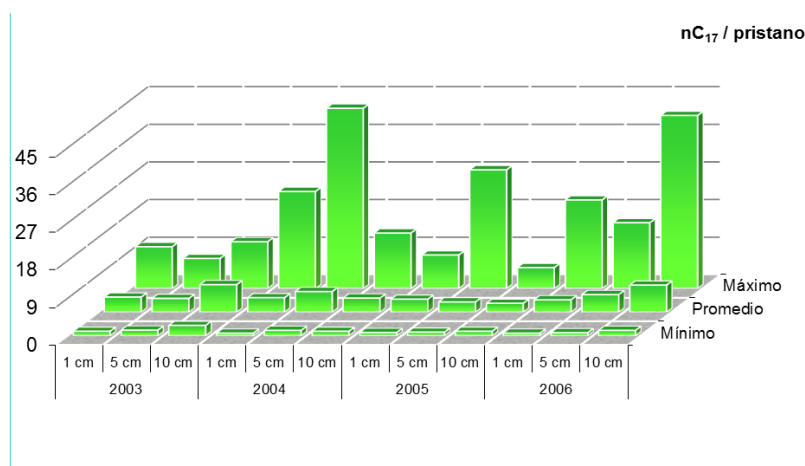
### **5.5 nC<sub>17</sub>/pristano**

En las evaluaciones de los nC<sub>17</sub>/pri durante las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 se observan valores dentro del intervalo de 0.592-2.441 (Tabla 5.6, Figura 5.5), donde el máximo valor para el primer y segundo niveles están presentes en el año 2004, y en el tercer nivel en el año 2006.

Tabla 5.6 Índice nC<sub>17</sub>/pristano por año-nivel

Parámetro	Estadístico	2003			2004			2005			2006		
		1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm
nC <sub>17</sub> /Pri	Máximo	9.997	7.170	11.194	23.222	43.127	13.270	8.000	28.400	5.000	21.184	15.727	41.404
	Promedio	3.581	3.269	6.564	3.435	4.917	3.344	3.068	2.432	2.086	2.931	4.185	6.450
	Mínimo	1.045	1.317	2.441	0.592	1.273	1.039	0.746	0.842	1.040	0.598	0.710	1.274

Figura 5.5 Índice nC<sub>17</sub>/pristano por año-nivel



Considerando los valores reportados por Commendatore y Esteves (2004) y a pesar de la presión ambiental, el sistema se encuentra en proceso de degradación, a excepción de aquellas zonas donde los valores de los contaminantes son demasiado altos y el índice de degradación es bajo. El primer nivel está influenciado por la dinámica e inestabilidad de la capa superficial y los valores altos corresponden a las capas donde la degradación es mayor y los valores bajos corresponden a las capas profundas. El segundo y tercer niveles (sedimentos consolidados), tienen mayor actividad de los procesos bacterianos y geoquímicos, y por ende, mayor degradación.

La distribución del índice nC<sub>17</sub>/pri en el primer nivel (1 cm), en el año 2003 indicaría que hubieron hidrocarburos en proceso de degradación ( $nC_{17}/pri \geq 1.2$ ) y se encontró una zona donde hubo hidrocarburos degradados ( $0 \geq nC_{17}/pri \geq 1.2$ ) (zonas cercanas a la costa de Yucatán) (Figura B-53). La distribución del índice nC<sub>17</sub>/pri en los años 2004, 2005 y 2006 estuvo influenciada por los hidrocarburos en proceso de degradación. Se encontraron algunas zonas donde hubo influencia de hidrocarburos degradados (pequeñas zonas en el área de plataformas) (Figuras B-54, B-55 y B-56).

La distribución del índice nC<sub>17</sub>/pri en el segundo nivel (5 cm), en los años 2003, 2004 y 2006 manifiestan que hubo hidrocarburos en proceso de degradación y se encontraron pequeñas zonas donde hubo hidrocarburos degradados (pequeñas zonas en el área de plataformas) (Figuras B-57, B-58 y B-60). La distribución del índice nC<sub>17</sub>/pri en el año 2005 estuvo influenciada por hidrocarburos en proceso de degradación, y se encontraron 2 zonas donde hubo influencia de hidrocarburos degradados (1 zona en el área de plataformas y otra pequeña al norte del área de plataformas) (Figura B-59).



La distribución del índice  $nC_{17}/pri$  en el tercer nivel (10 cm), en los años 2003, 2004, 2005 y 2006 manifiestan que hubo hidrocarburos en proceso de degradación y se encontraron pequeñas zonas donde hubo hidrocarburos degradados (pequeñas zonas en el área de plataformas) (Figuras B-61, B-62, B-63 y B-64).

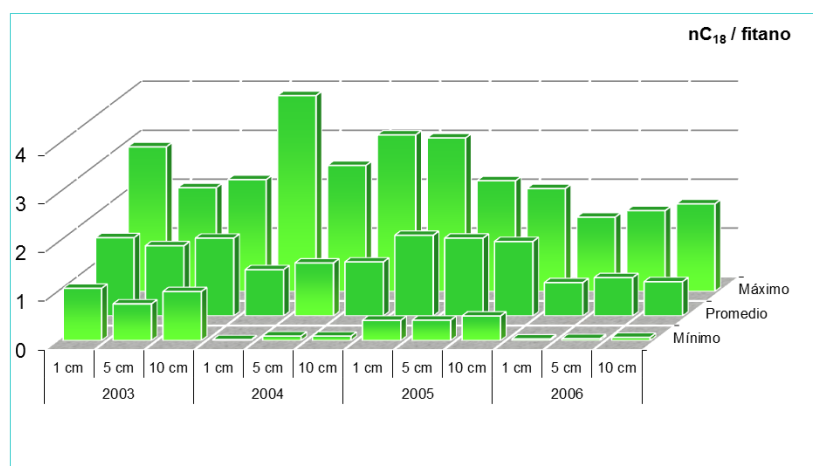
### 5.6 $nC_{18}/fitano$

En las evaluaciones del índice  $nC_{18}/fitano$  durante las campañas oceanográficas SGM 2003-2006 se observan promedios dentro del intervalo de 0.016-4.000 (Tabla 5.7, Figura 5.6), donde el máximo valor para el primer y segundo nivel están presentes en el año 2004, para el tercer nivel en el año 2004.

Tabla 5.7 Índice  $nC_{18}/fitano$  por año-nivel

Parámetro	Estadístico	2003			2004			2005			2006		
		1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm	1 cm	5 cm	10 cm
$nC_{18}/Fit$	Máximo	2.954	2.118	2.282	4.000	2.571	3.197	3.133	2.259	2.100	1.516	1.648	1.789
	Promedio	1.598	1.433	1.588	0.944	1.082	1.102	1.646	1.590	1.520	0.679	0.781	0.699
	Mínimo	1.065	0.747	0.998	0.016	0.091	0.087	0.412	0.415	0.500	0.031	0.036	0.064

Figura 5.6 Índice  $nC_{18}/fitano$  por año-nivel



Igual que el índice anterior, los valores obtenidos son relativamente más altos que los reportados por Commendatore y Esteves (2004). El comportamiento vertical se debe al proceso degradativo en el que se encuentran los hidrocarburos, que es mayor en las capas profundas y menor en las superficiales.

La distribución del índice  $nC_{18}/fit$  en el primer nivel (1 cm), en el año 2003 indicaría que hubo influencia de hidrocarburos en proceso de degradación ( $nC_{18}/fit \geq 0.8$ ) (Figura B-65). La distribución del índice  $nC_{18}/fitano$  en el año 2004, muestra la influencia de los hidrocarburos en proceso de degradación y algunas zonas con influencia de hidrocarburos degradados ( $0 \geq nC_{18}/fit \geq 0.8$ ) (zonas costeras desde Yucatán hasta Tabasco, abarcando la zona de plataformas; existen además pequeñas zonas hacia el suroeste de dicha zona) (Figura B-66). La distribución del índice  $nC_{18}/fitano$  en el año 2005 muestra la influencia de los hidrocarburos en proceso de degradación y

pequeñas zonas con influencia de hidrocarburos degradados (norte de la costa de Yucatán, desembocadura de Coatzacoalcos y zona de plataformas) (Figura B-67). En el año 2006 hubo influencia de los hidrocarburos degradados y se encontraron algunas zonas donde hubo hidrocarburos en procesos de degradación (pequeñas zonas en costas de Yucatán y Veracruz, además de una considerable área en plataformas) (Figura B-68).

La distribución del índice  $nC_{18}/fit$  en el segundo nivel (5 cm), en el año 2003 indicaría que hubo influencia de hidrocarburos en proceso de degradación y una pequeña área de hidrocarburos degradados en zona de plataformas (Figura B-69). La distribución del índice  $nC_{18}/fitano$  en el año 2004, muestra zonas con hidrocarburos en proceso de degradación (zona de costa desde Yucatán hasta Veracruz y con predominio en la zona de plataformas) algunas otras zonas con hidrocarburos degradados (1 pequeña zona en la costa de Campeche, otras dentro de la zona de plataformas y una más extensa hacia el norte de dicha zona productiva) (Figura B-70). La distribución del índice  $nC_{18}/fitano$  en el año 2005, muestra la influencia de los hidrocarburos en proceso de degradación y una pequeña zona con influencia de hidrocarburos degradados (costa de Campeche) (Figura B-71). En el año 2006 hubo influencia de los hidrocarburos degradados (zonas costeras desde Yucatán hasta Coatzacoalcos, Veracruz y al norte de las plataformas) y se encontraron algunas zonas donde hubo influencia de hidrocarburos en procesos de degradación (desde la zona de plataformas hasta el puerto de Veracruz, además de zonas al norte de dicha zona productiva y otra zona al norte de la costa de Yucatán) (Figura B-72).

La distribución del índice  $nC_{18}/fitano$  en el tercer nivel (10 cm), en el año 2003, muestra el predominio de hidrocarburos en proceso de degradación (Figura B-73). En el año 2004, se manifestó el predominio de hidrocarburos en proceso de degradación; además, se encontraron varias zonas de hidrocarburos degradados (2 en el área de plataformas, otra más al norte y otra al sureste de dicha zona petrolera, una última en la zona de costa de Tabasco) (Figura B-74). En el año 2005 se encontraron principalmente hidrocarburos degradados (desde el canal de Yucatán hasta la costa de Coatzacoalcos, además de otra zona en el área costera cercana al puerto de Veracruz), los hidrocarburos en proceso de degradación se encontraron en dos grandes zonas (una desde la costa de Coatzacoalcos formando un área triangular hasta las coordenadas  $20.2^{\circ}N$ ,  $95.6^{\circ}O$  y  $21^{\circ}N$ ,  $93.7^{\circ}O$ ; la segunda inicia en el noreste de la zona de plataformas hasta la zona profunda del Golfo de México) (Figura B-75). En el año 2006 se manifestó el predominio de hidrocarburos en proceso de degradación; además, se encontraron pequeñas zonas donde hubo hidrocarburos degradados (suroeste de zona de plataformas) (Figura B-76).

## 5.7 Análisis entre los muestreos (medias)

### 5.7.1 Análisis de varianza entre campañas

Se plantean hipótesis nula y alterna a través de la varianza entre campañas (1) y entre sedimentos (2). La Tabla 5.8 muestra los promedios por campaña y la Tabla 5.9 los resultados de la prueba de Tukey.

Tabla 5.8. Promedios por campaña.

Parámetro	SGM-8 (2003)	SGM-9 (2004)	SGM-10 (2005)	SGM-11 (2006)
Totales	1.220	0.812	0.893	0.855

$H_0 : \mu_{2003} = \mu_{2004} = \mu_{2005} = \mu_{2006} = 0$  No existe diferencia entre campañas

$H_1 : \mu_{2003} \neq \mu_{2004} \neq \mu_{2005} \neq \mu_{2006} \neq 0$  Existen diferencias entre las diferentes campañas

**Tabla 5.9 Prueba de Tukey (probabilidades asociadas) para campañas**

Campaña	2003	2004	2005	2006
2003		0.000653	0.008003	0.6922073
2004	0.000653		0.226652	0.000008
2005	0.008003	0.226652		
2006	0.6922073	0.000008	0.000038	

Se examinaron las 4 campañas oceanográficas (SGM 2003-2006) encontrándose diferencias significativas entre los años 2003 y 2006; 2004 y 2005 no así para las demás relaciones entre años (Tabla 5.9).

### 5.7.2 Análisis de varianza entre niveles de sedimentos

Entre niveles 1 y 2 son no significativamente diferentes y existe una diferencia significativa entre los niveles 1 y 3; 2 y 3 (Tablas 5.10 y 5.11).

$H_0 : \mu_{1cm} = \mu_{5cm} = \mu_{10cm} = 0$  No existen diferencias entre niveles

$H_1 : \mu_{1cm} \neq \mu_{5cm} \neq \mu_{10cm} \neq 0$  Existen diferencias entre niveles

**Tabla 5.10 Promedio de HAT por nivel durante las cuatro campañas**

Parametro	1cm	5 cm	10 cm
HAT	3.710	4.096	3.535

**Tabla 5.11 Prueba de Tukey para niveles**

Nivel	1	2	3
1		0.994813	0.002353
2	0.994813		0.003292
3	0.002353	0.003292	

**Tabla 5.12 Prueba de Fischer**

	F	Effect	p
Intercept	6999.556	6	0
Campaña	143.251	18	0
Nivel	5.84	12	0

Después de la transformación de la base de datos (Tabla 5.12), donde se han cumplido los supuestos de la normalidad y homocedasticidad, se procedió a realizar gráficos para describir el comportamiento de los hidrocarburos en el área de estudio (Anexo B), información mencionada en los párrafos anteriores.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES

Con respecto al objetivo general de relacionar las concentraciones de hidrocarburos alifáticos totales obtenidas de muestras de sedimentos superficiales colectados durante los años 2003 a 2006 de la zona sur del Golfo de México ofreciendo un panorama ambiental de la zona de estudio a partir de la índices referenciales puede concluirse lo siguiente:

- Los índices HAT (valores dentro del intervalo de 0.005-7.505 ppb) y *UCM* (valores dentro del intervalo de 0.002-2.243 ppb) muestran predominio de zonas no contaminadas, zonas con influencia de hidrocarburos biogénicos asociadas a ríos, lagunas y manglares. Además los valores altos de ambos índices (presencia de hidrocarburos petrogénicos y antropogénicos) se encuentran asociados a la zona productiva petrolera (plataformas en el Sureste del Golfo de México) y en algunos casos asociados a sitios ligados con el “desarrollo humano”.
- Los índices *pri/fit* (valores dentro del intervalo entre 0.039-4.840) e *IPC* (valores en el rango 0.351-11.906) manifiestan un predominio de hidrocarburos petrogénicos (aportes constantes asociados a las emanaciones naturales de hidrocarburo, a la producción de petróleo y sus operaciones) y antropogénicos en gran parte de la zona estudiada.
- Los índices *nC<sub>17</sub>/pri* (valores dentro del intervalo de 0.592-2.441) y el *nC<sub>18</sub>/fitano* (valores en el intervalo 0.016-4.000), indican que hay amplias zonas en proceso de degradación (zonas en mar abierto y cercanas a la costa), y algunas otras con materiales degradados (relacionados a la zona de producción petrolera y con sistemas saturados por contaminantes).
- La variabilidad entre campañas está relacionado con las actividades y eventos que suceden a través del tiempo. Los aportes son constantes y variables dentro de la zona de muestreo, dependen fundamentalmente de la zona de muestreo y de los eventos anteriores a los muestreos (condiciones geohidrometeorológicas, actividades humanas y productivas).
- La variabilidad respecto a la profundidad permite concluir que existen procesos de degradación (bacterianos y geoquímicos) en la zona que contribuyen a mantener el equilibrio ecológico de la zona de estudio.
- Con respecto a la profundidad se concluye que existe acumulación de hidrocarburos antropogénicos en las partes más bajas de los sedimentos por posible baja degradación y actividades contaminantes en etapas anteriores al muestreo (acumulación de materiales). El primer nivel está influenciado por la dinámica e inestabilidad de la capa superficial, el segundo y tercer nivel tiene mayor actividad (al ser sedimentos consolidados) de los procesos bacterianos y geoquímicos y, por ende, mayor degradación.
- Durante el tiempo que se realizó este estudio, se encontró que hay una variabilidad de los compuestos analizados tanto en tiempo como en los diferentes niveles de sedimentos.
- La presencia de los hidrocarburos alifáticos es producto tanto de la síntesis biogénica como petrogénica, además de la aportación antropogénica, que está dado por la infraestructura petrolera de la Sonda de Campeche, las chapopoterías existentes en el lugar y de las aguas provenientes de algunos ríos.

- Los resultados que se obtuvieron indican que se realizan actividades petroleras intensas en la zona y que existen áreas contaminadas y a pesar de los niveles de hidrocarburos en la zona, algunas zonas se encuentran en procesos degradativos.

## 6.2 RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos de esta investigación se recomienda lo siguiente:

- La legislación en México no contempla el análisis de sedimentos, los valores que se pudieran considerar como referencia están asociados a límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos (NOM-138-SSA1-2012, Tabla 6.1), por lo que debiera incluirse tanto el análisis de los sedimentos, para conocer los valores anteriores a la iniciación de nuevas actividades de producción de hidrocarburos, como las sanciones correspondientes por el vertido intencional o accidental.

**Tabla 6.1 Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos (DOF, 2013)**

Fracción hidrocarburos	Uso predominante de suelo (mg/kg base seca)		
	Agrícola, firestal, pecuario y de conservación	Residencial y recreativo	Industrial y comercial
Ligera	200	200	500
Media	1200	1200	5000
Pesada	3000	3000	6000

- El estudio de sedimentos debe ser integral e incluir estudios de porosidad de los sedimentos y de C<sub>13</sub> para determinar de manera correcta la estructura de los hidrocarburos existentes en el ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

Atlas oceanográfico del Golfo de México y Mar Caribe. Sección I. Mareas y corrientes. 1974. Secretaría de Marina. Dirección General de Oceanografía y Señalamiento Marítimo. OSM. No. 1000. Estados Unidos Mexicanos.

Albaigés, J. y Albrecht, P. 1979. Fingerprinting marine pollutant hydrocarbons by computerized gas chromatography mass spectrometry. *International Journal Environmental Analysis Chemistry*. 6:171-190.

Antoine, J. 1972. Structure of the Gulf. In: Contribution on the geological and geophysical oceanography of Gulf of Mexico. Rezak, R. y Henry, V. J. (Eds.). Texas A&M University. Oceanographic studies series. Houston, Texas, US. 3:1-34.

Bedair, H. M. y Al-Saad, H. T. 1992. Dissolved and particulated absorbed hydrocarbons in water of shatt Al-Arab River, Iraq. *Water, Air, Soil Pollution*. 61:397-408.

Biggs, D. C. 1992. Nutrients, plankton and productivity in a warm-core ring in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 97(C2):143-154.

Blumer, M. y Thomas, W. D. 1964. Pristane in the marine environment. *Helgoländer Wiss. Meeresuntersuch.* 10:187-201.

Blumer, M. y Youngblood, W. W. (1975). Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and recent sediments. *Science*. 188: 53-55.

Boehm, P. D., Douglas, G. C., Burns, W. A., Mankiewicz, P. J., Page, D.S. y Bence, A. R. 1997. Application of petroleum hydrocarbon chemical fingerprinting and allocation techniques after the Exxon Valdez oil spill. *Marine Pollution Bulletin*. 34(8):599-613.

Botello, A. V. 1996. Características, composición y propiedades fisicoquímicas del petróleo. Botello V. A., Rojas-Galaviz, J. L., Benítez, J. A., y Zárate-Lomelí D. (eds.). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. EPOMEX Serie Científica 5: 203-210. Universidad Autónoma de Campeche. México, 666 págs.

Botello, A. V., Villanueva, F. S. y Díaz, G. G. 1997. Petroleum pollution in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Review of Environmental Contamination and Toxicology*, 153:91-118.

Broman, D., Colmsjö, A., Ganning, B., Näf, C., Zebühr, y Östman, C. 1987. Fingerprinting petroleum hydrocarbons in bottom sediment, plankton, and sediment trap collected seston. *Marine Pollution Bulletin*. 18:380-388.

Calva, B. L. G., Botello, A. V. y Ponce-Velez, G. 2005. Composición de hidrocarburos alifáticos en sedimentos de la laguna Sontecomapan, Ver., México. *Hidrobiológica*. 15(1):97-108.

Caso, M., Pisanty, I. y Ezcurra, E. 2004. Diagnóstico ambiental del Golfo de México. SEMARNAT, INE, IE A.C., Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies. 1047 págs.

Chapín, R. G. y Summerlin, L. R. 1988. Química. Publicaciones Cultural. México.

Clark, R. C. y Blumer, M. 1967. Distribution of n-paraffins in marine organism and sediment. *Limnology Oceanography*. 12:79-87.

Clayton, D. Clayton, E. 1981. *Pattys industrial hygiene and toxicology*. Wiley Interscience publication. 3<sup>a</sup> Ed. Volume II B. US.

Colombo, J. C., Pelletier, Ch., Brochu, A., Khalil, M. y Catoggio, J. A. 1989. Determination of hydrocarbons sources using n-alkanes and polyaromatic hydrocarbons distribution indexes. Case study: Rio de La Plata Estuary, Argentina. *Enviromental Science and Technology*. 23:888-894.

Commendatore, M. G. y Esteves, J. L. 2004. Natural and anthropogenic hydrocarbons in sediments from the Chubut River (Patagonia, Argentina). *Marine Pollution Bulletin*. 48:910-918.

Cuesta, C. A. y García, Q. A. 2002 Rehabilitación del corredor de líneas ATASTA Cd PEMEX. Una propuesta para reducir tiempos de libranza, quema de gas y diferimiento de producción de crudo sin alteración del equilibrio ambiental en Áreas Naturales Protegidas durante la rehabilitación del Corredor. Tesis de Maestría. UDLAP. Puebla. México. 163 pags.

Dastilung, M. y Albrecht, P. 1979. Molecular test for oil polution in surface sediments. *Marine Pollution*. 7:13-15.

De la Lanza-Espino, G. 1991. *Oceanografía de los mares mexicanos*. AGT editor, S.A., México.

Didyck, B. M., Simmoneit, B.R.T., Brassell, S.C. y Eglinton, G. 1978. Organic geochemical indicator of paleoenviromental condition of sedimentation. *Nature*. 272:216-222.

DOF. 2009. Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002. Sistema General de Unidades de medida. Jueves 24 de septiembre de 2009. Diario Oficial de Federación (Primera Sección). Modificación del inciso O, el encabezado de la Tabla13, el ultimo párrafo del Anxo B y el apartado signo decimal de la Tabla 21 de la Norma Oficial Mexicana: Tabla 21- Reglas para la escritura de los números y su signo decimal. Signo decimal. El signo decimal debe ser una coma (,) o un punto sobre la línea(.). Si la magnitud de un número es menor que la unidad, el signo decimal debe sr precedido por un cero. Norma Oficial Mexicana. Diario Oficial de la Federación. Poder Ejecutivo Federal. Dirección General de Normas. México D.F. México.

DOF. 2013. Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012, Límites máximos permisibles de hidrocarburos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación. Viernes 3 de mayo de 2013. Diario Oficial de la Federación.

El-Sayed, S. Z., Sackett, W. M., Jeffrey, L. M., Fredericks, A. D., Saunders, R. P., Fryxell, G. A., Steidinges K. A. y Earle S. A. 1972. *Serial Atlas of the Marine Environment*. Folio 22. Chemistry, Primary Productivity and Bhentic Algae of the Gulf of Mexico. America Geographical Society.US.

Farrán, A., Grimalt, J., Albaigés, J., Botello, A.V., Macko, S.A. 1987. Assesment of petroleum pollution in a Mexican river by molecular markers and carbon isotope ratios. *Marine Pollution Bulletin*. 18(6):284-289.

González, E. C. 1990. Determinación de los niveles de hidrocarburos alifáticos y aromáticos en sedimentos recientes de la plataforma continental de los estados de Tabasco y Campeche, México. Tesis de licenciatura. ENEP Zaragoza, UNAM. México. 108 págs.

Guieysse, B., Viklund, B., Toes, A. Ch. y Mattiasson, B. 2004. Combined UV-biological degradation of PAH's. *Chemosphere*. 55:1493-1499.

Harris, H. J. 1972. Characterization of suspend matter in the Gulf of Mexico. I. Spatial distribution of suspend matter. *Deep Sea Research*. 19:719-726.

Handbook of environmental data on organic chemicals. 2004. Wiley Interscience publication. 4<sup>th</sup> Edition. USA.

Ikan, R., Baedecker, M. J. y Kaplan, I. R. 1975. Thermal alteration experiments on organic matter in recent marine sediments-II. Isoprenoids. *Geochemistry*. 39:187-194.

Index Merck. O'Neil, Maryadele J. 2001. US. 13th Ed.

Iniesta, R. y Blanco, J. 2005. Bioacumulación de hidrocarburos y metales asociados a vertidos accidentales en especies de interés comercial de Galicia. *Revista Gallega dos Recursos Mariños (Monografías)*:2, 200 págs.

Kennicutt, M. C., Brooks, J. M. y Macdonald, T. J. 1991. Origins of hydrocarbons in Bering Sea sediments-I. *Organic Geochemistry*. 17:75-83.

Lecaros, O. P., Alberti, P. y Astorga, M. S. 1991. Hidrocarburos parafínicos en aguas del estrecho de Magallanes. *Revista de Biología Marina*. 26:61-74.

Licea, S. y Santoyo, H. 1991. Algunas características ecológicas del fitoplancton de la región central de la Bahía de Campeche. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*. UNAM, México. 18(2):157-167.

Margalef, R. y Estrada, M. 1980. Las áreas oceánicas más productivas. *Investigación y Ciencia*. 49:8-20.

Morrison, J. M. y Nowlin, W. D. Jr. 1977. Repeated nutrient, oxygen, and density sections through the Loop Current. *Journal of Marine Research*. 35(1):105-128.

Müller-Karger, F. E., Walsh, J., Evans, R. y Meyers, M. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research*. 96(C7):12645-12665.

Neff, J.M. 2002. Bioaccumulation in Marine Organisms. Effect of Contaminants from Oil Well Produced Water. Elsevier. United Kingdom



Nowlin, W. D. 1971. Water masses and general circulation of the Gulf of Mexico. *Oceanology*. Academician of the Russian Academy of Sciences (RAS), Shirshov Institute of Oceanology. RAS. 452:173-178. Moscú, Russia.

Nowlin, W. D. y McLellan, H. J. 1967. A characterization of the Gulf of Mexico water in Winter. *Journal of Marine Research*. 25:29-59.

Padilla, R. M. 1989. Determinación de los niveles de hidrocarburos en sedimentos recientes del río Calzadas en la región del bajo Río Coatzacoalcos, Veracruz, México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM. México.

Parr, A.E. 1935. Report on hydrographic observations in the Gulf of Mexico and adjacent straits made during the Yale Oceanographic Expedition on the Mabel Taylor in 1932. *Bulletin of Brigham Oceanography*. Collect 5(1).

Patty's Industrial Hygiene and Toxicology. 1981. Wiley Interscience publication. USA.

Pelletier, E., Ouellet, S. y Paquet, M. 1991. Long-term chemical and cytological assessment of oil contamination in estuarine intertidal sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 22:273-281.

Poulicek, M. 1994. Biodégradation des molécules organiques naturelles et artificielles en milieu marin. (Cours D'Océanographie Européens). *Oceanis*. 20(4/5)1-105.

Sclater, J. G., Hellinger, S. y Topscott, Ch. 1977. The paleobathymetry of the Atlantic Ocean from the Jurassic to the present. *Journal of Geology*. 85:509-552.

Schnitzer, M. y Khan S. U. (Eds.). 1978. Soil organic matter. Elsevier Scientific Publishing Co. New York, US. 319.

Tolosa, I., de Mora, S., Reza, M. Sh., Villeneuve, J-P., Bartocci, J. y Cattini, C. 2004. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in coastal Caspian Sea sediments. *Marine Pollution Bulletin*. 48(1-2):44-60.

Tissot, B.P y Welte, D. H. 1978. Petroleum formation and occurrence. Springer. Berlin. Germany. 538 págs.

Venkatesan, M. I. y Kaplan, R. I. 1982. Distribution and transport of hydrocarbons in surface sediments of the Alaskan outer continental shelf. *Geochimica Cosmochimica*. 46:2135-2149.

Vidal, V. M. V., Vidal, F. V. y Hernández, A. F. 1990. Atlas Oceanográfico del Golfo de México, Vol. 3. Inst. de Invest. Eléctr. Cuernavaca, Morelos, México. 707 pp.

Welte, D. H. y Waples, D. 1973. Über die Bevorzugung geradzahlgiger n-Alkane in Sedimentgesteinen. *Naturwissenschaften*. 60:516-517.

Wilson, D., Monaghan, H., Osanik, A., Price, C. y Rogers, A. 1974. Natural marine oil seepage. *Science*. 194:857-865.

## **Páginas electrónicas consultadas**

Anuario estadístico de los puertos de México. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 2004. <http://e-mar.sct.gob.mx/fileadmin/estadisticas/2004nuevo/tablas/totales/mov-por-bu/arribo-nal.htm>

Anuario estadístico de pesca. 2006.  
<https://www.gob.mx/conapesca/documentos/anuario-estadistico-de-acuacultura-y-pesca>

Anuario estadístico de PEMEX. 2007.  
[http://www.ri.pemex.com/files/dcf/anuario\\_estadistico\\_07.pdf](http://www.ri.pemex.com/files/dcf/anuario_estadistico_07.pdf)

Balance nacional de energía. 2005, México 2006.  
[http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE\\_yDT/pub/balance2005.pdf](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_yDT/pub/balance2005.pdf)

Carta nacional pesquera 2006  
<http://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/carta-nacional-pesquera/Carta-Nacional-Pesquera-2006.pdf>

Cuenta pública federal, SHCP. 2007.  
[http://www.diputados.gob.mx/cuenta\\_publica\\_2007/](http://www.diputados.gob.mx/cuenta_publica_2007/)

Derrames de hidrocarburos en mares.  
<http://www.itopf.com/>

INEGI. 2003. Características principales de las unidades económicas pesqueras y acuícolas por zona pesquera, entidad federativa, clase de actividad y estratos de personal ocupado total.  
<http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=est&c=12557&pred=1>

INEGI. 2003. Embarcaciones de las unidades económicas pesqueras y acuícolas por clase de actividad, tipo de embarcación y estratos de tonelaje de registro, según zona pesquera.  
<http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=est&c=12565&pred=1>

INEGI, Ríos del Golfo de México, Geografía. 2005.  
[http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/principales\\_rios.cfm?c=521](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/principales_rios.cfm?c=521)

PEMEX. 1988. El petróleo. Gerencia de información y relaciones públicas. México.  
<http://www.pemex.com/index>

PEMEX. 2006. Anuario estadístico.  
<http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=2&catID=2624&contentID=2633>

Resumen de temporada de ciclones. 2001. CNA  
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2001/crt2001.html>

Resumen de temporada de ciclones. 2002. CNA  
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2002/crt2002.html>.

Resumen de temporada de ciclones. 2003. CNA  
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2003/crt2003.html>.

Resumen de temporada de ciclones. 2004. CNA  
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2004/crt2004.html>.

Resumen de temporada de ciclones. 2005. CNA  
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2005/rt2005a.pdf>

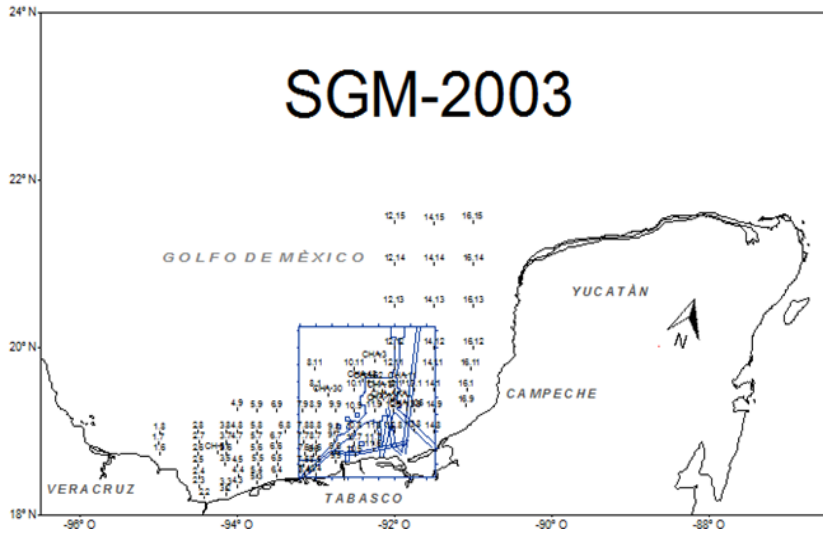
Resumen de temporada de ciclones. 2006. CNA  
<http://smn.cna.gob.mx/ciclones/tempo2006/crt2006.pdf>

## ANEXO A. PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS

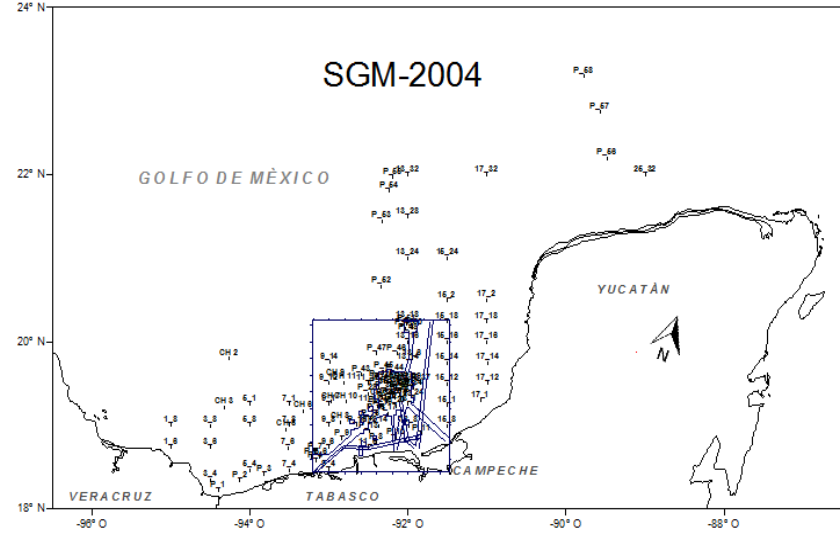
Tabla 1 Propiedades fisicoquímicas de algunos hidrocarburos alifáticos (Recopilación de Patty's industrial hygiene, Handbook of environmental data e Index merck).

Hidrocarburos alifáticos	PM (g/mol)	PF °C	PE °C	PV	SOLUBILIDAD	
					En agua, mg/L	En disolventes orgánicos
<b>n-decano</b>	142.29	-29.7	174.2	100 Pa a	1.976x10 <sup>-8</sup>	Etanol, éter
<b>n-dodecano</b>	170.34	-9.6	214.5	10 Pa a	1.8201x10 <sup>-9</sup>	Etanol, éter, acetona, CCl <sub>4</sub> , cloroformo
<b>n-tetradecano</b>	198.38	5.5	252.5	1 Pa a	6.94 x 10 <sup>-9</sup>	Etanol, éter
<b>n-pentadecano</b>	212.41	10	270.5	1 Pa a	Insoluble	Etanol, éter
<b>n-hexadecano</b>	226.43	18.5	287.5	1 Pa a	6.291x10 <sup>-9</sup>	Etanol, éter, CCl <sub>4</sub>
<b>n-heptadecano</b>	240.41	22	302	1 Pa a	Insoluble	Alcohol, éter, éter de petróleo
<b>Pristano</b>	268.53		296	--	Insoluble	Éter, benceno, CCl <sub>4</sub> , cloroformo
<b>n-octadecano</b>	254.48	28	317	1 Pa a	Insoluble	Etanol, éter, acetona
<b>Fitano</b>	---	--	---	--	-	-
<b>n-nonadecano</b>	268.51	32	330	1 Pa a	Insoluble	Etanol, éter, acetona, CCl <sub>4</sub>
<b>n-eicosano</b>	282	36.4	345.1	1 Pa a	5.35x10 <sup>-13</sup>	Benceno, éter de petróleo
<b>n-heneicosano</b>	296.57	40.01	356.5	1 Pa a	Insoluble	Etanol, éter de petróleo
<b>n-docosano</b>	310.59	44.5	224.5	1 Pa a	Insoluble	Etanol, cloroformo
<b>n-tricosano</b>	324.61	47.7	234	1 Pa a	Insoluble	Etanol, éter, CCl <sub>4</sub>
<b>n-tetracosano</b>	338.64	51.1	391.3	1 Pa a	4.2821x10 <sup>-3</sup>	Éter
<b>n-pentacosano</b>	352	53.3	259	1 Pa a	Insoluble	Benceno, cloroformo
<b>n-hexacosano</b>	366.69	56.6	262	1 Pa a	Insoluble	Benceno, ligeramente soluble en cloroformo
<b>n-heptacosano</b>	380.72	59.5	270	1 Pa a	Insoluble	Etanol, ligeramente soluble en éter
<b>n-octacosano</b>	394	61.6	279-281	1 Pa a	Insoluble	Benceno, cloroformo
<b>n-nonacosano</b>	408	64	286	1 Pa a	Insoluble	Etanol, acetona, éter
<b>n-triacontano</b>	422	66	304	-	Insoluble	Etanol, éter
<b>n-dotriacontano</b>	450.86	69.4	467	-	-	-
<b>n-tetratriacontano</b>	478.92	72.5	285.4	-	-	-
<b>n-hexatriacontano</b>	506.97	75.8	298.4	-	-	-
<b>n-octatriacontano</b>	534	--	--	-	-	-
<b>n-tetracontano</b>	562	81.4	522	-	-	-

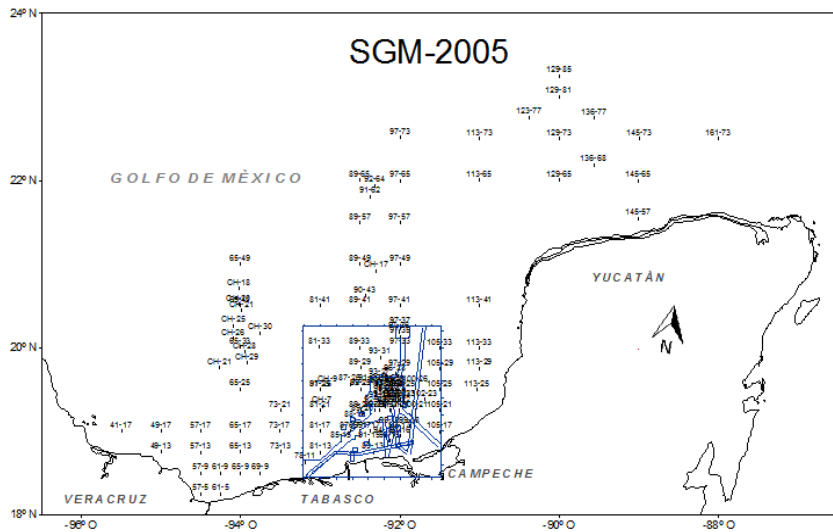
**ANEXO B FIGURAS DE LAS DISTRIBUCIONES DE ESTACIONES POR CAMPAÑA Y DE LOS ÍNDICES REFERENCIALES DE HIDROCARBUROS ALIFÁTICOS**



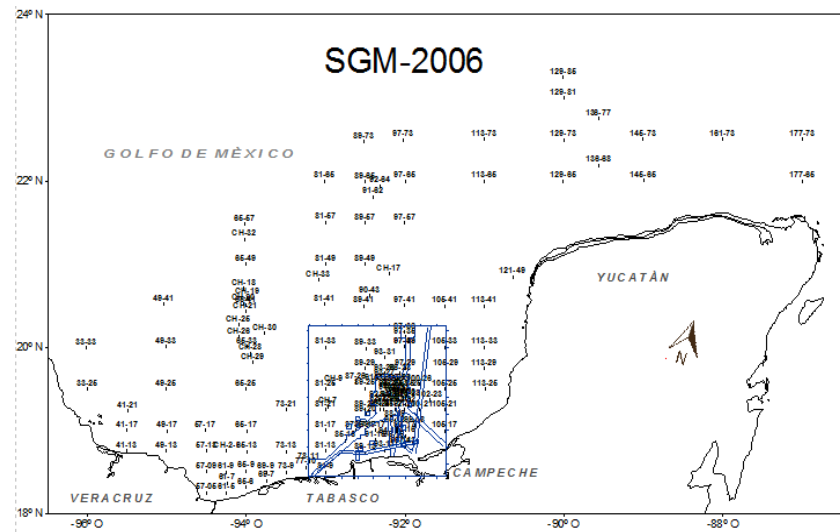
**Figura B-1 Estaciones crucero SGM-2003**



**Figura B-2 Estaciones crucero SGM-2004**



**Figura B-3 Estaciones crucero SGM-2005**



**Figura B-4 Estaciones crucero SGM-2006**

# HAT (1cm)

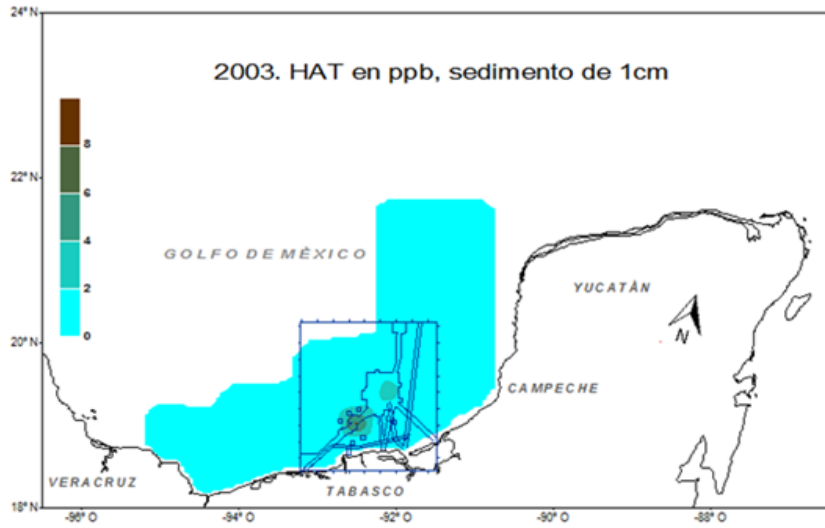


Figura B-5 HAT, 1 cm, SGM-2003

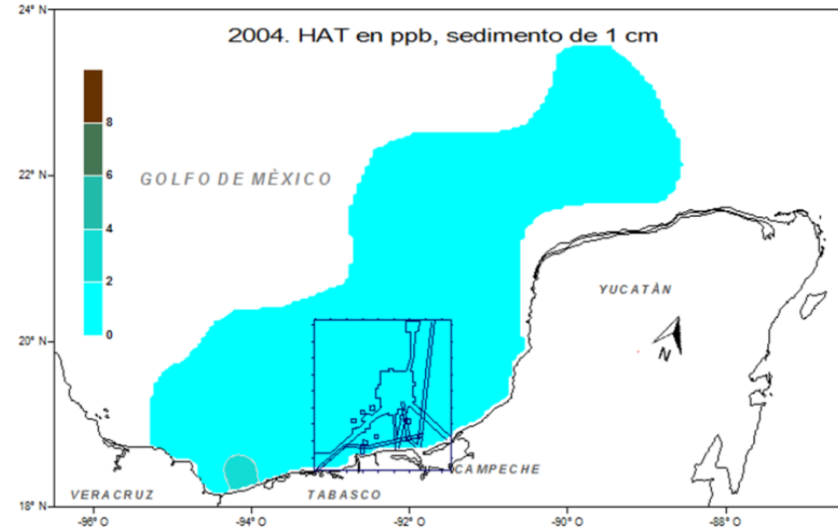


Figura B-6 HAT, 1 cm, SGM-2004

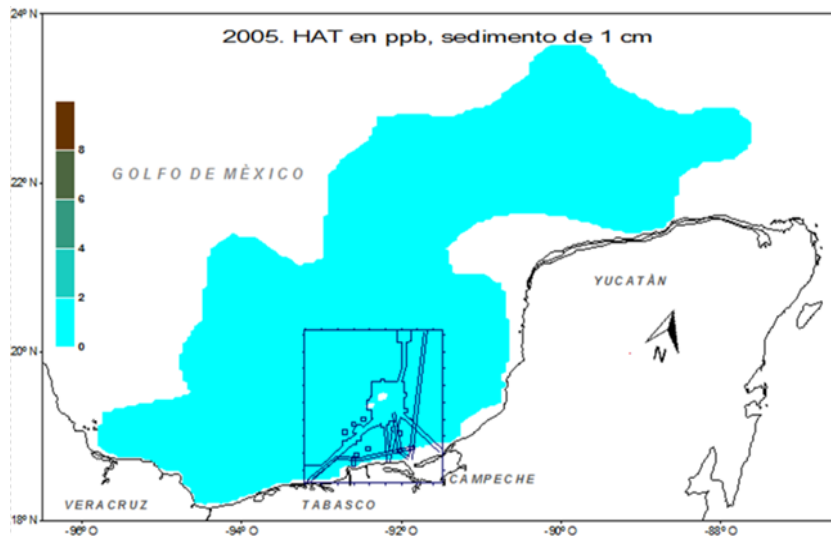


Figura B-7 HAT, 1 cm, SGM-2005

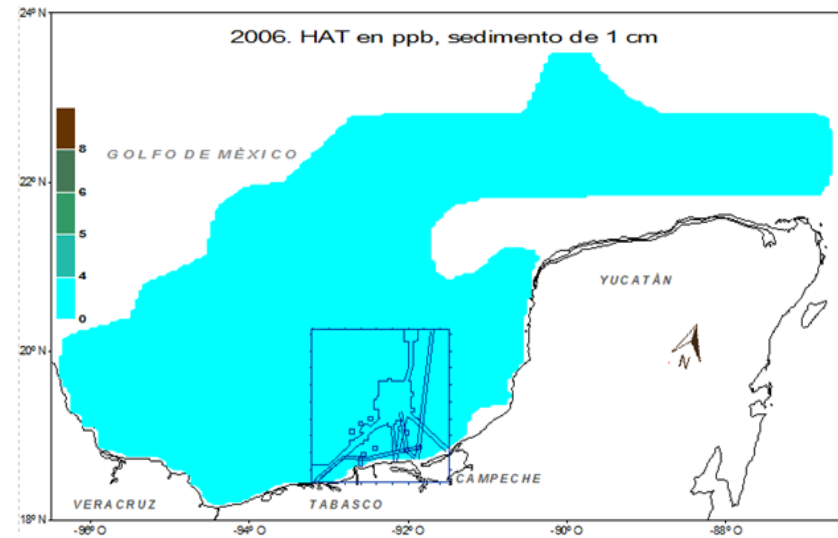


Figura B-8 HAT, 1 cm, SGM-2006

# HAT (5cm)

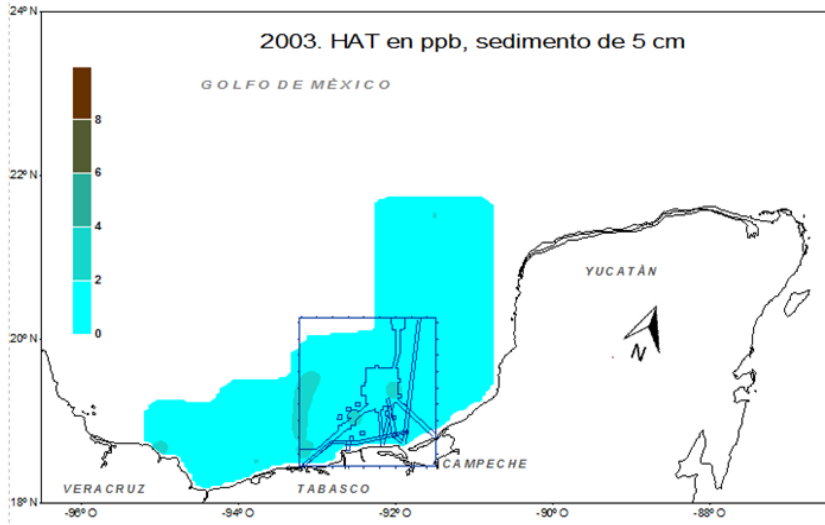


Figura B-9 HAT, 5 cm, SGM-2003

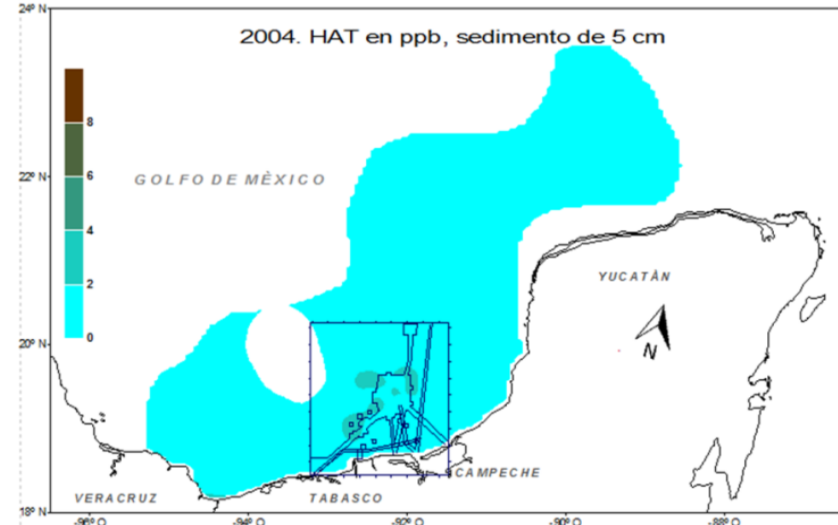


Figura B-10 HAT, 5 cm, SGM-2004

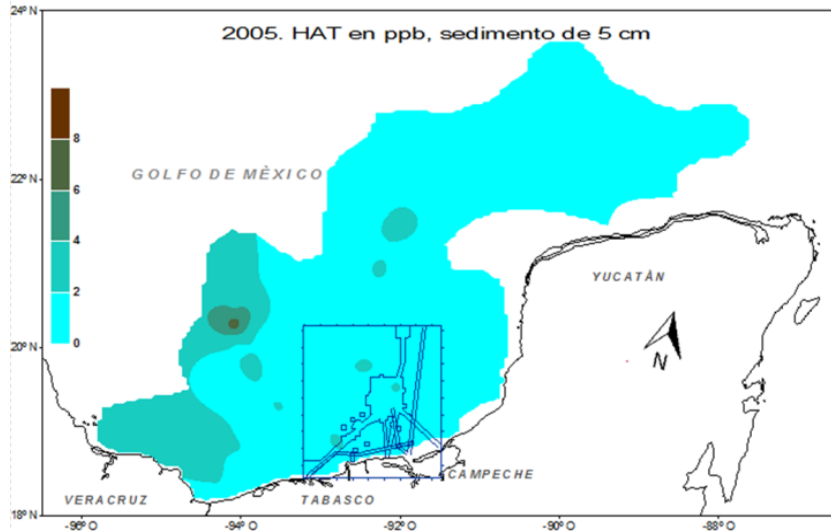


Figura B-11 HAT, 5 cm, SGM-2005

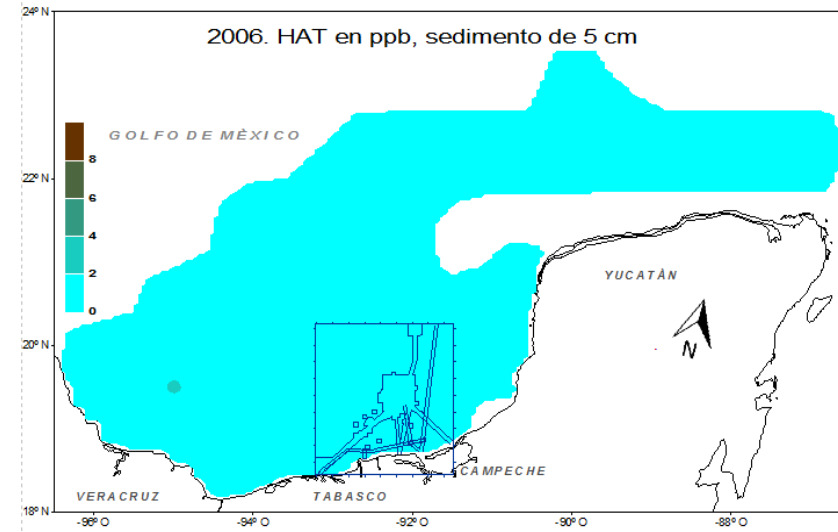


Figura B-12 HAT, 5 cm, SGM-2006

## HAT (10 cm)

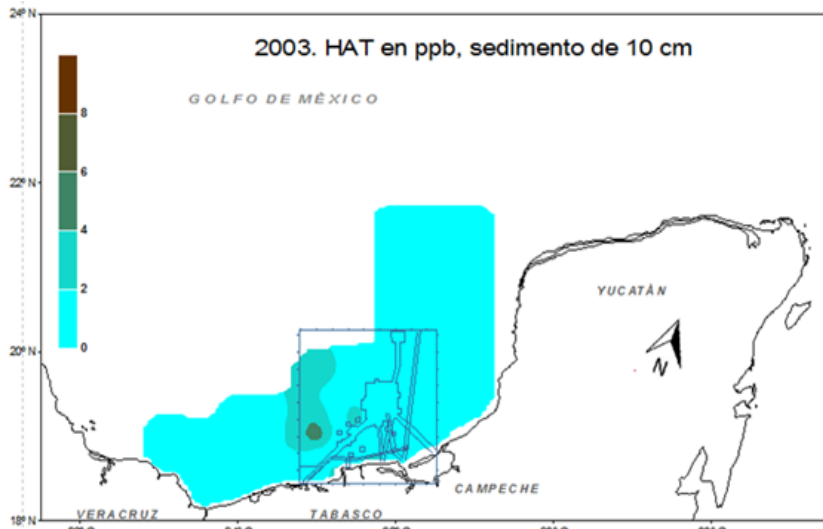


Figura B-13 HAT, 10 cm, SGM-2003

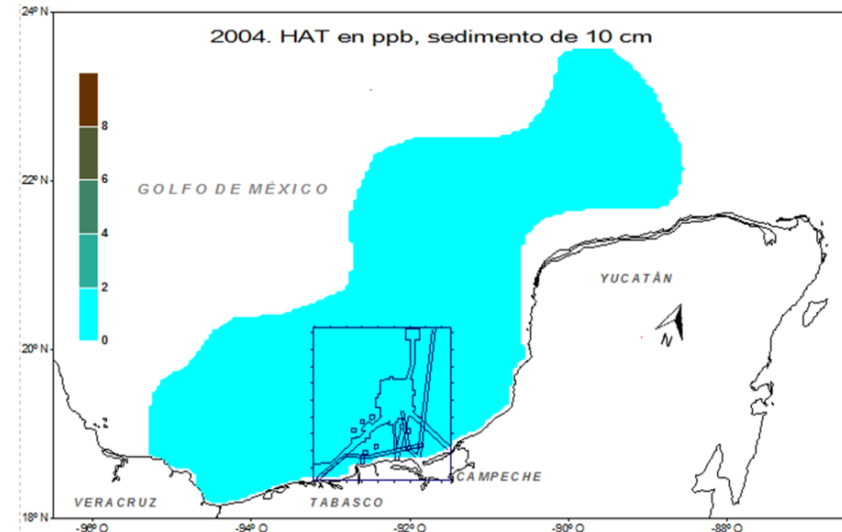


Figura B-14 HAT, 10 cm, SGM-2004

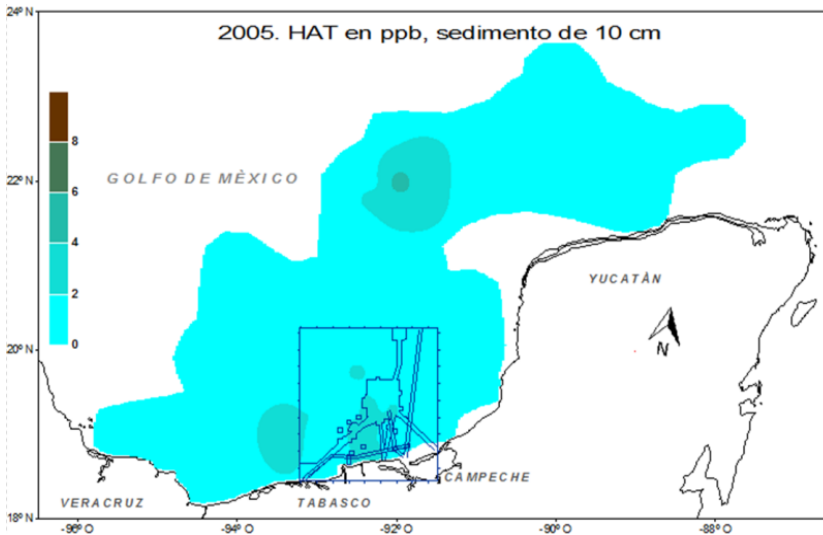


Figura B-15 HAT, 10 cm, SGM-2005

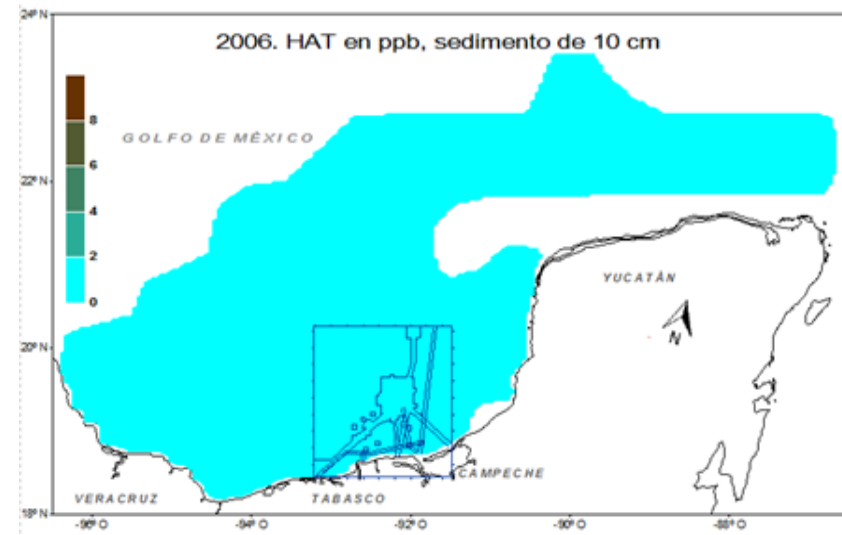
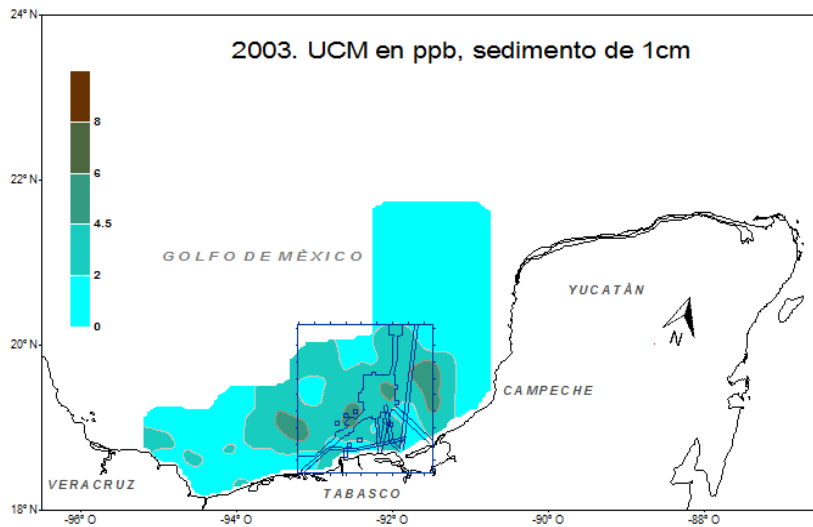


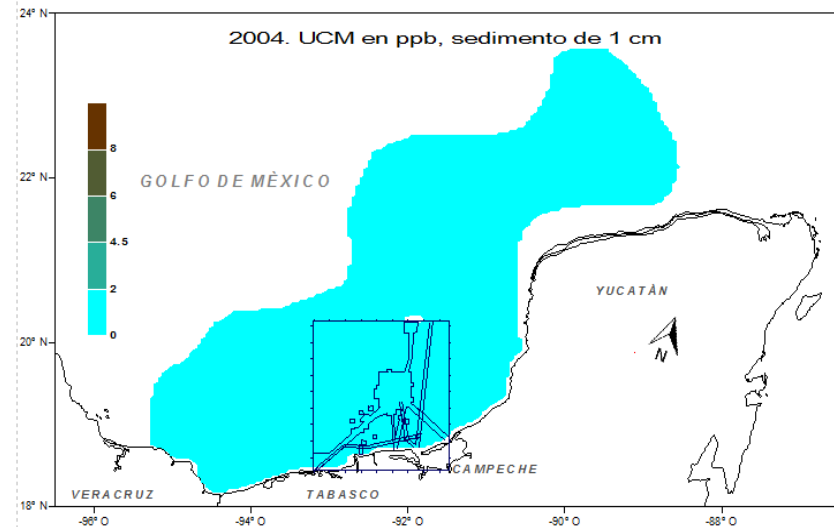
Figura B-16 HAT, 10 cm, SGM-2006



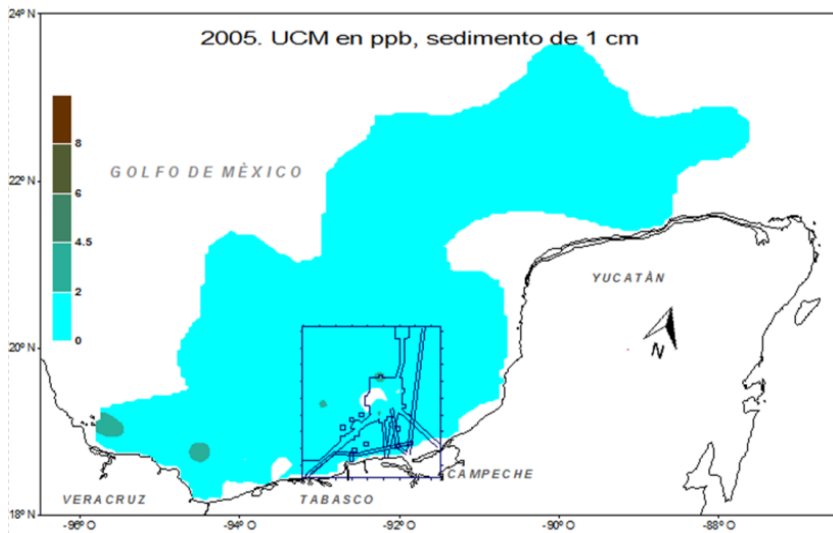
**UCM (1 cm)**



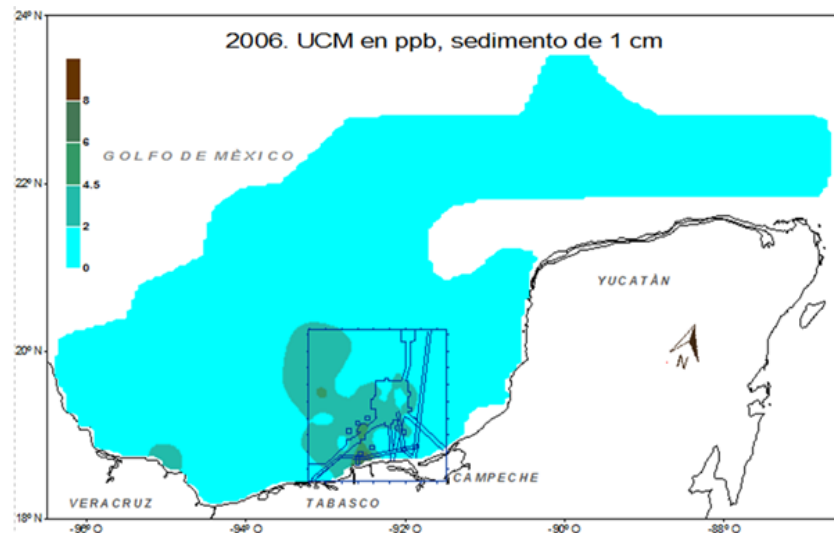
**Figura B-17 UCM, 1 cm, SGM-2003**



**Figura B-18 UCM, 1 cm, SGM-2004**

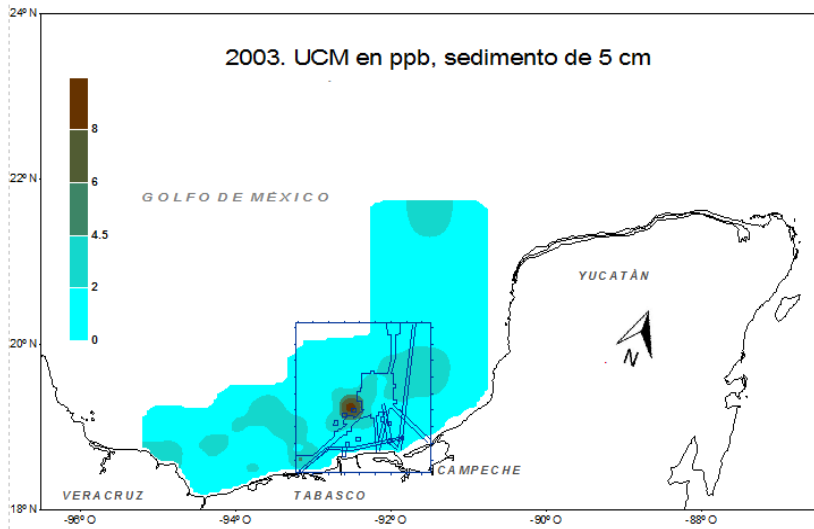


**Figura B-19 UCM, 1 cm, SGM-2005**

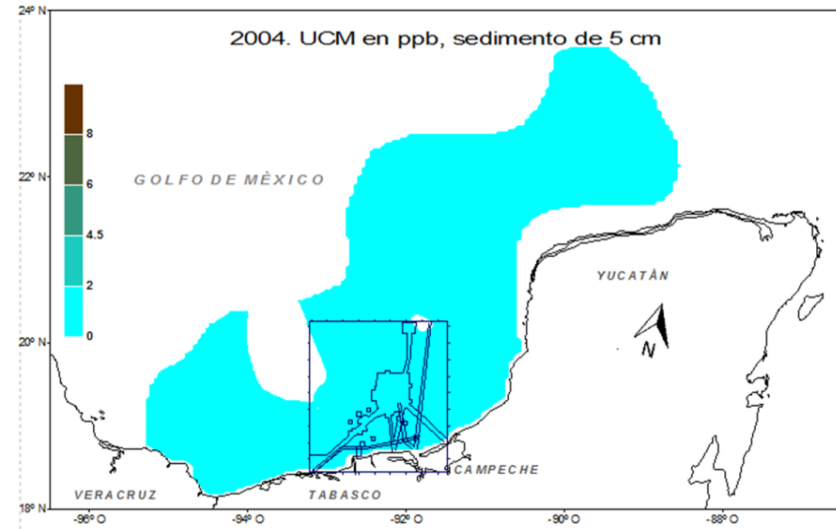


**Figura B-20 UCM, 1 cm, SGM-2006**

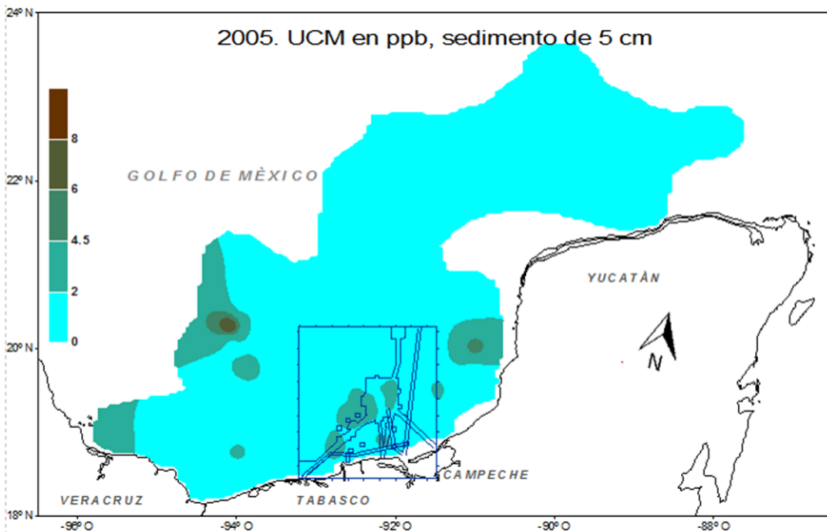
**UCM (5 cm)**



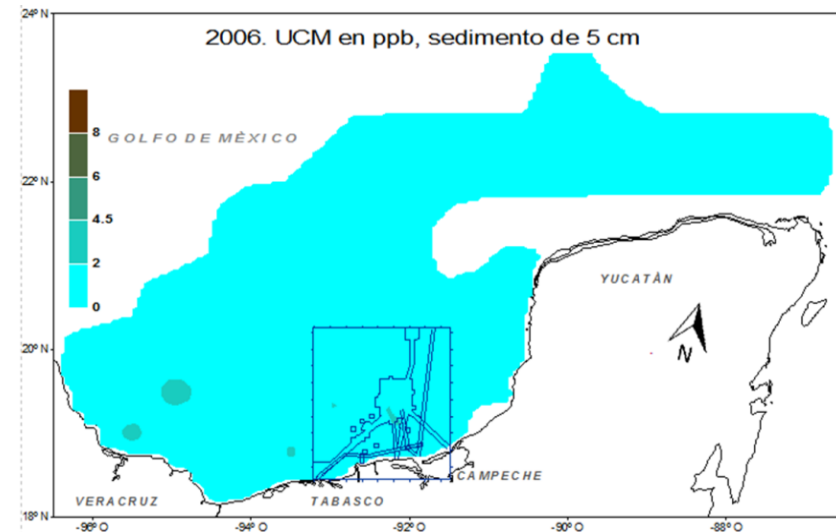
**Figura B-21 UCM, 5 cm, SGM-2003**



**Figura B-22 UCM, 5 cm, SGM-2004**

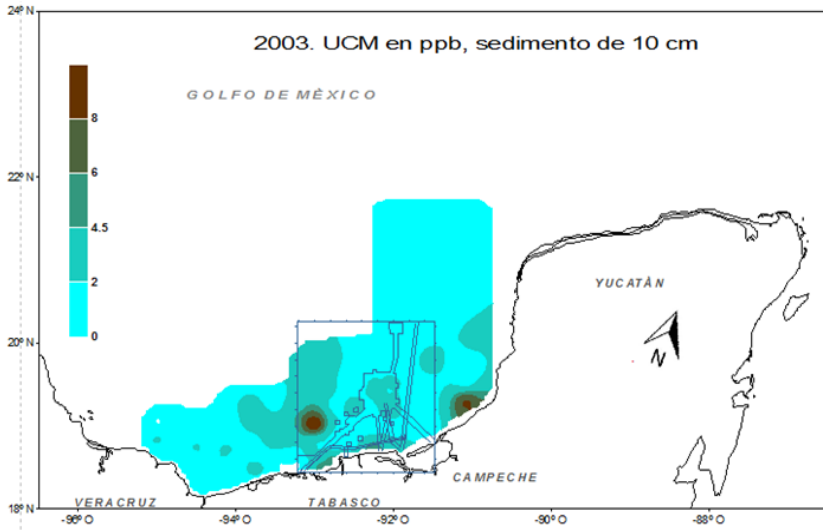


**Figura B-23 UCM, 5 cm, SGM-2005**

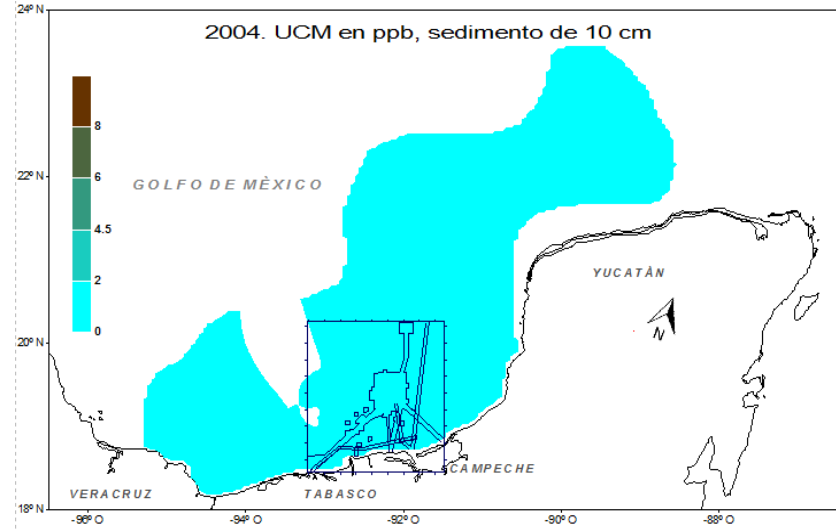


**Figura B-24 UCM, 5 cm, SGM-2006**

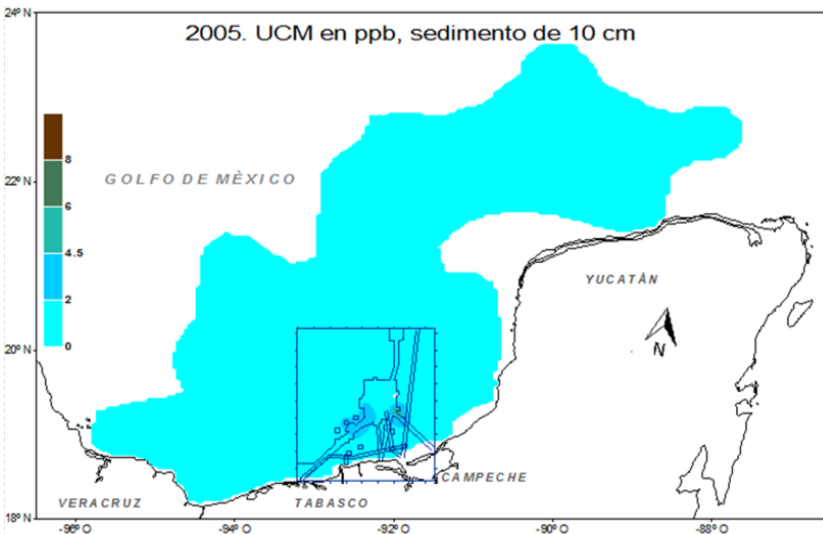
**UCM (10 cm)**



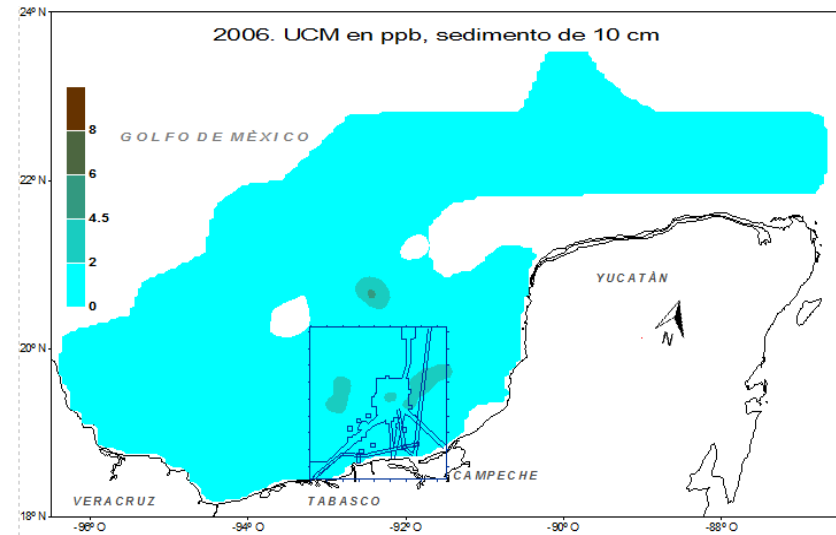
**Figura B-25 UCM, 10 cm, SGM-2003**



**Figura B-26 UCM, 10 cm, SGM-2004**



**Figura B-27 UCM, 10 cm, SGM-2005**



**Figura B-28 UCM, 10 cm, SGM-2006**

## IPC (1 cm)

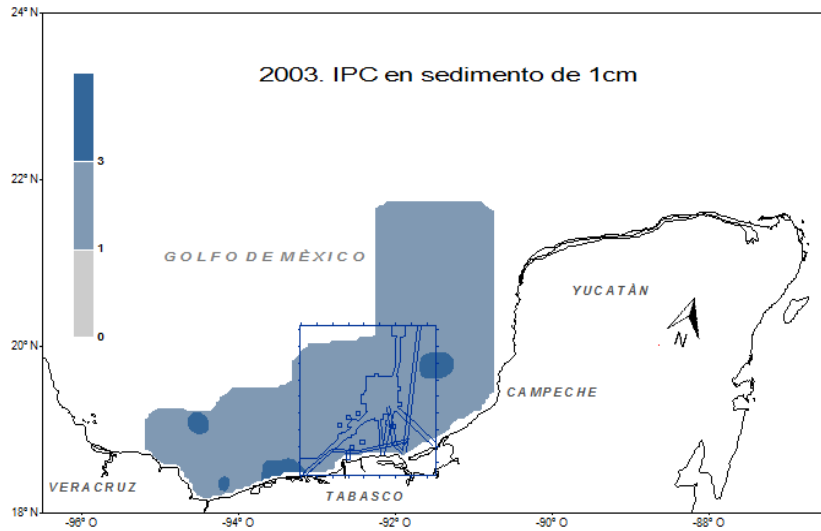


Figura B-29 IPC, 1 cm, SGM-2003

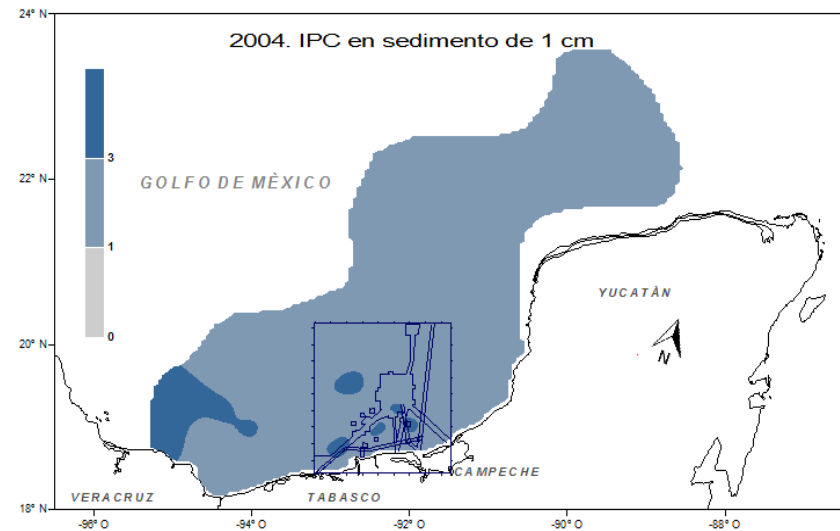


Figura B-30 IPC, 1 cm, SGM-2004

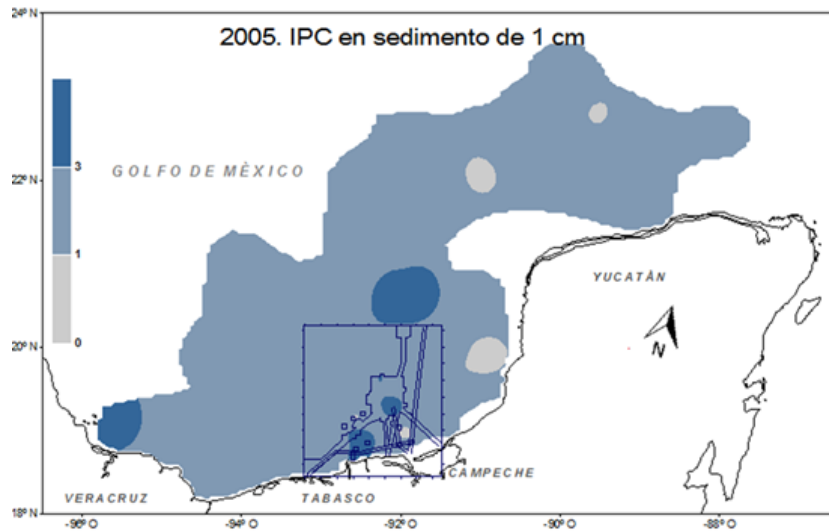


Figura B-31 IPC, 1 cm, SGM-2005

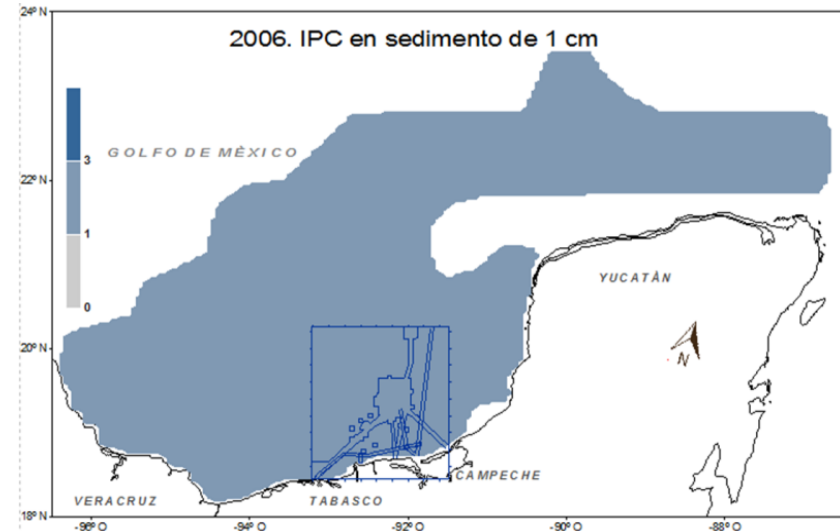


Figura B-32 IPC, 1 cm, SGM-2006

## IPC (5 cm)

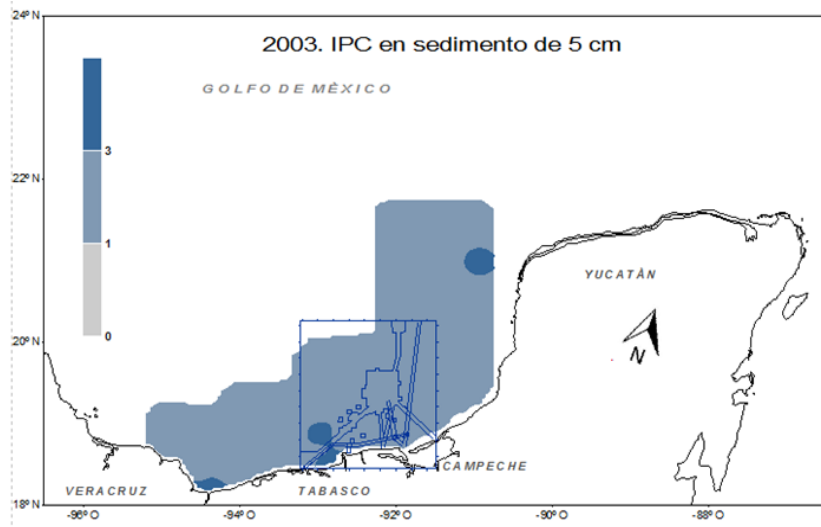


Figura B-33 IPC, 5 cm, SGM-2003

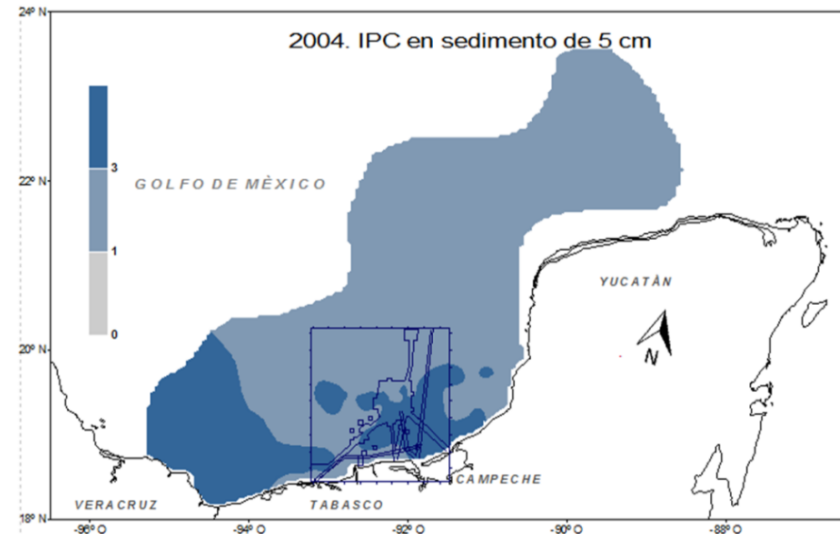


Figura B-34 IPC, 5 cm, SGM-2004

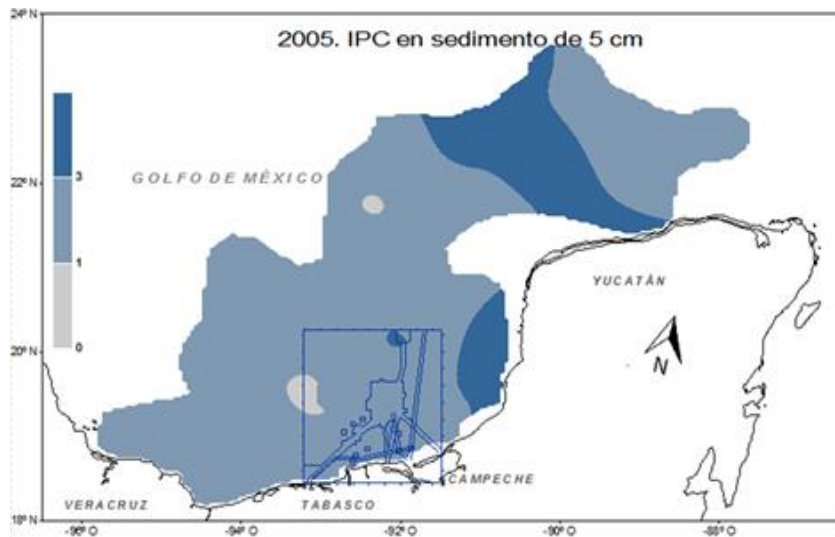


Figura B-35 IPC, 5 cm, SGM-2005

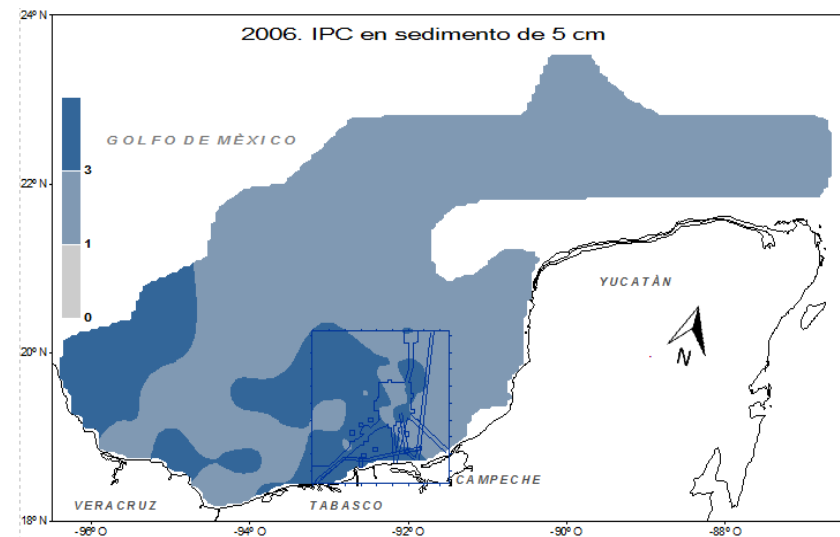


Figura B-36 IPC, 5 cm, SGM-2006

## IPC (10 cm)

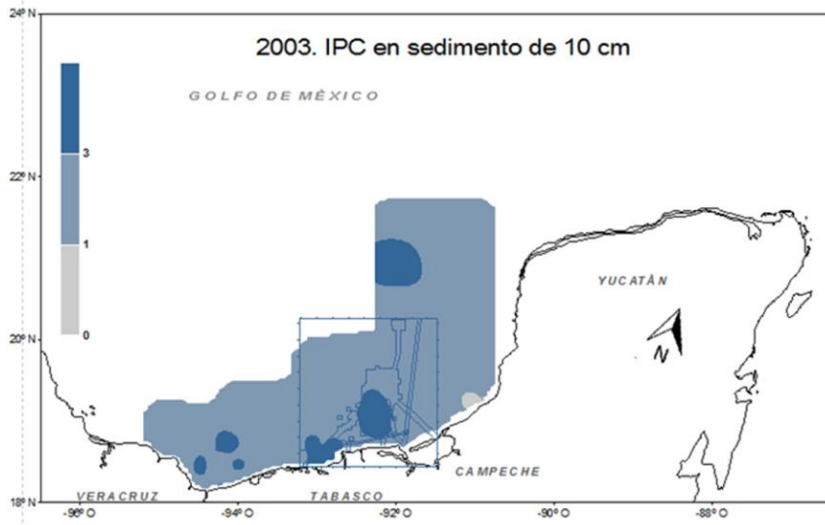


Figura B-37 IPC, 10 cm, SGM-2003

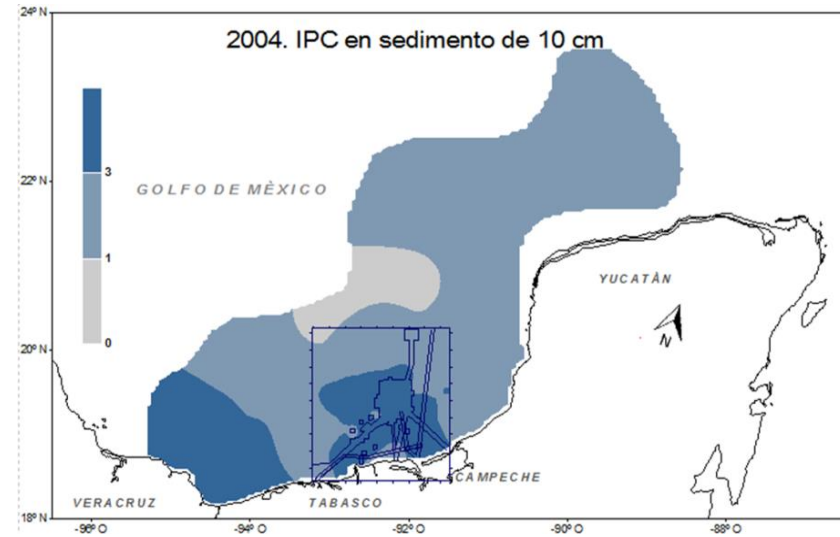


Figura B-38 IPC, 10 cm, SGM-2004

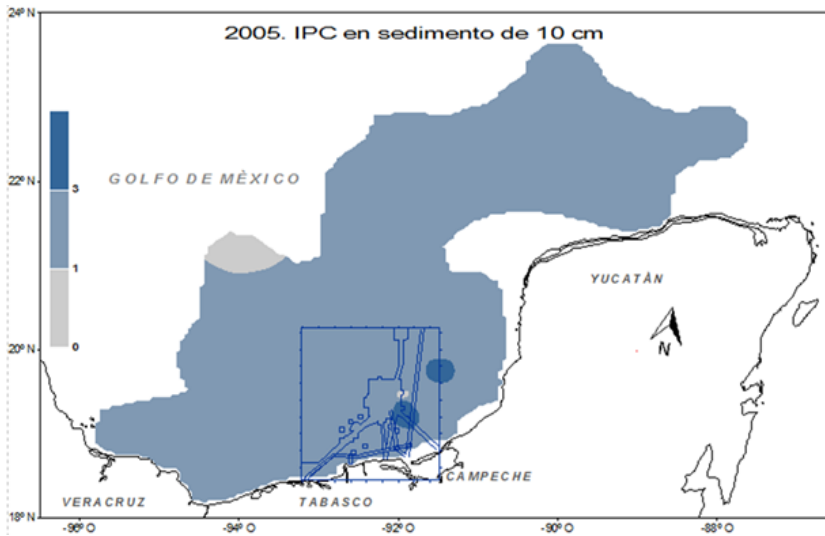


Figura B-39 IPC, 10 cm, SGM-2005

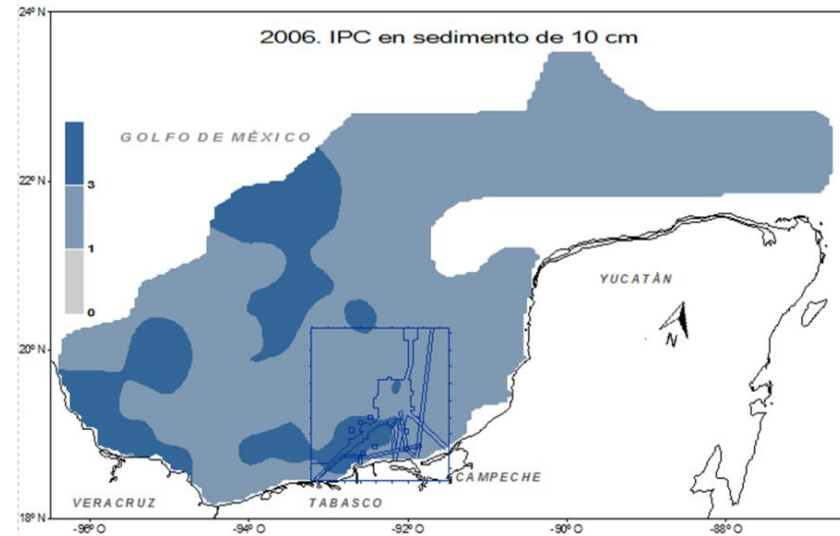


Figura B-40 IPC, 10 cm, SGM-2006

**pri/fit (1 cm)**

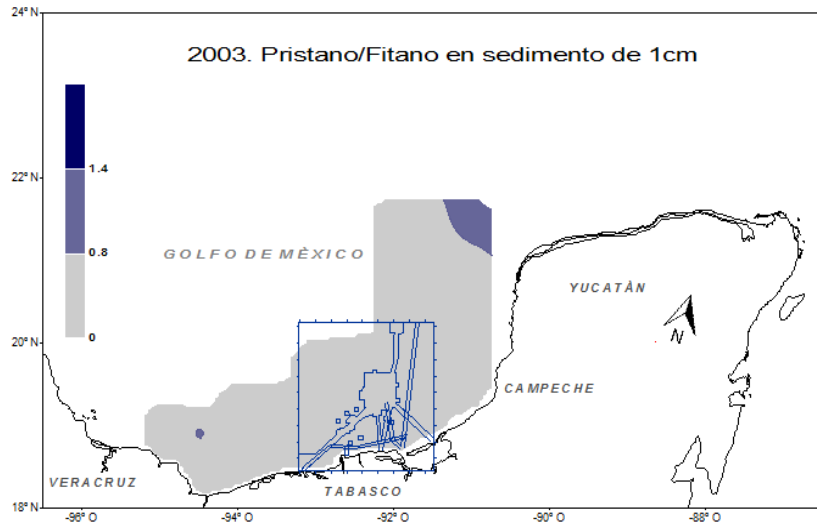


Figura B-41 pri/fit, 1 cm, SGM-2003

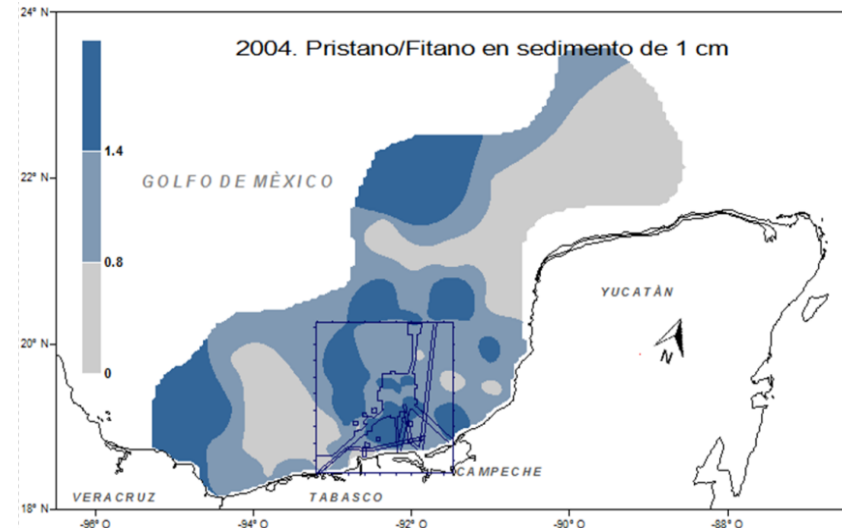


Figura B-42 pri/fit, 1 cm, SGM-2004

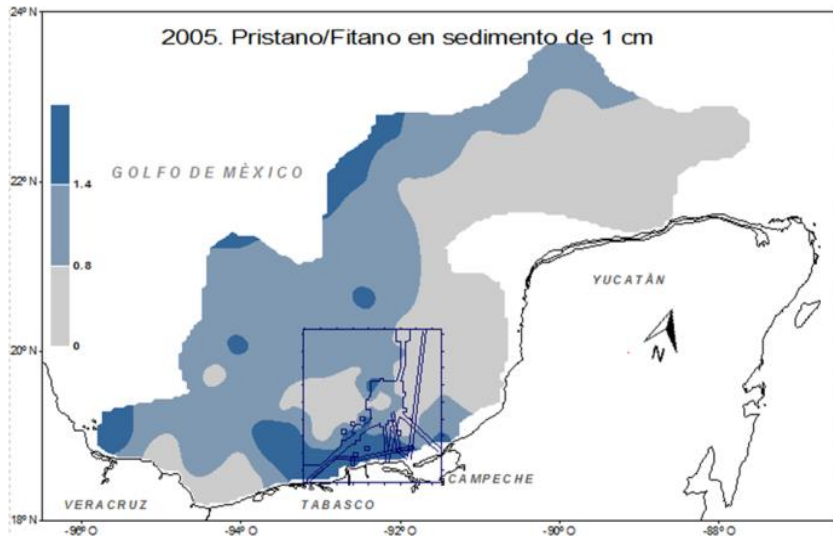


Figura B-43 pri/fit, 1 cm, SGM-2005

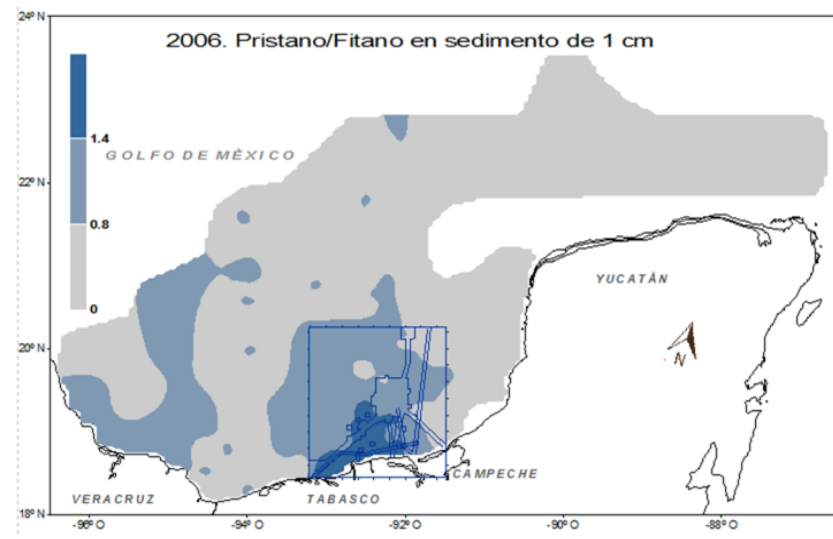
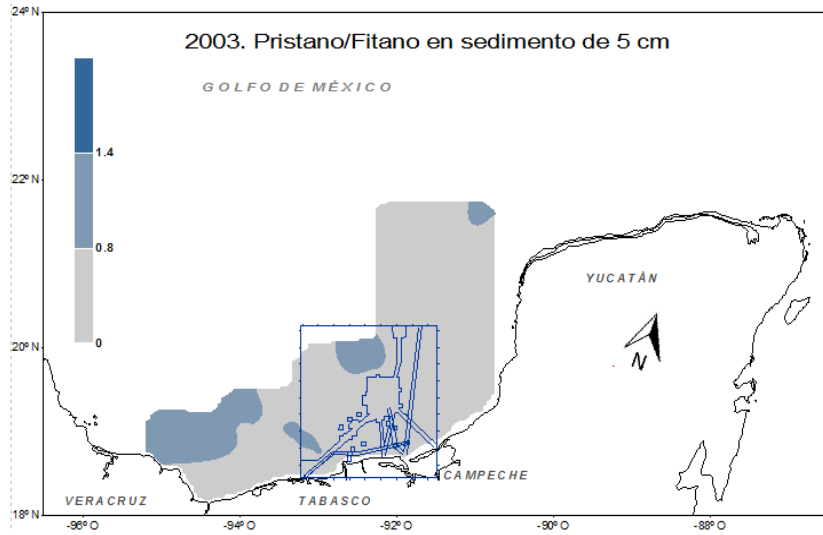


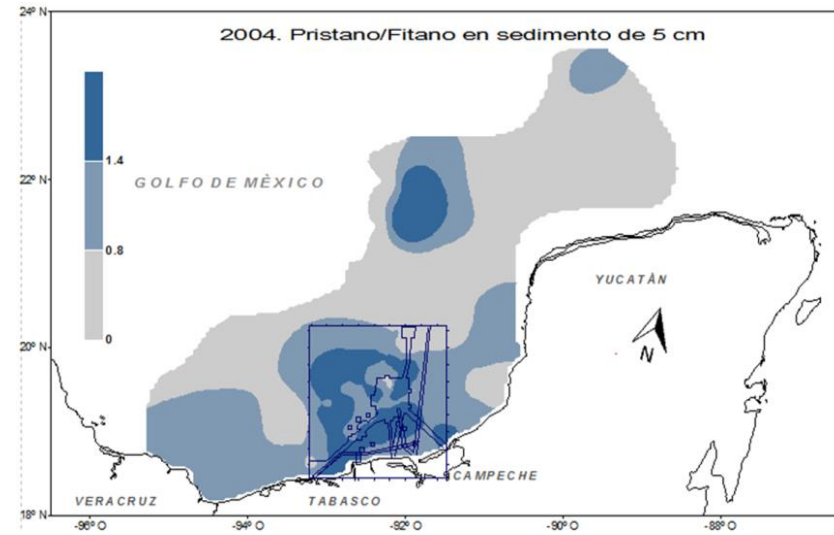
Figura B-44 pri/fit, 1 cm, SGM-2006



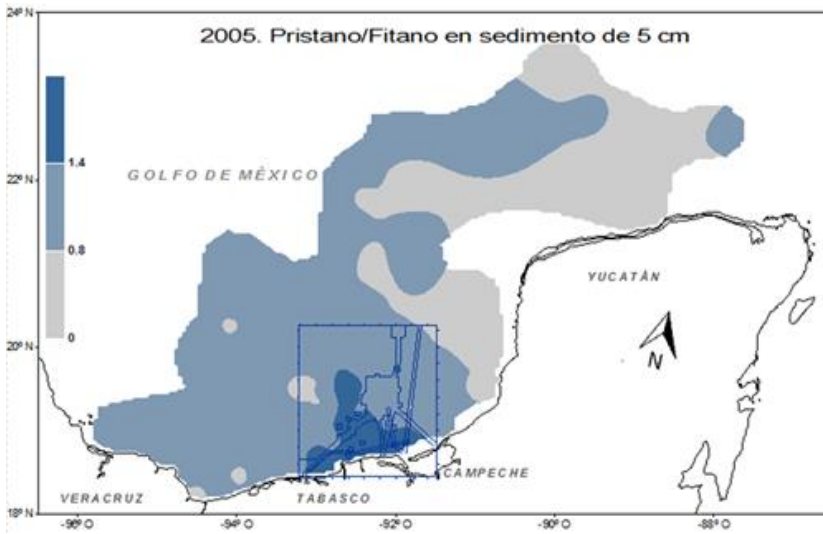
**pri/fit (5 cm)**



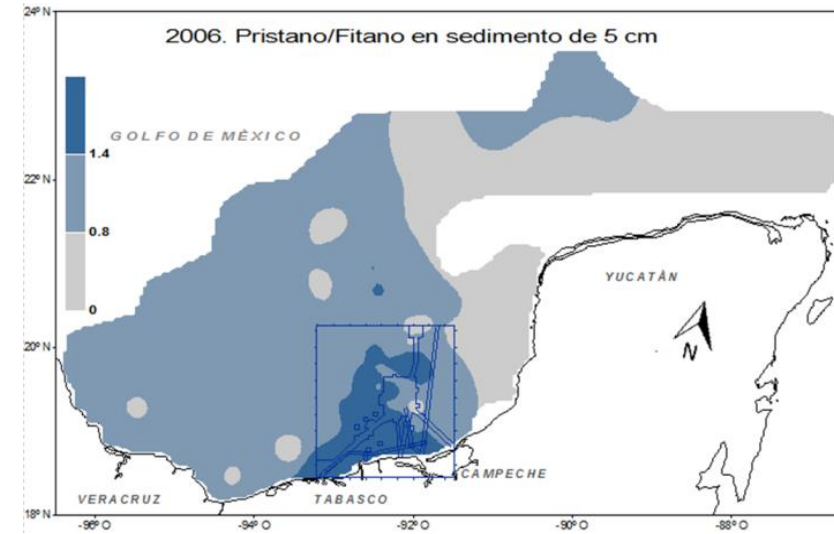
**Figura B-45 pri/fit, 5 cm, SGM-2003**



**Figura B-46 pri/fit, 5 cm, SGM-2004**



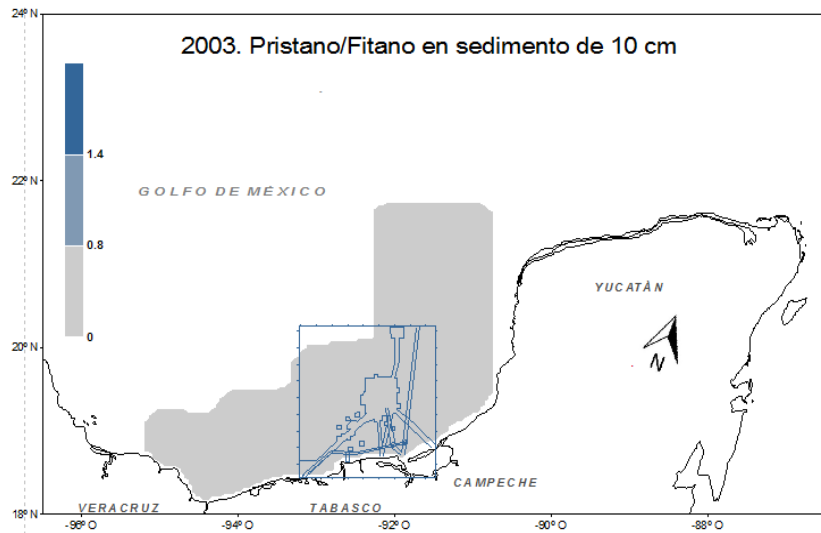
**Figura B-47 pri/fit, 5 cm, SGM-2005**



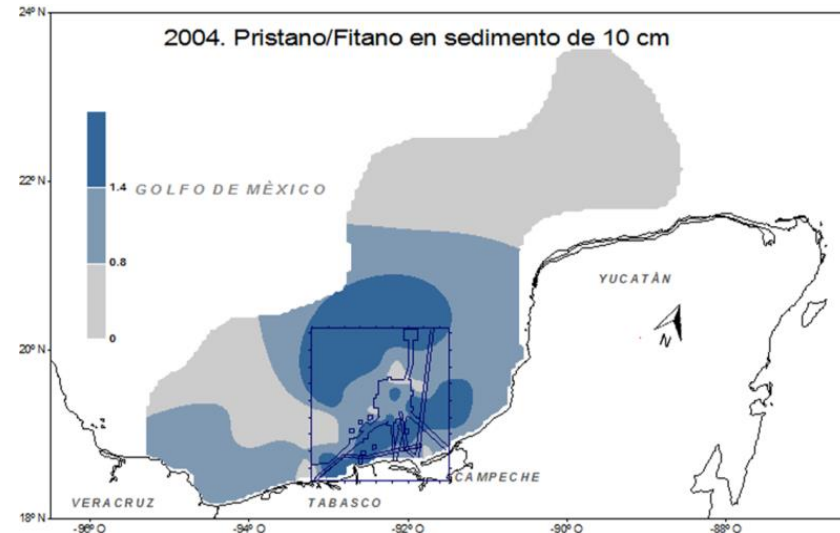
**Figura B-48 pri/fit, 5 cm, SGM-2006**



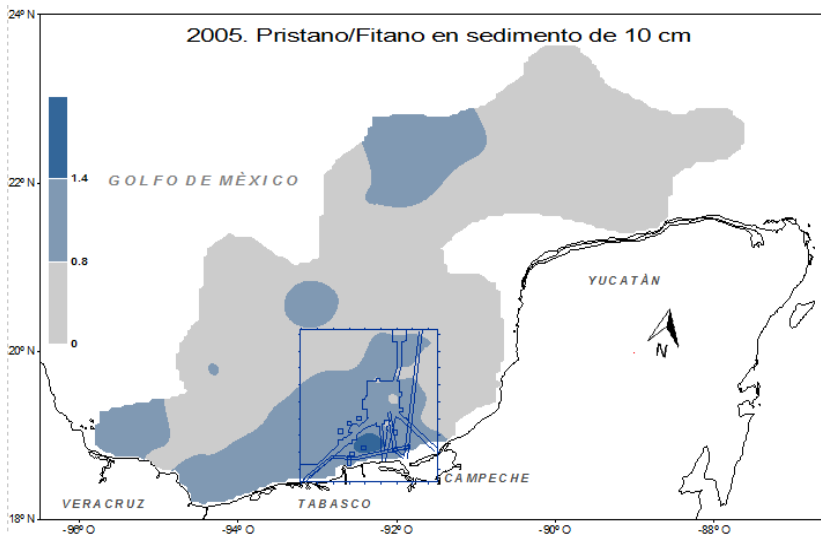
**pri/fit (10 cm)**



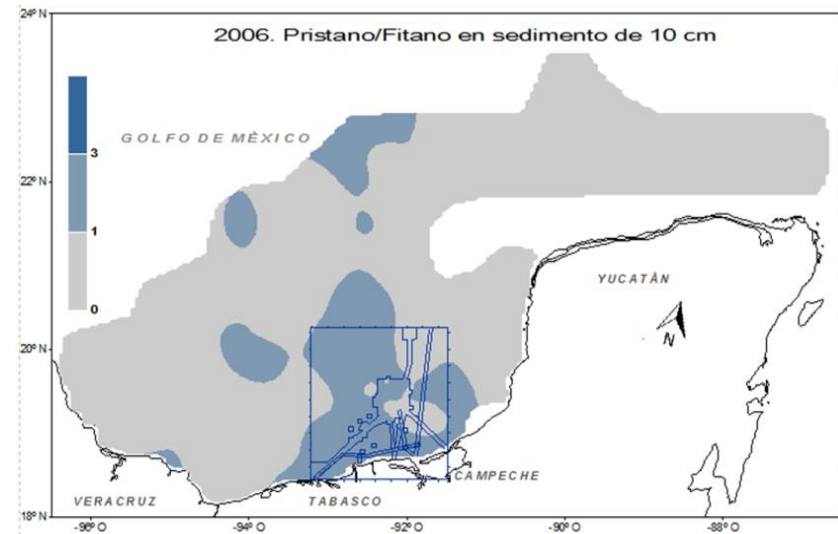
**Figura B-49 pri/fit, 10 cm, SGM-2003**



**Figura B-50 pri/fit, 10 cm, SGM-2004**



**Figura B-51 pri/fit, 10 cm, SGM-2005**



**Figura B-52 pri/fit, 10 cm, SGM-2006**

**nC<sub>17</sub>/pri (1 cm)**

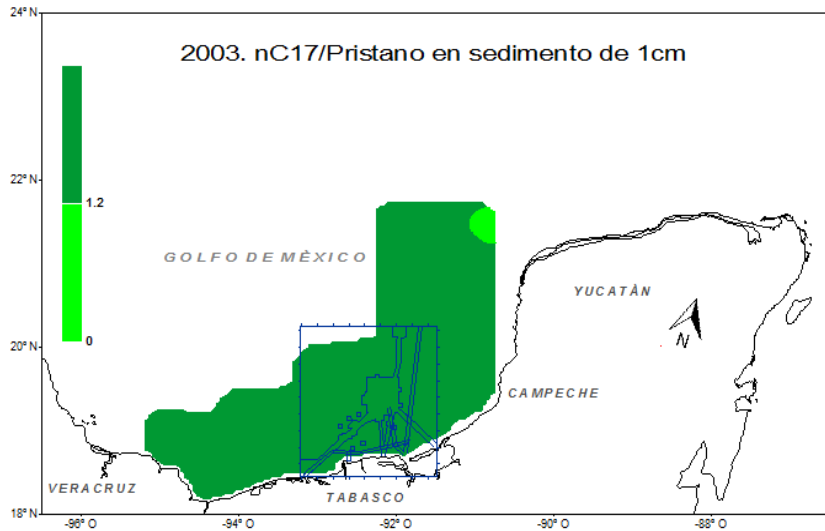


Figura B-53 nC<sub>17</sub>/pri, 1 cm, SGM-2003

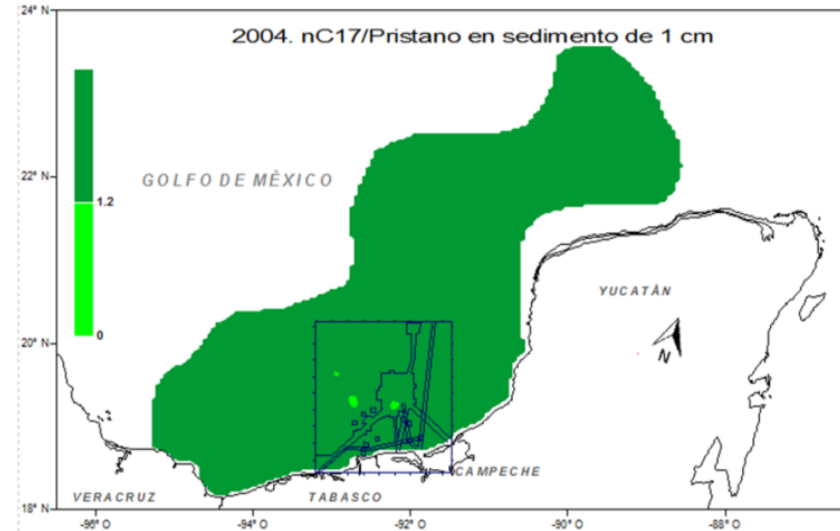


Figura B-54 nC<sub>17</sub>/pri, 1 cm, SGM-2004

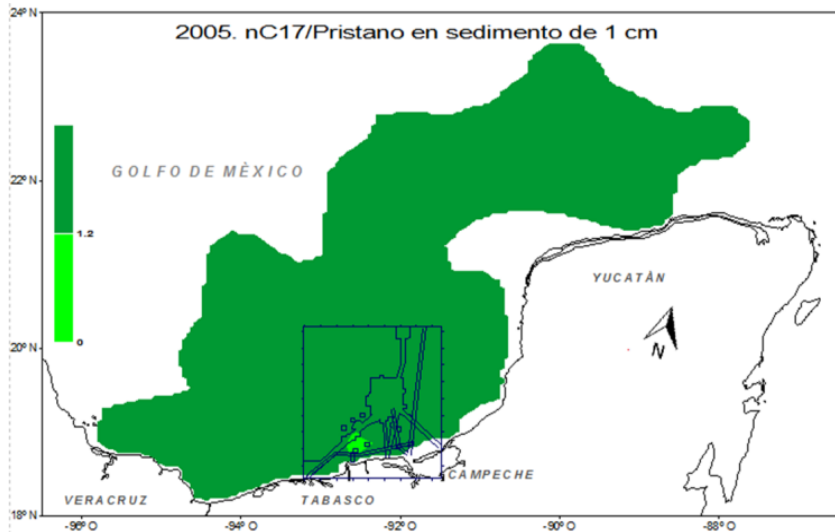


Figura B-55 nC<sub>17</sub>/pri, 1 cm, SGM-2005

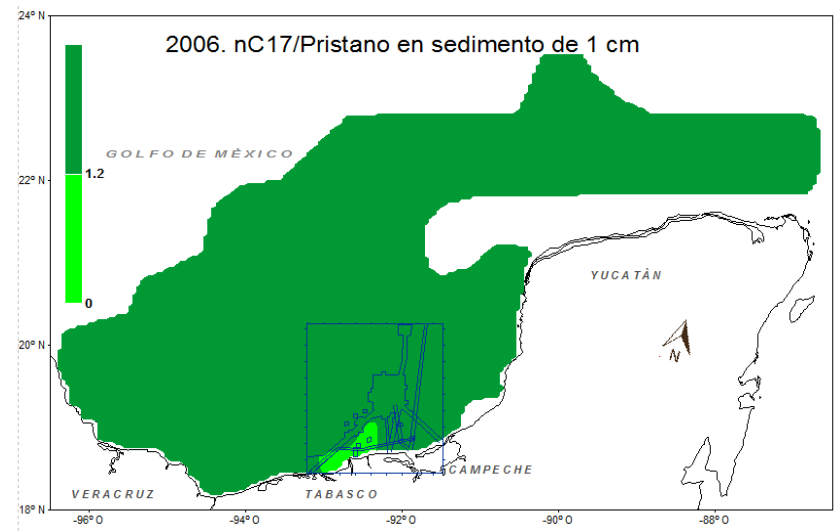


Figura B-56 nC<sub>17</sub>/pri, 1 cm, SGM-2006

$nC_{17}/pri$  (5 cm)

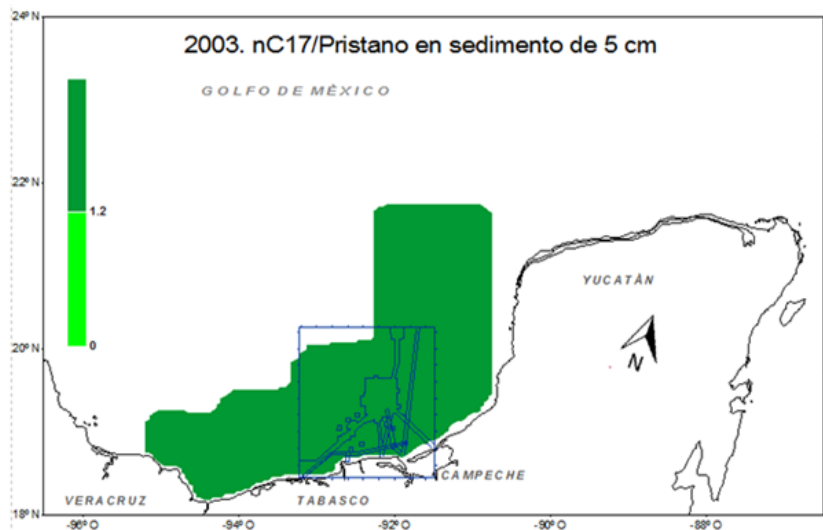


Figura B-57  $nC_{17}/pri$ , 5 cm, SGM-2003

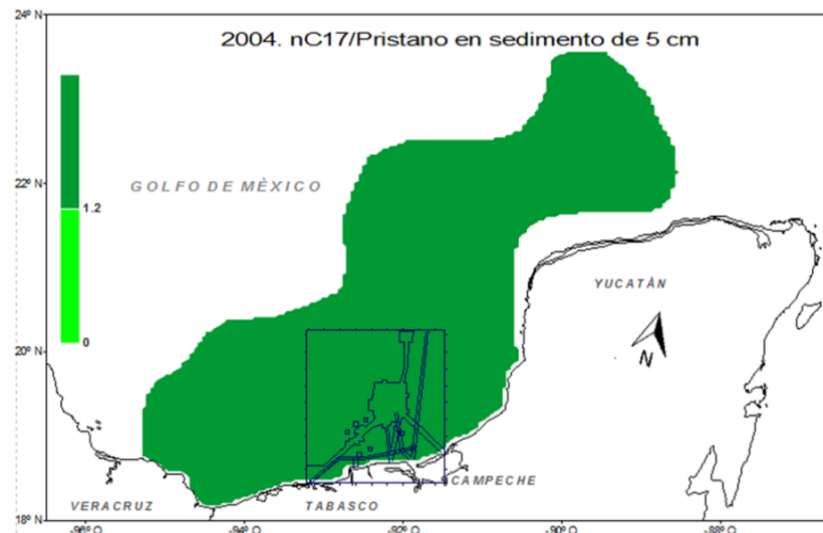


Figura B-58  $nC_{17}/pri$ , 5 cm, SGM-2004

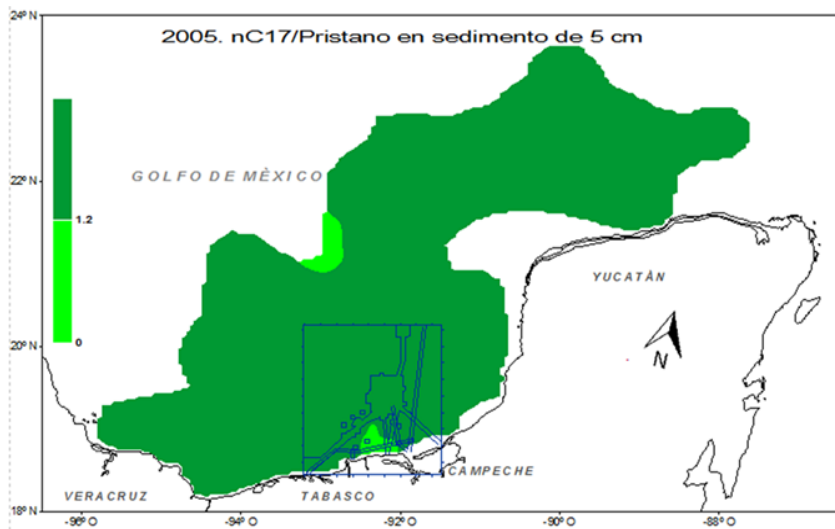


Figura B-59  $nC_{17}/pri$ , 5 cm, SGM-2005

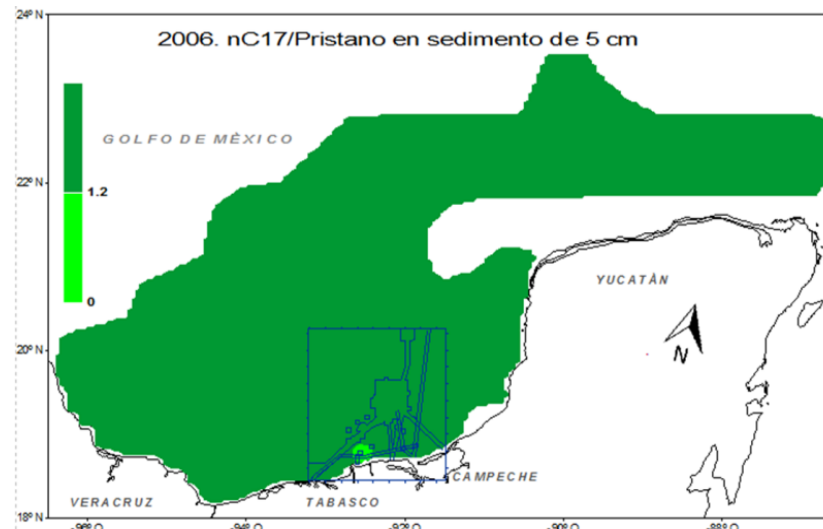


Figura B-60  $nC_{17}/pri$ , 5 cm, SGM-2006

$nC_{17}/pri$  (10 cm)

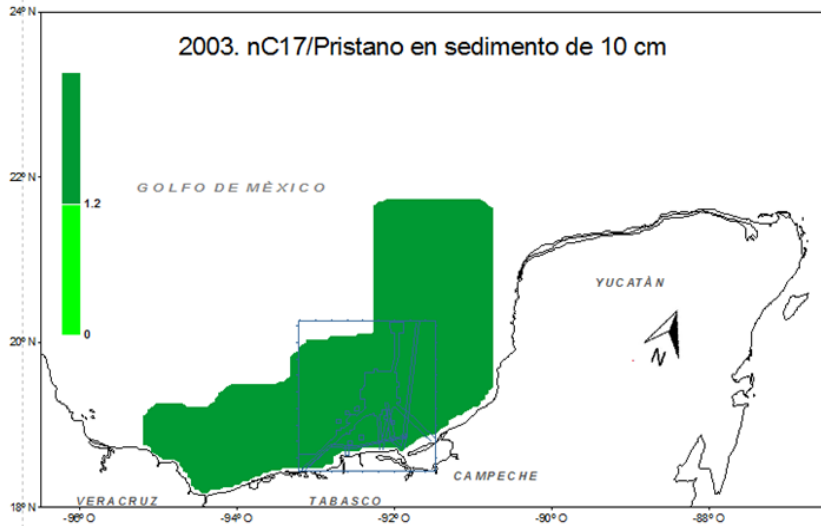


Figura B-61  $nC_{17}/pri$ , 10 cm, SGM-2003

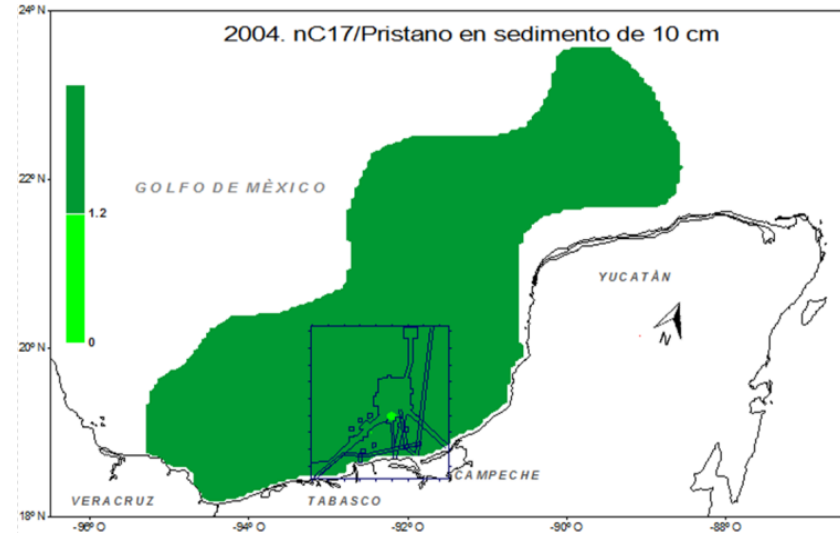


Figura B-62  $nC_{17}/pri$ , 10 cm, SGM-2004

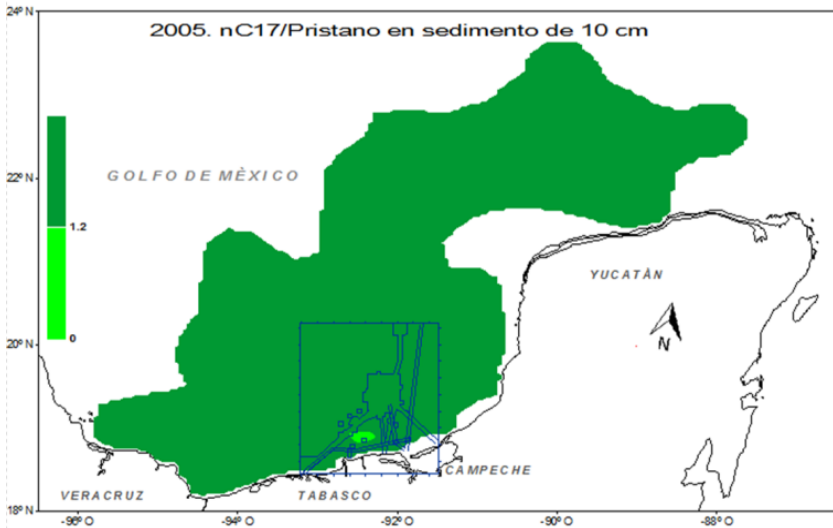


Figura B-63  $nC_{17}/pri$ , 10 cm, SGM-2005

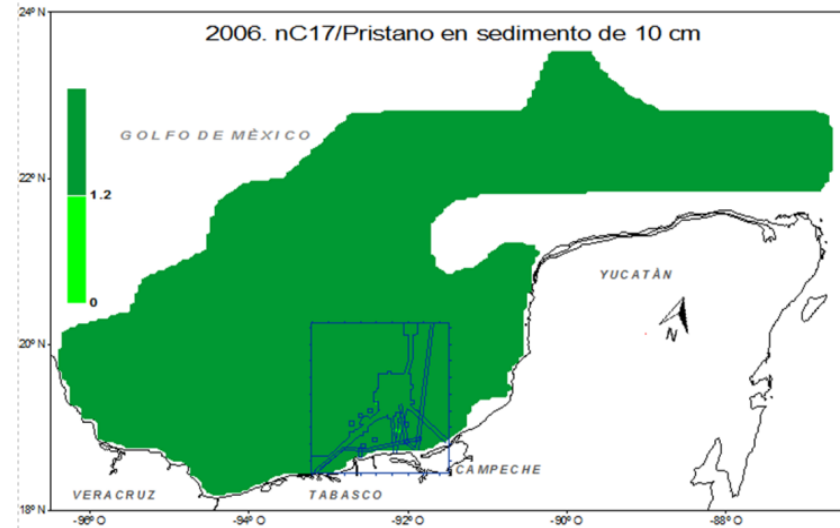


Figura B-64  $nC_{17}/pri$ , 10 cm, SGM-2006

**nC<sub>18</sub>/fit (1 cm)**

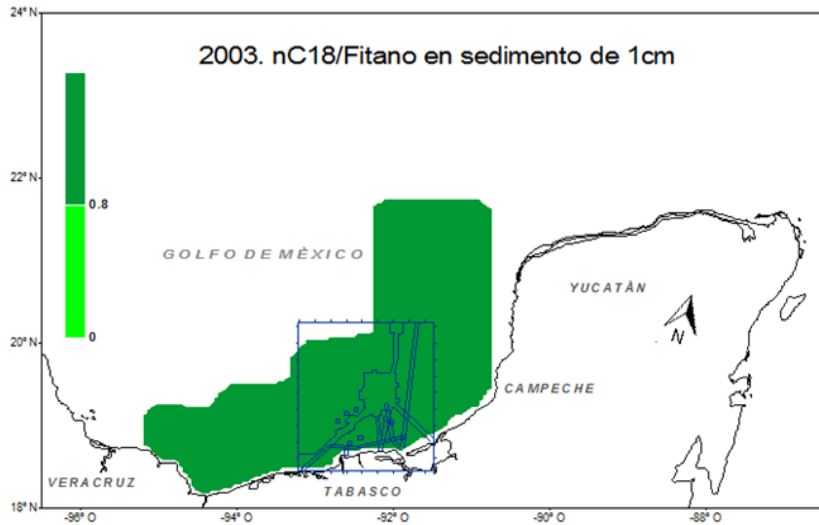


Figura B-65 nC<sub>18</sub>/fit, 1 cm, SGM-2003

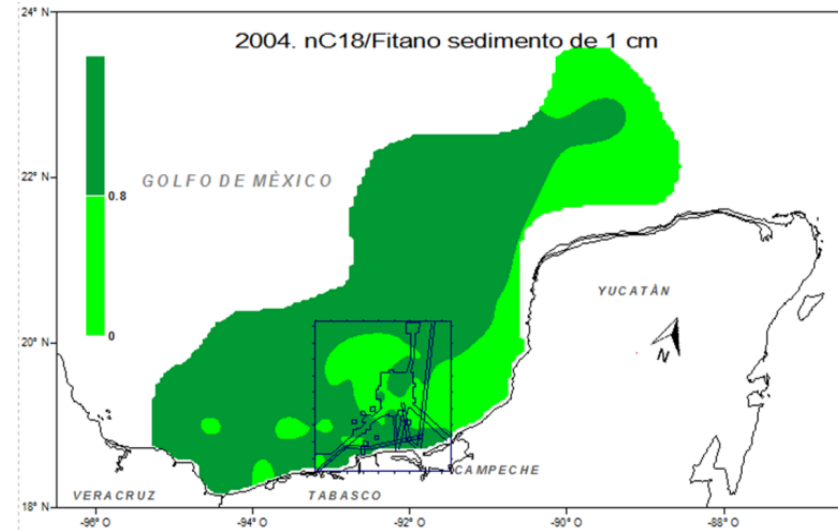


Figura B-66 nC<sub>18</sub>/fit, 1 cm, SGM-2004

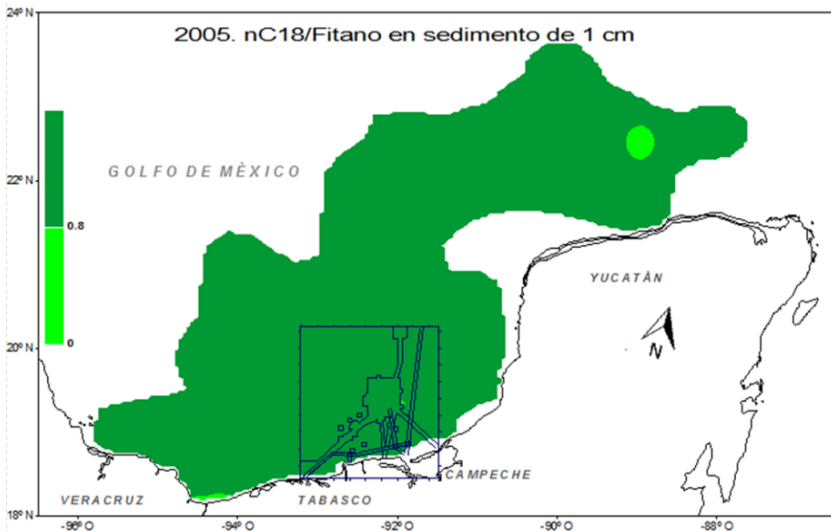


Figura B-67 nC<sub>18</sub>/fit, 1 cm, SGM-2005

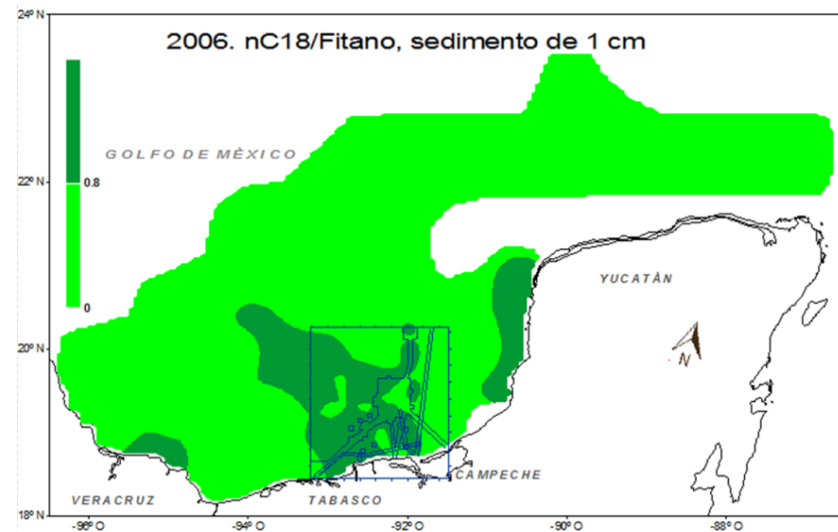


Figura B-68 nC<sub>18</sub>/fit, 1 cm, SGM-2006

**nC<sub>18</sub>/fit (5 cm)**

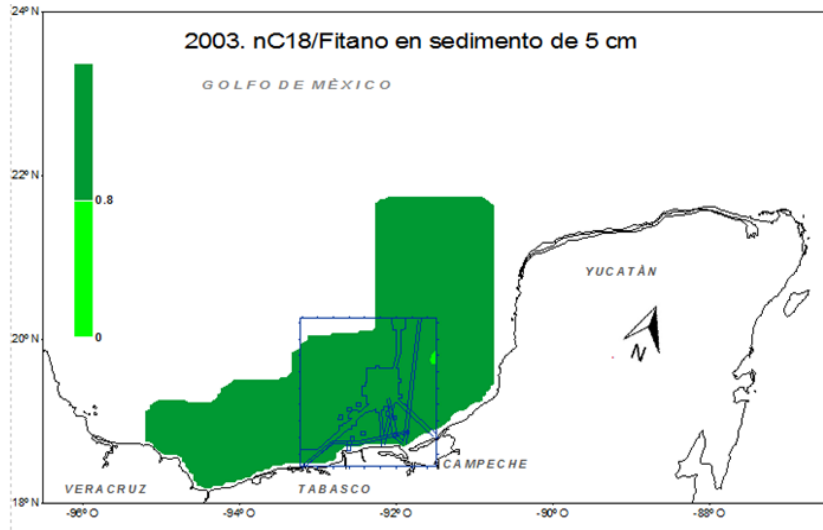


Figura B-69 nC<sub>18</sub>/fit, 5 cm, SGM-2003

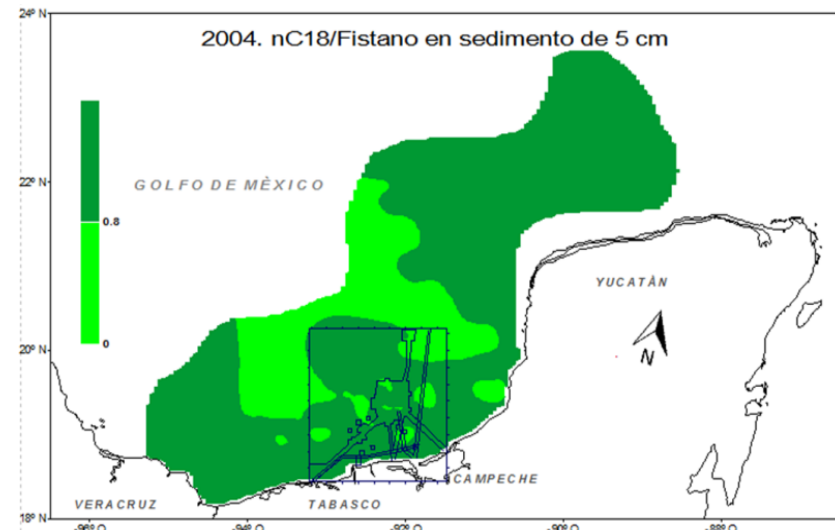


Figura B-70 nC<sub>18</sub>/fit, 5 cm, SGM-2004

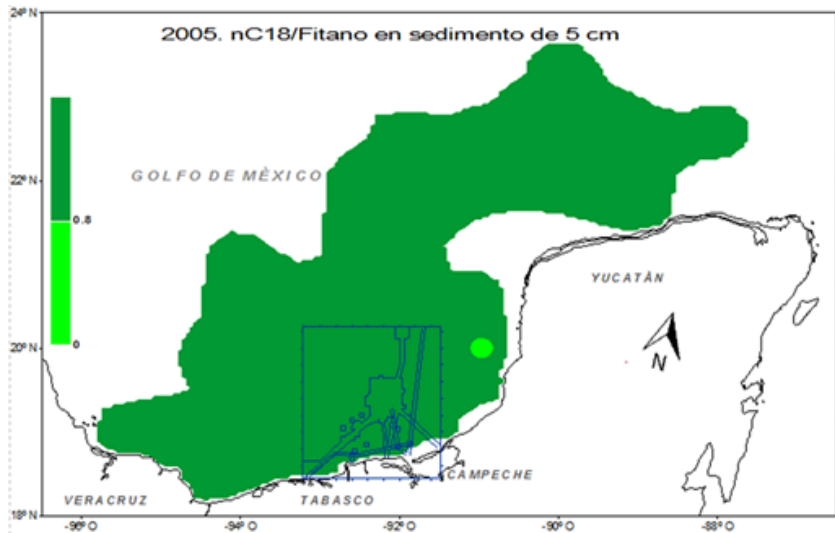


Figura B-71 nC<sub>18</sub>/fit, 5 cm, SGM-2005

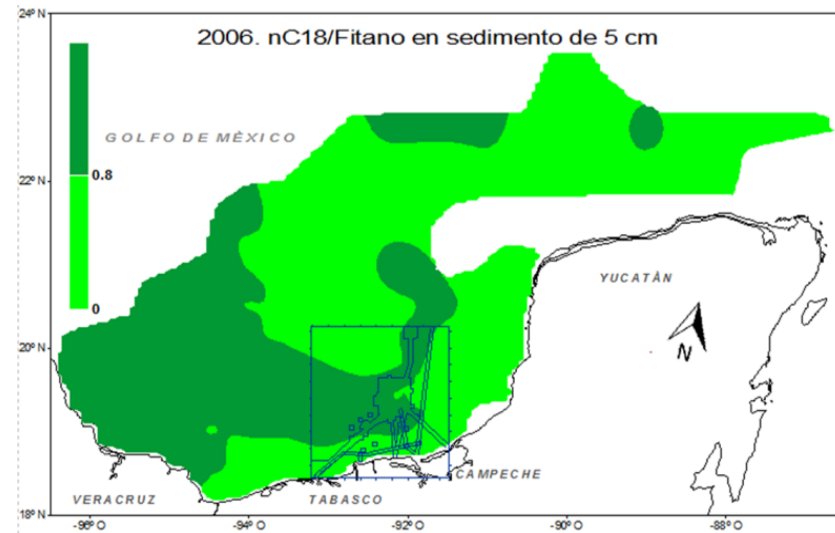
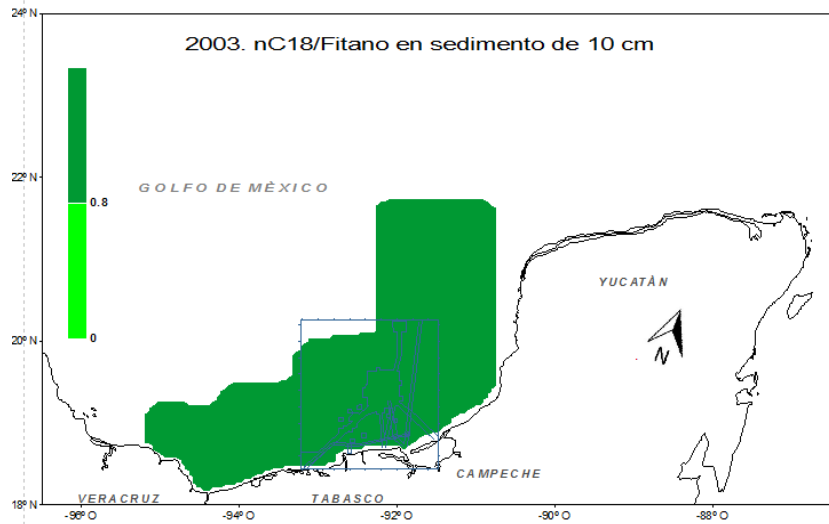
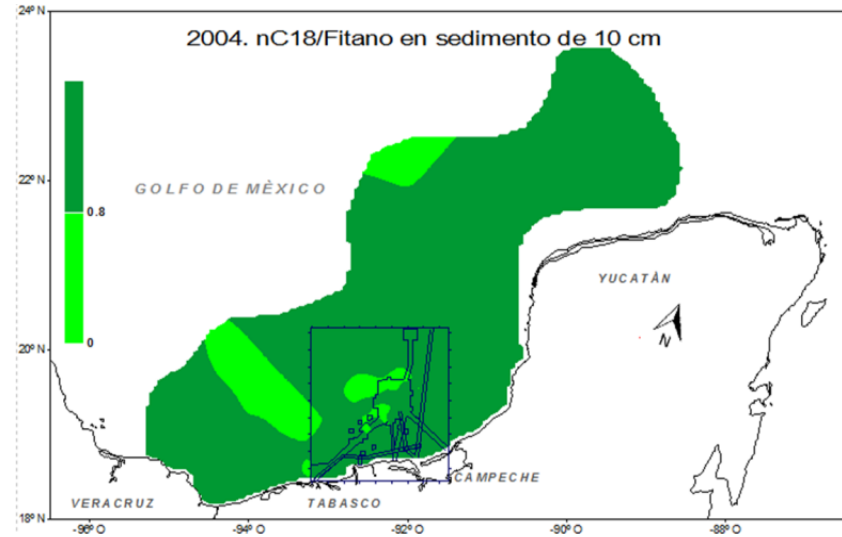


Figura B-72 nC<sub>18</sub>/fit, 5 cm, SGM-2006

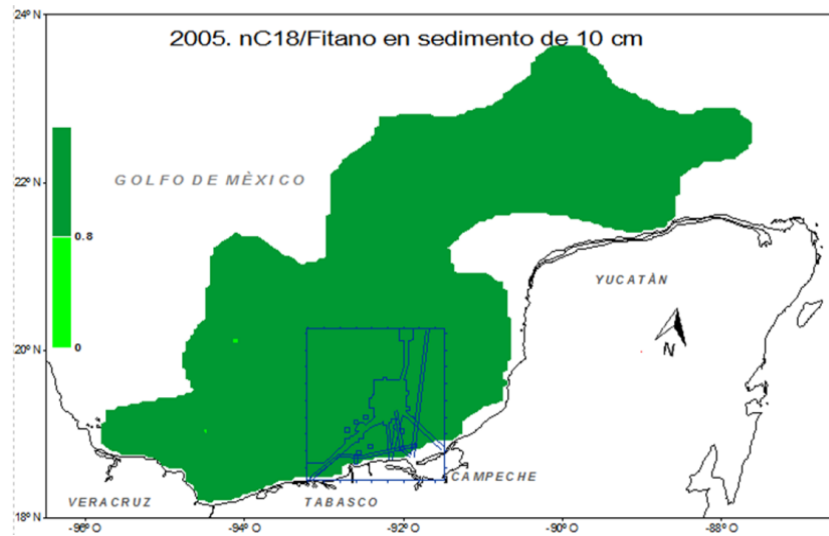
**nC<sub>18</sub>/fit (10 cm)**



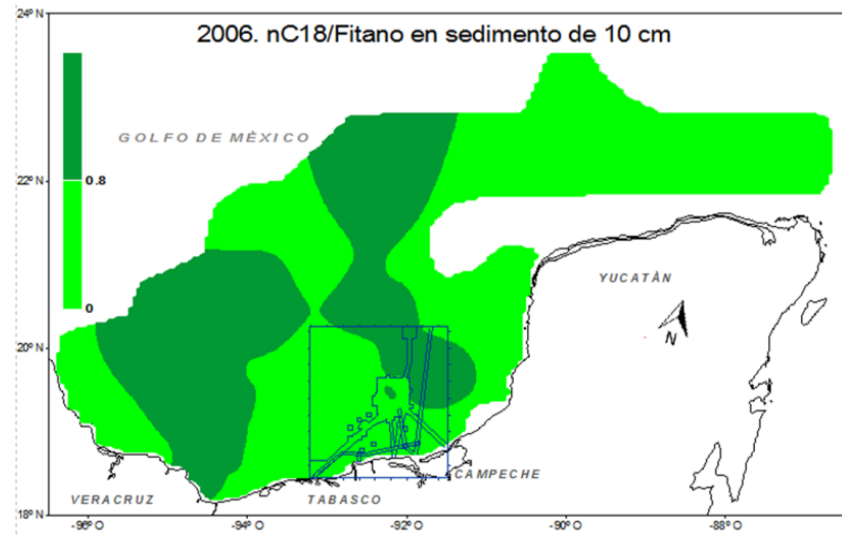
**Figura B-73 nC<sub>18</sub>/fit, 10 cm, SGM-2003**



**Figura B-74 nC<sub>18</sub>/fit, 10 cm, SGM-2004**



**Figura B-75 nC<sub>18</sub>/fit, 10 cm, SGM-2005**



**Figura B-76 nC<sub>18</sub>/fit, 10 cm, SGM-2006**