



Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México



U N A M

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE HIDROCARBUROS
DEL PETRÓLEO FRENTE A LA DESEMBOCADURA DEL RÍO
PÁNUCO

T E S I S
PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS
(QUÍMICA ACUÁTICA)
MARCO ANTONIO ÁVILA CHÁVEZ

DIRECTOR DE TESIS: Dra: Ma. Esther Ruiz Santoyo

COMITÉ TUTORAL: Dra. Maria Adela Monreal Gómez

Dr. Federico Páez Osuna

Dr. Gilberto Díaz González

Dr. Alejandro Ortega Osorio



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.

Vivimos en una sociedad profundamente dependiente de la ciencia y la tecnología y en la que nadie sabe nada de estos temas. Ello constituye una fórmula segura para el desastre.

Virtualmente, cada gran avance tecnológico en la historia de la especie humana, desde el invento de las herramientas de piedra y la domesticación del fuego, han sido éticamente ambiguos.

Carl Sagan

DEDICATORIA

A mis hermanos: Arturo, Lucía, Miguel, Rubén y Víctor; con la ilusión que este trabajo pueda servir de estímulo para lograr sus objetivos personales.

A mis papas: María de los Ángeles Chávez Flores y Antonio Ávila Quintero, por haberme dado las herramientas necesarias como persona para dirigirme por este camino.

A la memoria de mi tío Sergio, que a pesar del tiempo, ha sido mi ejemplo a seguir y creo que en este país necesitamos más personas como él.

A Juanita, muchas gracias por creer en mí y por haberme apoyado en todo este tiempo.

A José Luis Flores Solano, yo sé que en este momento estás pasando por una situación muy difícil. Estoy seguro que vas a salir adelante. Eres una gran persona.

Finalmente, a mis abuelos, tíos, primos, que indirectamente o indirectamente han sido partícipes en mi desarrollo como estudiante y persona.

AGRADECIMIENTOS

Deseo dar un especial agradecimiento a la Dra. Ma. Esther Ruiz Santoyo. Muchas gracias por haberme dado la oportunidad de participar en este proyecto, por haber dirigido el trabajo y por sus muy acertados comentarios.

A los miembros del Comité Sinodal: Dra. Adela Monrreal, Dr. Federico Páez, Dr. Gilberto Díaz y Dr. Alejandro Ortega. Muchas gracias haber leído, revisado y dedicado parte de su tiempo para enriquecer éste trabajo.

Quiero darle un especial agradecimiento a Ana González por ser una excelente amiga y compañera, y por que sin tu ayuda y comentarios este trabajo no hubiera sido posible.

A todos los integrantes del laboratorio de espectroscopia del Instituto Mexicano del Petróleo: Jorge, Marcela, Francisco y en particular a la Química Victoria Aguilar, por haberme apoyado en el análisis de las muestras y, además por ser excelentes amigos y compañeros.

A Francisco García (“compadre”) y Roberto Díaz (“mi cuate”) ambos han apoyado para la culminación de este trabajo.

Al instituto de Ciencias del Mar y Limnología por haberme brindado la oportunidad de estudiar un posgrado.

Al Instituto Mexicano del Petróleo por el apoyo para la realización del proyecto FIES 98/19/VI, R.00054 *“Análisis Ambiental Interdisciplinario de la zona Marina del Golfo de México, comprendida entre los 22°06’ y 22°45’ latitud norte y 97°20’ a 97°50’ longitud oeste, con el apoyo de imágenes de satélite”*

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para la realización de este proyecto de investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN.....	3
ANTECEDENTES	5
Hidrocarburos en zonas costeras: ámbito nacional.....	5
Estuario del Río Pánuco	7
Desembocadura del Pánuco.....	7
Puerto de Altamira.....	9
HIPÓTESIS	10
OBJETIVO GENERAL	11
Objetivos Particulares.....	11
MARCO TEÓRICO	12
Espectroscopia.....	12
Espectroscopia de Fluorescencia.....	12
Espectroscopia de Infrarrojo.....	13
Petróleo.....	14
Hidrocarburos	15
Hidrocarburos Totales del Petróleo (TPH).....	16
Hidrocarburos del Petróleo en el ambiente marino	16
Repercusiones Ambientales de los Hidrocarburos	17
Hidrocarburos en zonas costeras	18
Hidrocarburos en sedimentos	19
Hidrocarburos aromáticos (HA).....	19
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP).....	20
ÁREA DE ESTUDIO	25
Cuenca	25
Sistema hidrográfico.....	26
Descarga	27
Clima	27
Vientos.....	28
Aportes	28
Características sedimentológicas.....	29
Circulación Oceánica.....	30
METODOLOGÍA.....	32
Fase de campo	33
Muestreo de agua	33
Muestreo de sedimento	33
Fase de laboratorio.....	34
Hidrocarburos Totales del Petróleo en agua.....	34
Hidrocarburos Totales del Petróleo en sedimentos	35
Hidrocarburos Aromáticos (HA).....	35
Fase de gabinete.....	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
Análisis Espacial	38
Pánuco I (Secas).....	39
Pánuco II (Nortes).....	44

<i>Pánuco III (Lluvias)</i>	49
Análisis Temporal	55
<i>Hidrocarburos totales del petróleo en agua</i>	56
<i>Hidrocarburos totales del petróleo en sedimento</i>	58
<i>Hidrocarburos aromáticos en agua</i>	60
<i>Hidrocarburos aromáticos en sedimento</i>	62
Análisis de componentes principales.....	64
<i>Análisis de las variables en sedimento</i>	65
<i>Análisis de las variables en agua</i>	71
Análisis de Correlación	77
<i>Parámetros de agua</i>	77
<i>Parámetros para sedimento</i>	83
Comparación con otros sitios	88
CONCLUSIONES.....	93
BIBLIOGRAFÍA	95
ANEXO	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los principales hidrocarburos del petróleo.	14
Figura 2. Nombres de compuestos y estructuras de los 16 contaminantes prioritarios de hidrocarburos policíclicos aromáticos (Tomado de Hewlett Packard, 1994).....	20
Figura 3. Localización de la zona de estudio (Tomado de Coria- Lara, 2002)	25
Figura 4. Sistema hidrográfico del Río Pánuco	26
Figura 5. Descarga promedio mensual del Río Pánuco.....	27
Figura 6. Localización de las estaciones de muestreo	32
Figura 7. Diagrama de flujo para la fase de campo y de laboratorio.....	36
Figura 8. Distribución espacial HTP disueltos/dispersos en agua superficial.....	39
Figura 9. Distribución espacial HTP en sedimento.	41
Figura 10. Distribución espacial HA disueltos/dispersos en agua superficial.....	42
Figura 11. Distribución espacial HA en sedimento superficial.	43
Figura 12. Distribución espacial HTP disueltos/dispersos en agua superficial.....	45
Figura 13. Distribución espacial HTP en sedimento superficial.	46
Figura 14. Distribución espacial HA disueltos/dispersos en agua superficial.....	47
Figura 15. Distribución espacial HA en sedimento superficial.	48
Figura 16. Distribución espacial HTP disueltos/dispersos en agua superficial.....	50
Figura 17. Distribución espacial HTP en sedimento superficial.	51
Figura 18. Distribución espacial HA disueltos/dispersos en agua superficial.....	52
Figura 19. Distribución espacial HA en sedimento superficial	53
Figura 20. Variabilidad temporal HTP disueltos/dispersos en agua superficial.	56
Figura 21. Variabilidad temporal HTP en sedimento superficial.....	58
Figura 22. Variabilidad temporal HA disueltos/dispersos en agua superficial	60
Figura 23. Variabilidad temporal HA en sedimentos superficiales.....	62
Figura 24. Análisis de componentes principales, variables en sedimento (Pánuco I).....	66
Figura 25. Análisis de componentes principales, variables en sedimento (Pánuco II).	67
Figura 26. Análisis de componentes principales, variables en sedimento (Pánuco III).	69
Figura 27. Análisis de componentes principales, variables en agua (Pánuco I).....	72
Figura 28. Análisis de componentes principales, variables en agua (Pánuco II).	74
Figura 29. Análisis de componentes principales, variables en agua (Pánuco III).	76
Figura 30. Matriz de correlación, variables en agua superficial.....	78
Figura 31. Matriz de correlación, variables en sedimento.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en sedimento en la campaña Pánuco I (Secas). 65

Tabla 2. Valores propios calculados para los dos factores principales 65

Tabla 3. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en sedimento en la campaña Pánuco II (Nortes). 67

Tabla 4. Valores propios calculados para los tres factores principales. 67

Tabla 5. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en sedimento en la campaña Pánuco III (Lluvias). 69

Tabla 6. Valores propios calculados para los tres factores principales. 69

Tabla 7. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en agua en la campaña Pánuco I (Secas) 71

Tabla 8. Valores propios calculados para los tres factores principales 71

Tabla 9. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en agua en la campaña Pánuco II (Nortes). 73

Tabla 10. Valores propios calculados para los cuatro factores principales 73

Tabla 11. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en agua en la campaña Pánuco III (Lluvias). 75

Tabla 12. Valores propios calculados para los cuatro factores principales 75

Tabla 13 Matriz de correlación para los parámetros analizados en la matriz agua 77

Tabla 14. Correlación para los distintos parámetros en sedimento 83

Tabla 15. Comparación de Hidrocarburos Totales del Petróleo en agua 88

Tabla 16. Comparaciones de Hidrocarburos Aromáticos en agua 90

Tabla 17. Comparaciones de Hidrocarburos Totales del Petróleo en Sedimento. 91

Tabla 18. Comparaciones de Hidrocarburos Aromáticos en Sedimento. 92

RESUMEN

A lo largo del cauce del Río Pánuco se descargan diversos desechos domésticos e industriales, sumado a ello en el área cercana a la desembocadura se encuentran instaladas diversas empresas, así como la Refinería de Madero, tales procesos han impactado en la zona costera. Con objeto de evaluar la influencia de la descarga del río Pánuco se desarrolló el proyecto *“Análisis Ambiental Interdisciplinario de la zona Marina del Golfo de México, comprendida entre los 22°06´ y 22°45´ latitud norte y 97°20´ a 97°50´ longitud oeste, con el apoyo de imágenes de satélite”*, el cual desarrolló el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) en colaboración con el ICMYL (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología) de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México).

El objetivo del presente trabajo fue determinar el patrón de distribución espacial y temporal de los hidrocarburos en la zona marina frente a la desembocadura del río Pánuco, para ello se realizaron análisis de hidrocarburos del petróleo e hidrocarburos aromáticos en las matrices de agua y sedimento. Los resultados permitieron la evaluación de las condiciones generales de la zona por temporada y, a partir de los diagramas de dispersión, definir la influencia de la descarga del río. Adicionalmente, en este trabajo, se relacionan los resultados de los hidrocarburos con otros parámetros asociados a la presencia de contaminación, determinados en el propio proyecto.

Se evaluaron diversos parámetros físicos y químicos en diversas matrices (en agua y en sedimento). Entre los parámetros analizados se encuentran: salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, hidrocarburos (aromáticos y del petróleo), metales (níquel y vanadio), materia orgánica, composición granulométrica de sedimento, entre otros. Los análisis fueron realizados tanto en el ICMYL como en el IMP. Los muestreos se realizaron a bordo del Buque Oceanográfico “Justo Sierra”, en tres temporadas: mayo de 2000, febrero de 2002 y septiembre de 2002.

De acuerdo a los resultados de hidrocarburos disueltos/dispersos en el agua superficial se considera que en general el área de estudio presenta problemas serios de contaminación por productos del petróleo, debido a que en promedio se alcanzaron concentraciones de casi 80 µg/l, valor ocho veces superior al recomendado por la UNESCO para ser considerado como contaminado. En cuanto a los sedimentos se alcanzaron concentraciones promedio de 52 mg/kg, de acuerdo a los valores de UNESCO los sedimentos de la zona de estudio pueden ser considerados como “no contaminados”. El

criterio de la UNESCO señala como límite 70 mg/kg, sin embargo, estos promedios deben ser considerados con precaución, debido a que en algunas estaciones, principalmente frente a la desembocadura se encontraron concentraciones de hasta 10 veces por arriba de los criterios señalados.

Se concluyó que la descarga del río parece ser el principal aporte de hidrocarburos a la zona de estudio. La estación más cercana a la desembocadura no presentó los niveles más altos de hidrocarburos cuestión que es atribuible a la dinámica local, que provoca remoción del material sedimentario. Con base en los resultados de hidrocarburos la influencia de la descarga del río, para las temporadas estudiadas, fue perceptible unos kilómetros después de la desembocadura. El patrón de distribución de los hidrocarburos tanto en agua como en el sedimento está influenciado por las corrientes predominantes. Las estaciones más cercanas a la costa presentan una permanente dinámica. Por el contrario, las estaciones más alejadas de la costa sufren pocos cambios temporales.

Con base en los análisis, a pesar de presentarse fluctuaciones y casos extremos en cada uno de los muestreos, no se observó evidencia estadísticamente significativa que señalara diferencias importantes en los niveles de hidrocarburos entre cada campaña. En base al análisis de componentes principales no se presentó una relación directa o indirecta entre los hidrocarburos con los parámetros físicos y químicos determinados.

INTRODUCCIÓN

El Golfo de México es un sistema semicerrado con una entrada de agua oceánica a través del canal de Yucatán y con una salida por el estrecho de Florida. Forma una cuenca de aproximadamente $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ que almacena cerca de $2.3 \times 10^3 \text{ km}^3$ de agua (Toledo-Ocampo, 1996). El Golfo de México representa uno de los sistemas ambientales más diversos y ricos del planeta. También, es la región de mayor importancia en la producción y procesamiento de hidrocarburos tanto de México como de Estados Unidos.

La compleja combinación de procesos tectónicos-costeros y depósitos fluviales convierten al Golfo de México en una de las zonas estuarinas más importantes de la Tierra. Entre la frontera con Estados Unidos y la península de Yucatán se cuenta con 23 grandes sistemas lagunares-estuarinos (Botello *et al*, 1992). Del total de dichos sistemas, los estados de Tamaulipas y Veracruz ocupan en área el 41% y 19% respectivamente (Toledo-Ocampo, 1996). Debido a su fragilidad y problemas de contaminación en Tamaulipas se han identificado nueve zonas como prioritarias para la conservación, entre estas se encuentra el delta y la desembocadura del Río Pánuco (Ortiz-Lozano *et al*, 2000).

La principal entrada de desechos en las aguas del Golfo de México se presenta por los ríos (Botello *et al*, 1992). La descarga de un río provoca una condición ambiental particular y característica, ya que al mezclarse las aguas continentales con las marinas se producen condiciones de alta turbulencia (plumas de ríos), modificando las condiciones físicas, químicas y biológicas. La convergencia, relacionada con el frente, que es la zona de contacto entre el agua de río y la marina, puede inhibir la dispersión y dirigir los contaminantes, incluidos los hidrocarburos, a lo largo de la línea del frente (Cruz-Ábrego *et al*, 1991).

Las aguas del estuario del Río Pánuco influyen en gran medida en el litoral de los estados de Tamaulipas y Veracruz. El Río Pánuco es uno de los principales depositarios de agua dulce al Golfo de México. En su margen se desarrollan diversos sistemas estuarinos, sin embargo, también se llevan a cabo importantes actividades marítimas e industriales. Su cuenca ha sido clasificada como de primer orden debido a sus problemas de contaminación (López-Acuña *et al*, 1987). El Río Pánuco drena al Golfo de México aproximadamente $1.7 \text{ km}^3/\text{año}$ de agua por año (Gaillardet *et al*, 1999). El transporte de

contaminantes hacia la zona marina se asocia con los 5.6×10^7 toneladas de sedimento que arrastra anualmente (Hudson, 2003).

La cuenca del río concentra las aguas negras de la zona metropolitana de Tampico y de las descargas de actividades industriales y petroleras. Además, tanto en el propio río como en la desembocadura frecuentemente se realizan actividades de dragado (González *et al*, 1997). Estas condiciones han propiciado el deterioro ambiental tanto en la margen como en la desembocadura del río.

La información actual con que se cuenta acerca de la contaminación en el estuario del Río Pánuco incluye principalmente parámetros sobre metales pesados y bacterias coliformes y fecales. A pesar de ser ésta una importante zona industrial petrolera no existen suficientes estudios científicos publicados sobre las concentraciones de hidrocarburos ni sus derivados. Los hidrocarburos son compuestos que han sido utilizados para evaluar problemas de contaminación, debido a su vinculación con las actividades petroleras e industriales. La poca información publicada con que se cuenta y el continuo aporte de derrames hacia el medio marino hace necesario realizar un estudio ambiental y una evaluación del aporte de hidrocarburos hacia la zona marina (Ortiz-Lozano, 1998).

El presente trabajo forma parte del proyecto FIES 98/19/VI, R.00054 “*Análisis Ambiental Interdisciplinario de la zona Marina del Golfo de México, comprendida entre los 22°06' y 22°45' latitud norte y 97°20' a 97°50' longitud oeste, con el apoyo de imágenes de satélite*”, el cual desarrolló el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) en colaboración con el ICMYL (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología) de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México).

Este trabajo constituye parte del proyecto y se enfoca al análisis de los hidrocarburos del petróleo e hidrocarburos aromáticos en matrices de agua y sedimento en tres diferentes periodos de muestreo. Los resultados permitieron evaluar las condiciones generales de la zona por temporada y, a partir de los diagramas de dispersión de contaminantes, definir la influencia de la descarga del río Pánuco. Adicionalmente, en este trabajo, se relacionan los valores de hidrocarburos con otros parámetros medidos para determinar existencia de contaminación.

ANTECEDENTES

Hidrocarburos en zonas costeras: ámbito nacional

La mayor parte de las investigaciones relacionadas con el impacto de los hidrocarburos en zonas costeras del país se enfocan a lugares donde se cuenta con instalaciones para la extracción y distribución de hidrocarburos, principalmente en las zonas portuarias y plataformas, que son las áreas donde se presume una mayor contaminación por hidrocarburos.

En el Golfo de México se ubica la mayor densidad de instalaciones petroleras del país, por lo tanto, en esta zona se ha enfocado la investigación relacionada con la contaminación por productos del petróleo, sin embargo, aunque en menor medida, también se han reportado trabajos enfocados al petróleo o sus productos en el ambiente marino y costero en la costa del Pacífico.

Botello *et al*, (1996), recopilan información generada sobre hidrocarburos disueltos/dispersos en ríos, estuarios y en la plataforma continental del Golfo de México, señalan concentraciones promedio de hidrocarburos disueltos/dispersos para agua superficial en ecosistemas costeros de 15 µg/l para aguas del Golfo de México, 15 µg/l en el Caribe mexicano, 5.3 µg/l para Tabasco y 48.8 µg/l para el estado de Campeche, concluyen que las aguas del Golfo de México se encuentran contaminadas ya que la mayoría excede el límite permisible de 10 µg/l señalado por la UNESCO (1976). En cuanto a los sedimentos mencionan que se han registrado concentraciones promedio de 69 mg/kg para el Golfo de México; en sistemas costeros y lagunas principalmente; en los estados de Tamaulipas y Veracruz de 26 y 348.5 mg/kg respectivamente, para algunas lagunas de Tabasco concentraciones de 59.3 mg/kg y para el estado de Campeche de 61.0 mg/kg. Con estos resultados menciona que aproximadamente 50% de los sistemas costeros rebasan la recomendación establecida por la UNESCO (1976) de 70 mg/kg de hidrocarburos para ser considerada como sedimentos “no contaminados”.

Por su parte Ponce-Vélez (1995) en un estudio sobre metales pesados e hidrocarburos aromáticos policíclicos en algunas zonas costeras del Golfo de México señala que frente a las costas de Tamaulipas se encontraron valores máximos de hidrocarburos aromáticos policíclicos de 75.5 µg/l, concluyendo que el aporte principal se debió al quemado de combustibles y materia orgánica, derivados de actividades continentales. Las

determinaciones realizadas en los sedimentos marinos alcanzaron valores de hasta 29.56 mg/kg.

Otras investigaciones se han enfocado a zonas de menor extensión territorial pero de gran interés, como la Sonda de Campeche, que es un área en la que se localizan las plataformas de extracción de petróleo más importantes del país. Algunos de los autores que han trabajado en esa zona son González-Estada (1990), quien realiza determinaciones en sedimentos recientes registrando niveles promedio superiores a 800 $\mu\text{g/l}$ de hidrocarburos aromáticos y 134 $\mu\text{g/l}$ como concentración media de hidrocarburos alifáticos; por el contrario González-Macías (1997) en un estudio sobre chapopoterías registra valores promedio de hidrocarburos en sedimentos superiores a 1,000 mg/kg.

Debido a la importancia comercial e industrial de los puertos del Estado de Veracruz, se han realizado estudios de contaminación por hidrocarburos en río y puertos de este estado, por ejemplo Terrats-Chao (1986) evalúa la contaminación por hidrocarburos en sedimentos del río Coatzacoalcos registrando valores de hasta 2,600 mg/kg, concluyendo que la zona se encuentra altamente impactada por actividades antropogénicas. Por su parte Padilla-Reza (1989) evaluó los niveles de hidrocarburos en sedimentos recientes del Río Calzadas ubicado en la región baja del río Coatzacoalcos, durante el mes de noviembre se alcanzaron las concentraciones más elevadas de hidrocarburos en relación con el muestreo realizado en el mes de marzo concluyendo que los niveles de hidrocarburos están relacionados con la estacionalidad. Echaniz-Hernández (1988) en el propio Puerto de Veracruz evalúa la concentración de hidrocarburos aromáticos disueltos/dispersos, señalando que durante los meses de muestreo las concentraciones fueron bajas encontrándose desde 1.3 a 4.8 $\mu\text{g/l}$.

Calva y Botello (1999) en la laguna de Sontecomapan reportan concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en agua en un intervalo de 10.15 a 49.49 $\mu\text{g/l}$, siendo la temporada de secas donde se presentaron los niveles más altos. Mendoza-Ramírez (2002) estudia la presencia de hidrocarburos en la parte norte de la laguna de Tamiahua, registra niveles de hidrocarburos disueltos/dispersos en agua de entre 3 a 30 veces valores superiores y para sedimento entre 5 a 25 veces los valores recomendados por UNESCO, señalando que los valores más altos pueden ser atribuibles a la cercanía de la Refinería de Madero.

Estuario del Río Pánuco

A principios de los años 70's en la margen del Río Pánuco se realizaron varios estudios para conocer la dinámica y la calidad ambiental del estuario. Los trabajos realizados consistieron en la determinación de las aportaciones del río, el control de la contaminación y el aprovechamiento del agua en el estuario, lagunas y playas adyacentes a su desembocadura (SRH, 1971, 1973, 1974a y 1974b). Posteriormente, Acosta-Lara (1976) en un estudio sobre la contaminación en el estuario del río determina contaminación producto de descargas de grasas y aceites, señalando como el principal aporte a la refinería de Cd. Madero. La Secretaría de Marina, al inicio de los 80's, llevó a cabo una serie de trabajos en el estuario del Río Pánuco, donde se determinó la calidad de las aguas del estuario del río y de las descargas residuales e industriales (Sria de Marina, 1982a).

Por su parte Larriva-Sahd (1982) concluye que el principal problema de contaminación en el río Pánuco es consecuencia de las grasas y aceites y en segundo lugar a desperdicios agrícolas y municipales. Otra institución que ha realizado proyectos de investigación es el Instituto Mexicano del Petróleo. A finales de los 90's, se evaluó la acumulación de los contaminantes en la cuenca baja del Pánuco (IMP, 1997). En años más recientes Amezcua-Allieri (1998) sugiere que los poliquetos bentónicos del estuario son buenos indicadores de la calidad del agua y sedimentos. La misma autora (Amezcua-Allieri, 2000) con base en los niveles de hidrocarburos y metales pesados (Ni y V) concluye que la desembocadura del río es la zona más propensa de acumular contaminantes y considera que el sedimento se encuentra contaminado con níquel. En el año 2002 la SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) junto con la CNA (Comisión Nacional de Agua) evaluaron la calidad del agua del Río Pánuco (1990-2001) obteniendo diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, sin que se incluyeran hidrocarburos ni metales pesados.

Desembocadura del Pánuco

Una de las instituciones que ha realizado un mayor número de investigaciones frente a las costas de Tamaulipas es la Secretaría de Marina, a través de la dirección General de Oceanografía realizó una serie de trabajos a principios de los años 80's, con el fin de entender la dinámica de las corrientes litorales y tomar medidas preventivas en casos de

desplazamientos y dispersión de contaminantes. Entre los principales resultados reportados en estos trabajos fueron datos hidrológicos (temperatura, salinidad y densidad), la identificación de distintas masas de agua, y la velocidad y dirección de las corrientes en la desembocadura del río y frente a las costas de Tamaulipas (Sria. de Marina, 1980, 1982 b y c). Además, también se realizaron estudios de la comunidad planctónica en la desembocadura del río, con el fin de determinar organismos indicadores de contaminación (Sria. de Marina, 1982 d).

Uno de los pocos estudios enfocados específicamente en las características de la pluma del río fue el realizado en el Instituto de Geofísica, entre los años 1990 y 1992, en esta investigación se utilizó la percepción remota para determinar la distribución de sedimentos en el río y pluma del Pánuco (Lira *et al*, 1997), señalando el aporte de los sedimentos asociados a la descarga del río en dos distintas temporadas.

En la década de los 90 varias instituciones realizaron conjuntamente el "*Estudio de la Contaminación Marina en los Litorales del Golfo de México y Mar Caribe de México*" (1996), donde se presentan datos para las costas de Tamaulipas y se evalúa la calidad de los ecosistemas marinos, así también se determinaron las áreas que presentan condiciones de contaminación.

En años más recientes la Secretaría de Marina ha continuado con el seguimiento de las condiciones ambientales en el río y la zona costera. A lo largo de 1994, en tres cruceros oceanográficos, se evaluaron las condiciones oceanográficas en el Litoral de Tamaulipas (Sria. de Marina 1998a). Asimismo, en esas fechas, se desarrollaron investigaciones para evaluar la influencia ambiental sobre el medio marino de la descarga del río Pánuco (Sria. de Marina 1998 b y c).

En cuanto a las características sedimentológicas de la zona costera adyacente a la desembocadura del Río Pánuco, se cuenta con los trabajos de Franco-Piña (2000) quien describe las características sedimentológicas de la plataforma continental de los estados de Tamaulipas y Veracruz una de sus estaciones se ubica a 7.3 km al nor-noreste de la zona de la desembocadura del río a 25 m de profundidad, señalando un tipo de sedimento limo-arenoso, con un 92% de componentes terrígenos con alto contenido de cuarzo. Resultados que contrastan con los obtenidos en una tesis de maestría, derivada del trabajo en este mismo proyecto entre el IMP y el ICMYL en la que se estudiaron los sedimentos frente a la desembocadura del Río Pánuco (Cabrera-Ramírez, 2003) y para el

mismo sitio se señala un tipo de sedimento areno-limoso, con altas concentraciones de feldespato, sugiriendo en ambos casos como principal aporte al río.

Puerto de Altamira

El puerto de Altamira, se ubica a unos 30 km al norte de la desembocadura del río Pánuco, abarcando las estaciones ubicadas al noroeste de la zona de estudio. Debido a la construcción del puerto y a la instalación de diversas industrias se han realizado estudios ambientales enfocados a evaluar el impacto sobre la calidad del agua marina. Rubio-Lua (1983) con un estudio de toxicidad por bioensayos señala que las descargas de las aguas residuales con agentes tóxicos orgánicos abaten los niveles de oxígeno disuelto, provocando un incremento en la mortalidad de los organismos. Flores-Zacarías (1986), concluye que el deterioro del ambiente de la zona se da como consecuencia de la contaminación urbana, industrial y agrícola. Miramar-Solana (1987) al estudiar el efecto que sobre la productividad primaria ejerce el puerto de Altamira, señala que, hasta ese momento, las condiciones ambientales eran muy similares a las que se presentaban antes de la construcción de dicho puerto.

Pérez-Soto (2001) realizó una caracterización del impacto ambiental marino como consecuencia de la descarga del emisor submarino que se encuentra frente a las costas de Altamira, en base a la concentración de algunos metales pesados. En la temporada de secas el comportamiento del Hierro fue similar al Manganeso incrementando la concentración con la profundidad y evidenciando la influencia del difusor submarino; por otra parte en la temporada de nortes se observó una columna de agua bien mezclada en los primeros metros de profundidad, observándose nuevamente un comportamiento similar entre ambos metales.

HIPÓTESIS

Al realizar muestreos de diversos parámetros frente a la desembocadura del río en diferentes temporadas, se puede evaluar la influencia del río hacia la zona marina aledaña. La distribución espacio-temporal de parámetros ambientales selectos, como los hidrocarburos asociados con las actividades industriales-petroleras vecinas a los puertos de Tampico y Madero, permitirán evaluar el estado ambiental del Río Pánuco.

OBJETIVO GENERAL

- Determinar el patrón de distribución espacial y temporal de los hidrocarburos (del petróleo y aromáticos) en la zona marina frente a la desembocadura del río Pánuco, en tres temporadas: secas, norte y lluvias.

Objetivos Particulares

- Analizar el patrón de distribución espacial de hidrocarburos aromáticos disueltos/dispersos en el agua marina durante secas, norte y lluvias.
- Analizar el patrón de distribución espacial de hidrocarburos totales del petróleo disueltos/dispersos en el agua marina durante secas, norte y lluvias.
- Analizar el patrón de distribución espacial de hidrocarburos aromáticos en el sedimento durante secas, norte y lluvias.
- Analizar el patrón de distribución espacial de hidrocarburos totales del petróleo en el sedimento durante secas, norte y lluvias.
- Determinar la relación cuantitativa de los hidrocarburos aromáticos disueltos/dispersos en agua con algunos parámetros físicos y químicos.
- Determinar la relación cuantitativa de los hidrocarburos aromáticos en sedimento con algunos parámetros físicos y químicos.
- Determinar la relación cuantitativa de los hidrocarburos totales del petróleo disueltos/dispersos en agua con algunos parámetros físicos y químicos.
- Determinar la relación cuantitativa de los hidrocarburos totales del petróleo en sedimento con algunos físicos y químicos.

MARCO TEÓRICO

Las técnicas analíticas que se emplearon en este trabajo para la cuantificación de hidrocarburos fueron: la espectroscopia de infrarrojo, que determina el contenido de hidrocarburos totales del petróleo y la espectroscopia de fluorescencia para los compuestos aromáticos. La primera analiza el contenido de uniones carbono-hidrógeno, es decir, los principales componentes del petróleo. La segunda técnica determina el contenido de hidrocarburos aromáticos, donde se incluyen a los muy estudiados Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

Espectroscopia

La espectroscopia es la medición de la cantidad de energía radiante que absorbe un sistema químico en función de su longitud de onda de radiación (Day and Underwood, 1989). Por medio los espectros atómicos y moleculares se puede obtener información detallada de la estructura de las moléculas (simetría molecular, distancias y ángulos de enlace) y de sus propiedades químicas (distribución electrónica, fuerza de enlace procesos intra e intermoleculares) (Chang, 1977).

En este trabajo se utilizaron con fines analíticos dos de las ramas de la espectroscopia: la espectroscopia de fluorescencia y la espectroscopia de infrarrojo. La primera para el análisis de hidrocarburos aromáticos y la segunda para los hidrocarburos totales del petróleo.

Espectroscopia de Fluorescencia

Cuando un sólido o un fluido en solución es irradiado con luz ultravioleta o visible se puede presentar el fenómeno de la fluorescencia (Chang, 1977). Por medio de la absorción de la luz visible o ultravioleta, las moléculas o átomos pueden cambiar a estados electrónicos mayores (Arise *et al*, 1993), esto promueve una transición a un nivel energético excitado (excitación) (Stasiuk and Snowdon, 1997). Si la molécula retorna a un estado vibracional con la emisión de luz, la radiación es llamada fluorescencia (Emisión)

(Froehlich, 1983). Por tanto el espectro de fluorescencia de un compuesto puede describirse como la remisión de energía absorbida por una molécula (Guilbault, 1990).

Las principales ventajas de la espectroscopia de fluorescencia sobre otras técnicas, son que la intensidad espectral es observada en función de dos diferentes longitudes de onda, (McKay and Latham, 1972; Jonson, *et al*, 1977; Vo-Dinh, 1978; Dean *et al*, 1988), es mucho más sensible que la espectroscopia de absorción y sólo pocos compuestos presentan fluorescencia (Duggan, 1982; Shen *et al*, 1985; Patra and Mishra, 2001). Los productos derivados del petróleo presentan fluorescencia, debido a la presencia de hidrocarburos aromáticos (Duggan, 1982; Kocmur, 1988), por tanto, esta técnica ha sido utilizada para el monitoreo ambiental y en particular para obtener un estimado de la contaminación con hidrocarburos aromáticos en agua y sedimentos marinos (Gordon and Acizer, 1974; Hornig, 1974; Vo-Dinh, *op cit*; Maher, 1983; Dean *et al*, 1988 Ahmad and Reynolds, 1999).

Sin embargo, se presenta el inconveniente de la incertidumbre del estándar que se debe utilizar (Gordon and Acizer, *op cit*). Generalmente se utiliza un crudo estándar con características similares al producto que se desea determinar, el inconveniente de esto es que no es posible realizar comparaciones en diferentes zonas, para ello se ha propuesto al criseno como un estándar internacional (Gordon and Acizer, 1974; Maher, 1983). En el presente trabajo para la construcción de la curva estándar de concentración se utilizó criseno, un Hidrocarburo Aromático Policíclico de cuatro anillos aromáticos.

Espectroscopia de Infrarrojo

El análisis de Hidrocarburos Totales del Petróleo fue realizado por medio de espectroscopia de infrarrojo. La principal ventaja de este método es que es simple, rápido y barato; sin embargo ésta metodología no provee información del tipo de aceite presente, ni provee información de la presencia o ausencia de moléculas tóxicas y no da información específica a cerca del riesgo potencial asociado con la contaminación. La espectroscopia de infrarrojo mide la vibración (estiramiento y torsión) que ocurre cuando la molécula absorbe energía en la región del infrarrojo del espectro electromagnético. El método está basado en la absorbancia de las estructuras C-H₂ (Weisman, 1998).

Petróleo

El petróleo y sus derivados son mezclas sumamente complicadas, que contienen compuestos principalmente hidrocarburos y que abarcan una extensa escala de estructuras y de pesos moleculares. Se caracteriza por la virtual ausencia de hidrocarburos no saturados consistiendo principalmente de alcanos lineales, alcanos ramificados, cicloalcanos y aromáticos. Además, los crudos del petróleo contienen, según su origen, diversas cantidades de compuestos heterocíclicos que pueden contener oxígeno, nitrógeno, compuestos sulfúricos y metales pesados como vanadio, níquel, hierro, aluminio y cobre, pero son los menores constituyentes del petróleo (Olah and Molnár 1995; Kennis, 1997; Botello, 1996; Hutcheson *et al*, 1996; CONACYT, 1997 e Irwin *et al*, 1997).

En la **Figura 1** se muestra una clasificación general de los distintos componentes orgánicos del petróleo.

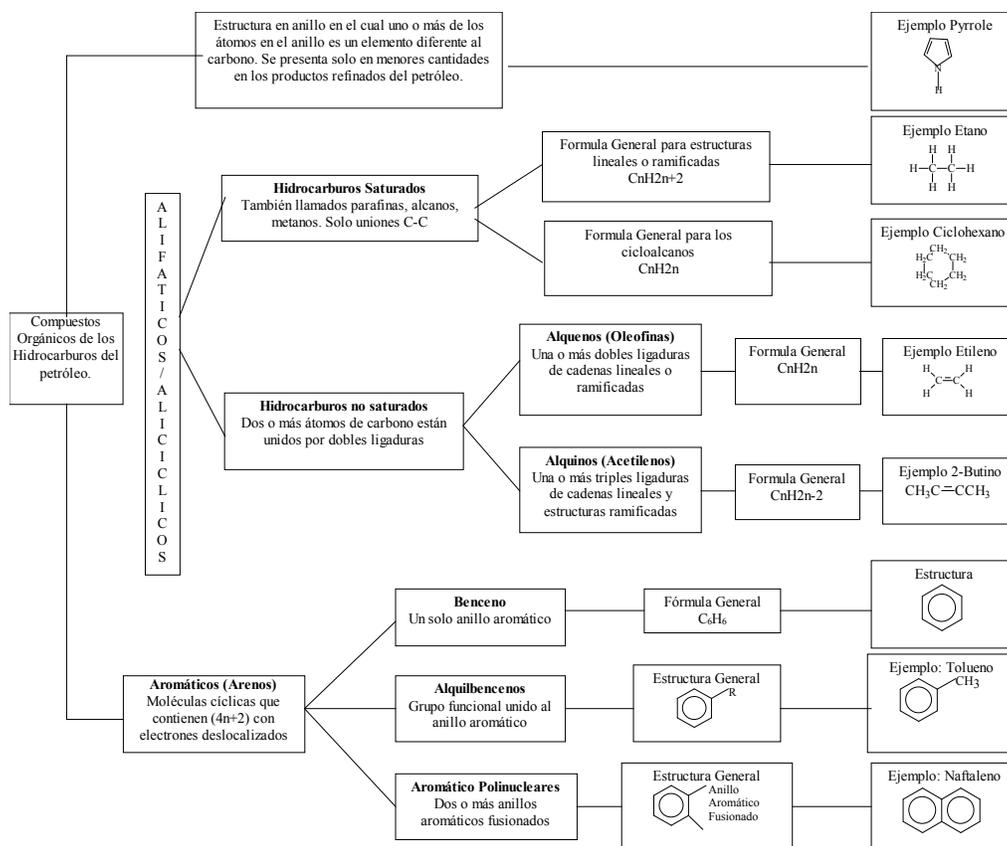


Figura 1. Clasificación de los principales hidrocarburos del petróleo.

Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos muy abundantes en el petróleo que únicamente contienen carbono e hidrógeno (Bloomfield, 1992 y Olan and Molnar, 1995). Debido a la estructura electrónica del átomo de carbono, éste posee una gran versatilidad para combinarse, formando un gran número de compuestos al enlazarse de manera covalente. Dependiendo de su estructura, se dividen en dos grupos: alifáticos y aromáticos. Los primeros se subdividen en: alcanos, alquenos, alquinos y cíclicos y los segundos en monoaromáticos, diaromáticos y aromáticos policíclicos (Morrison, 1973).

Hidrocarburos saturados: Son los principales constituyentes del petróleo (Weisman, 1998). Presentan una unión simple entre carbono-carbono. Pueden ser no cíclicos (alcanos) o cíclicos (cicloalcanos). Se conocen también como parafinas (Streitwieser y Heathcoch, 1981 y Overstreet and Galt, 1995).

Hidrocarburos no saturados: Esta clase de compuestos prácticamente no se encuentran en el crudo y son producidos por el proceso de desintegración térmica (Weisman, 1998). En este caso se dice que se presentan dos o más ligaduras entre carbono-carbono, dependiendo del número de hidrógenos (Streitwieser y Heathcoch, 1981).

Aromáticos: Contienen como estructura básica un núcleo de benceno con seis átomos de carbono. Los compuestos aromáticos están compuestos de varias combinaciones de anillos de benceno unidos (Laws, 1993, Primo-Yutera, 1996 y Weisman, 1998). Generalmente, la cantidad de aromáticos en el petróleo es relativamente pequeña comparada a las parafinas y naftalenos (USEPA, 1995 y Botello, 1996).

Compuestos no hidrocarburos: El petróleo crudo contiene constituyentes orgánicos no hidrocarburos, consistentes de sulfuro, nitrógeno y oxígeno. Además de pequeñas cantidades de compuestos organometálicos y sales inorgánicas. Estos compuestos son concentrados en la fracción pesada de la destilación y como residuos durante la refinación. Son frecuentemente referidos como asfaltenos o resinas (Overstreet and Galt, 1995). Dependiendo del método utilizado algunos de estos compuestos pueden ser incluidos en la medición de HTP (Hidrocarburos Totales del Petróleo), sin embargo, por definición, estos compuestos no son hidrocarburos (Weisman, 1998).

Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP)

El término Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP) describe a cientos de compuestos químicos que originalmente provienen del petróleo crudo, es decir sin refinar. Los HTP son los componentes principales de una gran variedad de productos comerciales (gasolina, combustible, aceites lubricantes, solventes, aceites minerales y crudo del petróleo) (Kostecki and Calabrese, 1991 y ATSDR, 1999 y Vorhees *et al*, 1999).

Para expresar la cantidad de compuestos de petróleo en una muestra de Hidrocarburos Totales del Petróleo se han utilizado diferentes metodologías (Hutcheson *et al*, 1996). Los resultados reportados de HTP representan la medición de la cantidad bruta sin la identificación de sus componentes individuales, como pudiera ser la identificación de los compuestos alifáticos, compuestos aromáticos y otros muchos compuestos traza considerados como no-hidrocarburos entre los que se encuentran alcoholes, éteres y metales (ATSDR, 1999 y Botello, 1996). Analíticamente HTP se define como la determinación total de grasas y aceites menos la cantidad de componentes polares (como aceites vegetales y animales) separados por un absorbente polar (EPA, 1983).

La cantidad de HTP encontrado en las muestras de agua o sedimentos marinos se considera un indicador general de contaminación por petróleo. Sin embargo, por ser una mezcla compleja los valores de concentración no pueden ser usados para estimar cuantitativamente el riesgo a la salud humana. La misma concentración de HTP, en diferentes muestras puede tener diferentes composiciones y por tanto potencialmente diferentes riesgos a la salud humana y al ambiente (ATSDR, 1999; Hutcheson, 1996 y Weisman, 1998).

Hidrocarburos del Petróleo en el ambiente marino

Los estudios sobre la presencia de hidrocarburos del petróleo en el medio marino y sus efectos sobre las condiciones ambientales se han desarrollado a raíz de la importancia que la industria petrolera ha cobrado en la economía de las naciones productoras (González-Macias, 1997). Los efectos ambientales por la presencia de crudo y sus productos refinados, han sido tema de investigaciones dirigidas al monitoreo de compuestos tóxicos como los hidrocarburos aromáticos polinucleares contenidos en ellos, así como a la evaluación de los efectos en organismos acuáticos y en los ecosistemas costeros (Pica-Granados, 1994).

De manera general, los aportes al ambiente marino se presentan de manera: continua, debido al transporte atmosférico y las descargas fluviales y lagunares; y discontinuo, provocado por derrames accidentales (Laws, 1993; Botello, 1996; Ponce-Velez, 1995; y GOOS, 1996).

Son varios los procesos y características oceanográficas que determinan las características de los hidrocarburos del petróleo y su degradación en el medio marino entre éstos se encuentran: la distribución horizontal y vertical de los hidrocarburos en el agua marina, la fuerza y dirección del viento, la velocidad de las corrientes superficiales y marinas, la estabilidad de la capa superior y su espesor; las características del agua, de la atmósfera, la velocidad de viento, el oleaje, la temperatura y el contenido de partículas y oxígeno disuelto. De manera general, las condiciones tropicales facilitan la desaparición del petróleo, una temperatura elevada favorece la solubilidad y la evaporación, mientras que en los climas templados las fuerza mecánicas (viento, oleaje) son las que tienen mayor influencia (Betz, 1980).

Repercusiones Ambientales de los Hidrocarburos

Cuando un producto del petróleo se libera en el ambiente, se llevan a cabo una serie de procesos de cambio en la composición del producto (degradación). Los principales procesos de degradación son la evaporación, oxidación química, emulsificación, dilución y la biodegradación (Kennis, 1997). Cada uno de los procesos de degradación afecta de manera diferente a cada una de las familias de hidrocarburos. Por ejemplo los hidrocarburos aromáticos tienden a ser más solubles que los alifáticos, mientras que los aromáticos tienden a ser más volátiles (Poter and Simmons, 1988).

Frecuentemente, se ha implicado a los hidrocarburos del petróleo con daños biológicos. La mayoría de los organismos acuáticos absorben hidrocarburos aromáticos y alifáticos, incorporándolos a sus tejidos grasos (Kennish, 1997). Diversos estudios han demostrado que la toxicidad de los hidrocarburos se incrementa a lo largo e las series alcanos: (parafinas)-cicloalcanos (naftenos)-alquenos (oleofinas)-aromáticos, y que ésta toxicidad puede ser alterada a través de la interacción con otros compuestos y con factores tales como la salinidad, el pH, los materiales suspendidos y la temperatura (Botello *et al*, 1992). Mucha de la toxicidad de los hidrocarburos sobre los organismos acuáticos ha sido atribuida a los hidrocarburos aromáticos contenidos en estos.

Los efectos ambientales producidos por los hidrocarburos pueden afectar a los propios organismos (individuales) o la comunidad (ecológicos). Los hidrocarburos pueden penetrar a los organismos marinos por adsorción e ingestión de partículas con hidrocarburos; por consumo de estos disueltos/dispersos; o por bioacumulación. Algunos organismos como ostiones, almejas, mejillones, bivalvos, pueden ingerir hidrocarburos presentes en la columna de agua y bioacumularlos en sus tejidos grasos. Así, de esta manera entran en la cadena trófica y eventualmente pueden llegar al hombre (Botello *et al*, 1996).

Se ha demostrado que la introducción de hidrocarburos al ambiente marino provoca una respuesta con un incremento de las comunidades bacterianas degradadoras de petróleo con respecto al resto de las comunidades bacterianas (Lizárraga-Partida, 1996).

Hidrocarburos en zonas costeras

La entrada de hidrocarburos del petróleo en el océano no está distribuida de manera uniforme. Mucho del combustible liberado en áreas costeras es más susceptible de provocar daño biológico en la zona costera que en el océano abierto, asimismo estas zonas son más importantes por ser fuente de recursos pesqueros y de recreación (Laws, 1993). La zona intermareal es la más afectada, debido a que en estas áreas hay una mayor diversidad y abundancia de especies y de estadios juveniles de muchas especies oceánicas (Evans and Bray, 1974).

Las zonas costeras y otras áreas relativamente protegidas como bahías, ríos, estuarios y lagunas constituyen uno de los principales recursos naturales. En estas zonas se da una importante interacción entre varios ecosistemas. Tales zonas juegan un papel determinante en el desarrollo económico y social de las regiones costeras: producción de alimentos (pesquerías y acuicultura), transporte, construcción y administración de puertos, industria (Botello *et al*, 1996). La presión por las actividades industriales y el aumento de poblaciones en la zona costera trae como consecuencia un aumento en la contaminación de la línea de costa y estuarios. En adición, los derrames de petróleo que reciben los lagos y estuarios se tornan en un aporte crónico con variedad de fuentes: descargas industriales, marinas, aguas urbanas y aportes atmosféricos.

El efecto del petróleo sobre los organismos marinos o estuarinos, se debe principalmente a los hidrocarburos presentes en la fase acuosa (Espina y Venegas, 1996). Muchas

fracciones del petróleo flotan en el agua y forman una delgada película, ocasionando que una pequeña cantidad de aceite puede crear una película sobre una gran área de la superficie del agua (ATSDR, 1995).

Hidrocarburos en sedimentos

En los sedimentos se acumulan sustancias que ingresan al medio marino, por lo tanto representan un medio importante en la vigilancia de contaminación. El empleo de los sedimentos como indicadores de contaminación ha sido muy amplio, aunque su uso presenta de manera general las siguientes ventajas y desventajas: concentran los contaminantes por períodos largos de tiempo; a diferencia de los organismos, tienen menor movilidad, son fáciles de analizar, dan una idea del hábitat y comportamiento de los organismos, son fáciles de obtener, pueden repetirse muestreos en los mismos sitios y la información que se obtiene es más precisa sobre áreas pequeñas y distribución regional. Sin embargo, en los sedimentos los niveles reales o potenciales de contaminantes son algunas veces el producto de una compleja interacción y transformación antes de que el contaminante esté finalmente incorporado a ellos (González-Estrada, 1998).

Consecuencia de los procesos de sedimentación, en los sedimentos marinos se llegan a acumular concentraciones importantes de hidrocarburos. Una vez adsorbidos a los sedimentos, los procesos de oxidación fotoquímica y biológica son prácticamente nulos, de tal modo que pueden permanecer por muchos años y alcanzar concentraciones hasta mil veces superiores a las encontradas en la columna de agua, especialmente los compuestos de mayor complejidad estructural, alto peso molecular y baja solubilidad (Toledo, 1995). En los sedimentos de las zonas contaminadas, las concentraciones de hidrocarburos de origen fósil pueden variar en un amplio rango, según el origen de la contaminación y las características del ecosistema, de tal forma que la composición de los mismos se ve influenciada directamente por el tiempo que estos tengan en los sedimentos y por la composición original del petróleo (González-Estrada, 1998).

Hidrocarburos aromáticos (HA)

Los hidrocarburos aromáticos se componen de uno o más anillos de benceno como componente estructural. Los compuestos monoaromáticos tienen un anillo de benceno,

como estructura fundamental. Un compuesto diatómico tiene dos anillos de benceno fusionados. Los hidrocarburos aromáticos polinucleares tienen más de dos anillos de benceno fusionados en su estructura característica, y su estabilidad estructural resulta de la deslocalización del par electrónico (Potter y Simons, 1998).

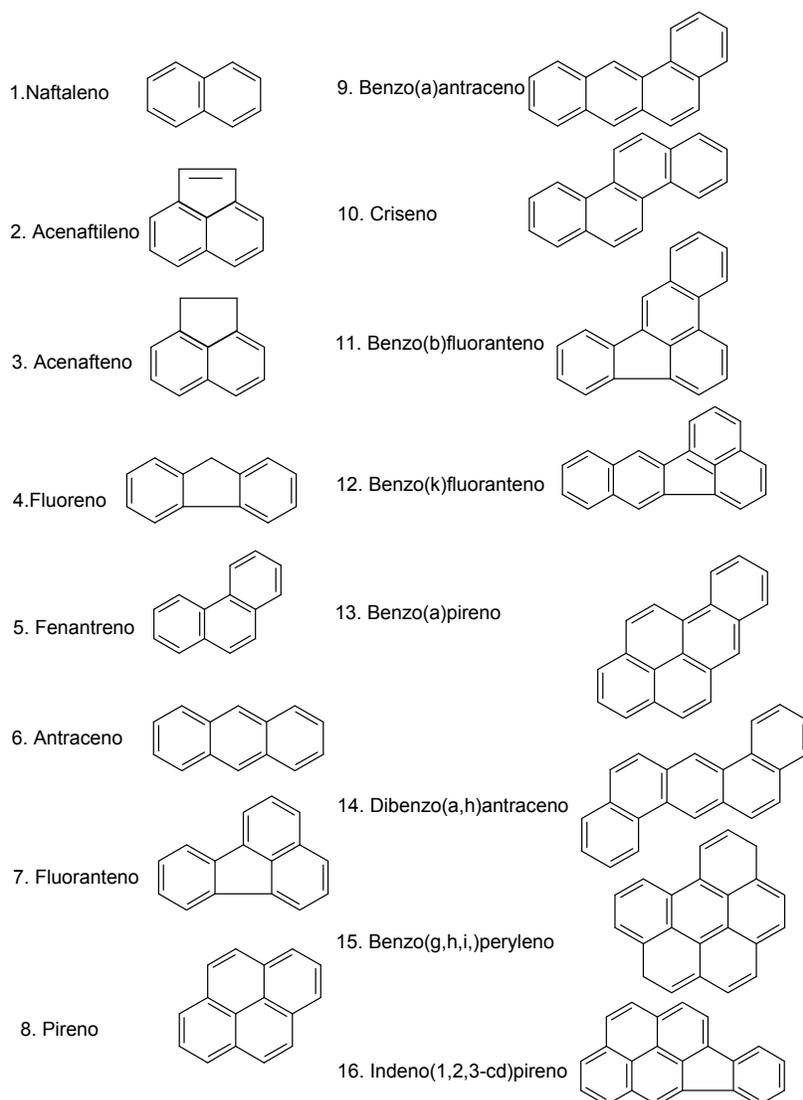


Figura 2. Nombres de compuestos y estructuras de los 16 contaminantes prioritarios de hidrocarburos policíclicos aromáticos (Tomado de Hewlett Packard, 1994).

Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) son los contaminantes más estudiados. Estrictamente se componen de átomos de carbono e hidrógeno exclusivamente. El

termino PAC (Compuestos Aromáticos Policíclicos) usualmente es utilizado para incluir hidrocarburos aromáticos policíclicos sustituidos que contienen grupos funcionales amino, cloro, ciano, hidroxilo, carboxilo, nitro o tio, igualmente a los hetero-PACs en el cual un átomo de nitrógeno, oxígeno o sulfuro es parte del anillo aromático. El termino HAP (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) frecuentemente es sustituido por PNAHs (*polynuclear aromatic hydrocarbons*), y normalmente se utiliza para abarcar a los heterocíclicos.

Los HAP son contaminantes de atención tanto para la lista de la *European Community* (EC) y la *Environmental Protection Agency* (EPA), debido a las propiedades cancerígenas de algunos de ellos. La determinación de los HAP esta principalmente limitado al análisis de 16 compuestos (**Figura 2**). La determinación de cada uno de ellos se realiza generalmente por cromatografía de gases con un estándar conocido. El objetivo del presente trabajo no fue la identificación individual, más bien, fue el conteo global del contenido de compuestos aromáticos en las muestras, entre los que se incluyen a los HAP.

Las características físicas y químicas de los HAP varían en forma regular con el peso molecular. La resistencia a la oxidación y la reducción tiende a disminuir con el incremento del peso molecular. Como consecuencia de estas diferencias de peso entre distintos HAP varían sustancialmente en sus características y distribución en el ambiente y sus efectos en sistemas biológicos (Neff, 1979).

La presencia de un anillo compacto de benceno hace que la densidad de los compuestos aromáticos sea mayor que la de los hidrocarburos no aromáticos correspondientes, pero, aun así, los compuestos con solo un anillo de benceno no son tan densos como el agua (Van-Orden y Lee, 1971). La solubilidad de los HAP en el agua es muy baja y tiende a disminuir con el número de anillos aromáticos (Futoma *et al*, 1981).

Los HAP pueden ser formados por tres rutas: pirólisis a altas temperaturas de materiales orgánicos, diagenesis a moderadas o bajas temperaturas de material orgánico sedimentario a combustibles fósiles y biosíntesis por plantas y microbios. (Neff, 1979). La combustión de desechos urbanos y domésticos (carbón, aceite, gas, basura, tabaco, carne), los incendios de pastos y bosques, la generación de energía de fuentes fósiles, y la combustión interna de maquinaria también produce emisiones ricas en HAP. Estos HAP de origen antropogénico pueden alcanzar el ambiente acuático en descargas industriales

y urbanas, deposición de partículas de aire y derrames de petróleo y productos de petróleo en cuerpos de agua (Neff, 1979 y ATSDR, 1995).

Transformación de hidrocarburos aromáticos policíclicos: Los procesos más importantes en la transformación o degradación de los HAP en los ambientes estuarinos y marinos son la fotooxidación, oxidación química y metabolismo biótico. La mayoría de los mecanismos naturales de transformación oxidativa requieren oxígeno molecular. Los HAP son generalmente muy estables en ambientes hipóxicos o anóxicos. De esta manera pueden persistir indefinidamente en agua pobre en oxígeno o en sedimentos anóxicos (Neff, 1979 y Kennish, 1997). Los compuestos aromáticos de peso molecular bajo son removidos principalmente por evaporación y actividad biológica (Futoma, 1981). Los HAP de peso molecular alto son removidos principalmente por sedimentación o fotooxidación (Neff, 1979).

Entradas de hidrocarburos aromáticos policíclicos: La depositación atmosférica y las descargas de aguas domésticas e industriales, así como los derrames de combustibles fósiles son las principales rutas de entrada de los HAP a las aguas marinas. Casi todos los HAP en la atmósfera están asociados con material particulado y aerosoles. La lluvia, los polvos y la depositación de vapores representan el principal proceso atmosférico responsable del flujo de los HAP en los océanos. Las descargas de las refinerías e industrias usualmente contienen cantidades importantes de HAP. De esta manera la mayor parte de estos HAP son transportados a los ambientes costeros absorbido en el material particulado y eventualmente alcanzan la columna de agua siendo disponibles para los organismos acuáticos (Kennish, 1997) o bien, asociados con los sedimentos, se concentraran en el fondo de ríos estuarios, embalses y ambientes marinos.

HAP en el agua: Los HAP pueden entrar a la superficie del agua a través de descargas de plantas industriales y plantas de tratamiento (ATSDR, 1995). Debido a que la mayoría de los componentes del aceite son menos densos que el agua, la descarga usualmente tiende a flotar en la superficie formando una película, así los organismos que se alimentan o están en contacto con la superficie son más afectados por la contaminación (Laws, 1993).

Después de entrar en el sistema, los hidrocarburos asociados a las partículas son acumulados en los sedimentos por procesos de deposición. Ciertos procesos que pueden incrementar la tasa de deposición es la floculación de partículas suspendidas, tal como ocurre en un gradiente de salinidad de los estuarios. Por este motivo los sedimentos

marinos frecuentemente contienen concentraciones de HAP varios órdenes de magnitud que los encontrados en la columna de agua y por ello puedan ser de utilidad como índices de la entrada de HAP en el ambiente acuático (Neff, 1979).

HAP en el sedimento: La entrada de los HAP dentro de los sedimentos y las partículas suspendidas resulta en una concentración de estos contaminantes en los sedimentos marinos (usualmente por un factor de 1,000 o más que en la columna de agua). Los sedimentos que se acumulan tienden a ser persistentes, por lo cual han sido usados como indicadores de la tasa de entrada de HAP dentro del ambiente acuático. El análisis de los hidrocarburos aromáticos en los sedimentos costeros puede sugerir un proceso de acumulación de estos compuestos, así como del tipo de fuentes de los mismos. Es por ello que evaluar el contenido de hidrocarburos aromáticos en los sedimentos puede servir como un indicador de la entrada de estos compuestos al medio ambiente acuático. La oxidación fotoquímica y biológica de los HAP declina en los sedimentos del fondo del mar siendo más persistentes en los sedimentos anoxicos (Kennish, 1977).

Ciclo de vida de los HAP en el ambiente acuático: La mayoría de los HAP entran en el ambiente acuático a través de los ríos, estuarios y aguas costeras; principalmente si estos se encuentran en las proximidades de los centros urbanos e industriales (Kennish, 1997).

Debido a su baja solubilidad acuosa los HAP entran rápidamente al ambiente marino siendo absorbidos por las partículas orgánicas e inorgánicas y son acumulados en los tejidos de los organismos. Los compuestos aromáticos que han sido detectados en los sistemas costeros de diversas regiones del mundo son compuestos estructurados predominantemente de 3 a 5 anillos bencénicos y de bajo grado de alquilación (Salazar-Vallejo, 1991).

Los HAP de bajo peso molecular son removidos de la columna de agua por evaporación, oxidación microbiana y sedimentación, los de alto peso molecular son removidos principalmente por oxidación y sedimentación. Algunos procesos que reducen la concentración de los HAP en el agua y en los sedimentos son la evaporación, fotooxidación y degradación metabólica por bacterias acuáticas, hongos y animales. Aunque en los sedimentos los HAP son más persistentes, algunos fenómenos como las corrientes de fondo, las tormentas, así como las actividades bentónicas y humanas pueden resuspender sedimentos contaminados con HAP de la superficie y entonces permitir que sean transportados a nuevos lugares o acumulados en la cadena alimenticia acuática (Neff, 1979).

MARCO TEÓRICO

Toxicidad: Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) constituyen una de las clases más severas de contaminantes orgánicos relacionados con las actividades humanas. Su importancia está vinculada con su movilidad, debida a su peso molecular (número de anillos), siendo los de bajo peso molecular sumamente móviles y por ende muy volátiles y solubles, provocando efectos adversos sobre los organismos y el propio hombre..

En ensayos biológicos se ha demostrado que los HAP pueden llegar a ser potentes cancerígenos (Katz *et al*, 1980 y Neff, 1979). En general la toxicidad de los hidrocarburos aromáticos en los organismos se incrementa con el aumento en el peso molecular de la molécula, intensificándose por la capacidad de solubilidad en agua. Algunos de los efectos directos de estos compuestos son los de inhibir o estimular el crecimiento o división celular, pueden concentrarse alrededor de la membrana plasmática de las células de las plantas incrementando la permeabilidad al agua. La habilidad de los hidrocarburos aromáticos para alterar la membrana superficial puede explicar en parte por que estos compuestos son tóxicos para los organismos (Neff, 1979).

Los HAP de bajo peso molecular, que contienen dos o tres anillo, son tóxicos, pero no cancerígenos para la mayoría de los organismos marinos. Los HAP de alto peso molecular, que contienen cuatro, cinco o seis anillos son menos tóxicos, pero potencialmente muy cancerígenos (Kennish, 1997).

Variaciones en los factores físicos ambientales tales como la salinidad y temperatura cuando están en los rangos de tolerancia normal de las especies, puede modificar sustancialmente la naturaleza y magnitud de la respuesta de los organismos a los diferentes contaminantes (Neff, 1979).

ÁREA DE ESTUDIO

El río Pánuco representa el límite entre los estados de Tamaulipas y Veracruz. La zona de estudio se ubica en el litoral de los estados de Tamaulipas y Veracruz, frente a la desembocadura del río Pánuco. El cuadrángulo sobre el que se realizaron los muestreos abarca aproximadamente desde los 97°50' a los 97°20', longitud oeste y de los 22°06' a los 22°26' latitud norte, cubriendo un área aproximada de 1,225 km² con profundidades desde los 12 a los 69 m. En las siguientes secciones se hace una descripción de la cuenca y del río, para dar una comprensión general de las condiciones que pueden presentarse en la zona de estudio.

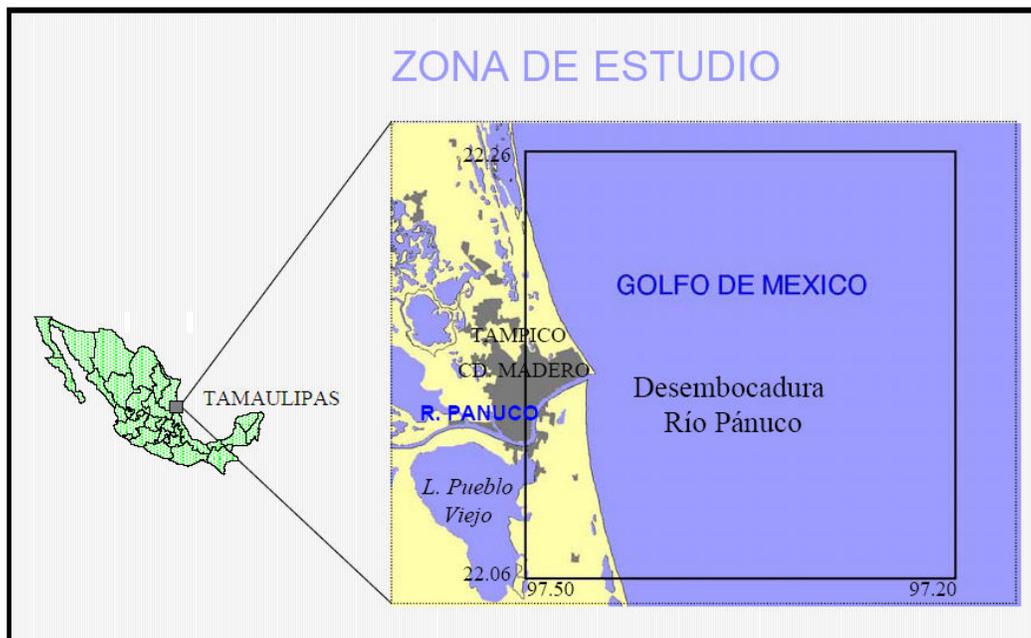


Figura 1. Localización de la zona de estudio (Tomado de Coria- Lara, 2002)

Cuenca

La cuenca del río Pánuco se ubica en la vertiente oriental del Golfo de México, cubre una superficie de aproximadamente 84,956 km². El río realiza un recorrido de 510 km. La cuenca se localiza entre los 19°34' 38" y 23° 56'30" de latitud norte; y los 97°50'42" y 101° 21'20", longitud oeste. Cubre parte de los Estados de México, Querétaro, Hidalgo, Guanajuato, San Luis Potosí, Veracruz, Tamaulipas y una pequeña fracción de Nuevo León (SARH, 1980, 1987). La cuenca del río Pánuco se divide en tres zonas: Alto Pánuco,

ÁREA DE ESTUDIO

Bajo Pánuco y Río Guayalejo (Sría. de Pesca, 1983). El bajo Pánuco se localiza en el sur del Estado de Tamaulipas, geográficamente abarca los paralelos 20°45' y 23°15' de latitud norte y los meridianos 97°20' y 100°10' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 42,788.5 km² (SARH, 1980).

Sistema hidrográfico

El sistema hidrográfico de la región está formado por una serie de arroyos con pendientes suaves, numerosos meandros y lagunas marginales de considerable extensión. Las afluentes más importantes del río Pánuco en su cuenca baja son el Moctezuma y el Tempoal, la unión del primero con el Tampaón en las Adjuntas forma el río Pánuco. Poco antes de su desembocadura al Golfo de México recibe por la margen derecha aportaciones del río Chacayán y por la margen izquierda aguas del río Guayalejo ó Tamesí. Las lagunas más importantes en la margen izquierda son Tampos, Cairel y Carpinteiro, y por la margen derecha se encuentra la de Pueblo Viejo. Durante las mareas vivas éstas lagunas sufren la penetración del agua de mar por los canales que las unen (SARH, 1980; Sría. de Marina 1982 y Campos-Aranda, 1996).

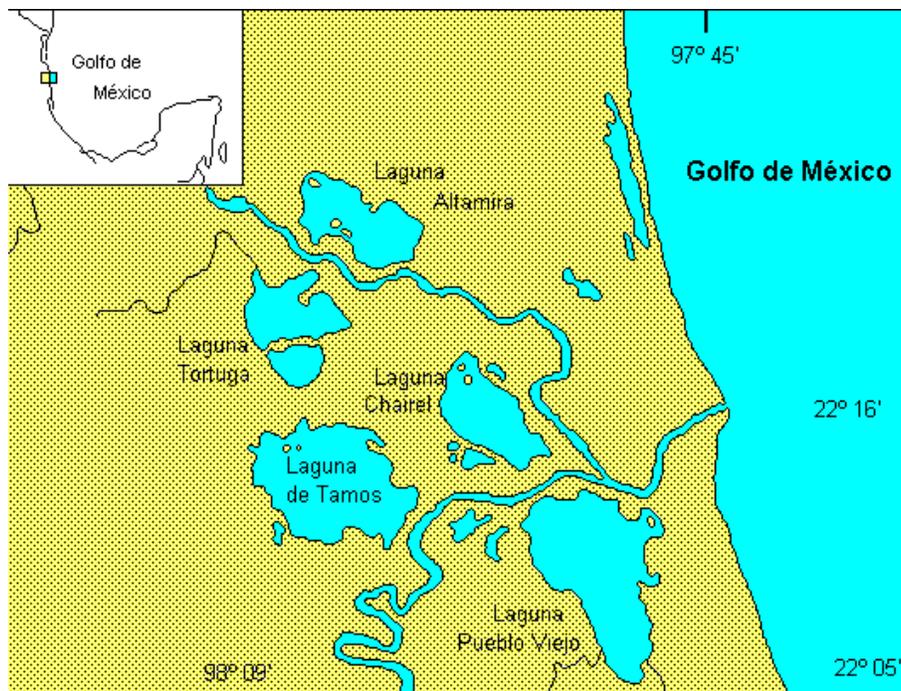


Figura 2. Sistema hidrográfico del Río Pánuco

Descarga

El río Pánuco descarga al Golfo de México aproximadamente $17.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ de agua al año (Sría. de Marina, 1979, Zarate-Lomelí *et al*, 1999 y Gaillardet *et al*, 1999). El promedio de descarga de agua dulce por segundo del río hacia el mar para el mes más seco (marzo), es de $130 \text{ m}^3/\text{s}$. En el mes de septiembre se tiene registrado el mayor aporte, con un promedio de $1,384 \text{ m}^3/\text{s}$ (UNH/GRDC, 2003 y Hudson, 2003).

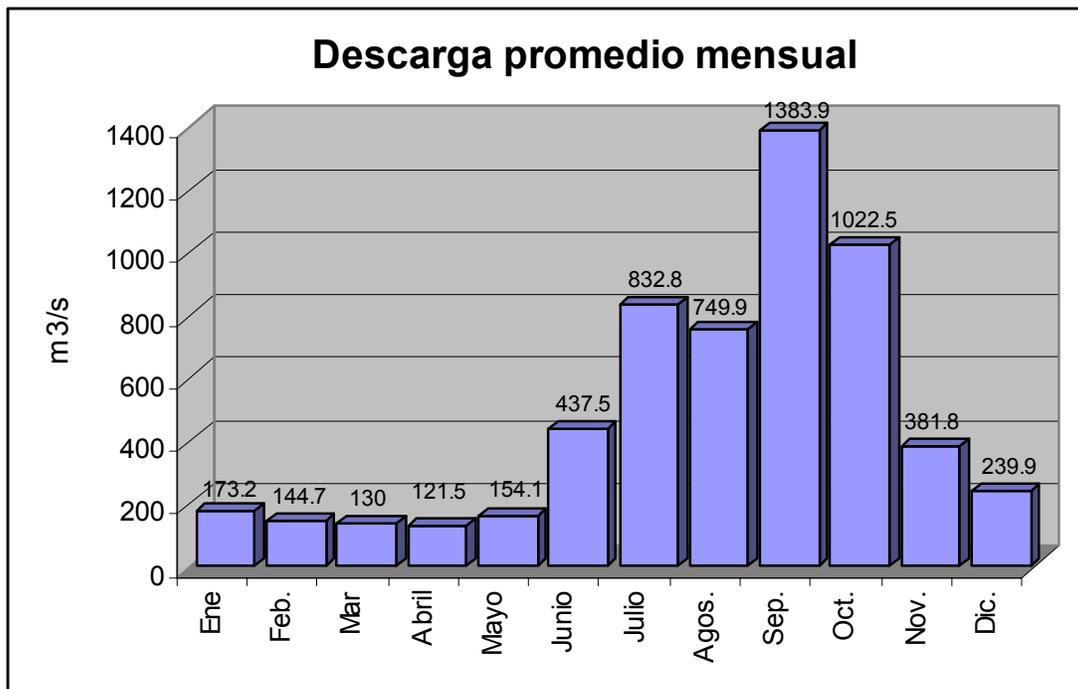


Figura 3. Descarga promedio mensual del Río Pánuco

Clima

El clima de la región es de tipo Aw1 (e), que es definido como Clima tropical subhúmedo con lluvias en verano (García, 1973). La temperatura media anual en la zona es de 24°C , las máximas anuales se presentan entre los meses de junio y agosto (28°C), los mínimos anuales ocurren en diciembre y enero (19°C). La precipitación total anual es superior a los $1,100 \text{ mm}$ en promedio. La temporada de lluvias se distribuye entre junio a octubre alcanzando en este periodo el 80% del total anual, la máxima incidencia se presenta en septiembre (277 mm) y la mínima en febrero (14.4 mm) (INEGI, 1996). La incidencia de

ÁREA DE ESTUDIO

lluvias en el mes de septiembre es consecuencia de las circulaciones ciclónicas y monzónicas. Durante el invierno disminuye el carácter ciclónico y se acentúa la entrada de los nortes, por lo cual las precipitaciones son de carácter frontal con lluvias y lloviznas ligeras y persistentes (PDDM, 1975).

La humedad relativa se distribuye de manera homogénea a lo largo del año siendo en promedio del 78%, con mínimas fluctuaciones mensuales (Sría de Marina, 1979). La evaporación promedio anual es de 1,617 mm, las mínimas son de 70.1 a 95.7 mm en diciembre enero y febrero; las máximas son de 169 mm a 176 mm de abril a junio. El cociente P/T está comprendido entre 43.2 mm y 55.3 mm y en cuanto a su grado de humedad se clasifica como de humedad intermedia (García, 1973).

Vientos

En general los vientos predominantes anuales son débiles y tienen una dirección este-noreste. Sin embargo, al paso de los ciclones, se han registrado velocidades de hasta 279 km/hr. En verano predominan los vientos del sur, sureste, este y noreste. Los dos primeros se presentan durante el transcurso de la mañana y son cálidos y secos, con velocidades de hasta 20 km/hr. Los segundos se mantienen en altura durante el día para descender en la tarde y noche como vientos frescos y húmedos con velocidades de 25 km/hr. Los vientos de origen ciclónico llegan a presentar velocidades superiores a los 100 km/hr, éstos suelen aparecer a finales de verano y principios de otoño. En el otoño dominan vientos templados y secos del sureste y este con velocidades promedio de 20 km/hr. En primavera e invierno se presentan los “nortes” con promedios de velocidad de 35 km/hr con dominancia norte-noreste. A finales del invierno y a principios de la primavera se presentan vientos moderados del interior del continente llamados “serranos” cuya característica es la de ser fríos y secos (PDDM, 1975).

Aportes

Las principales avenidas pluviales de los ríos Pánuco y Guayalejo ó Tamesí se presentan en los meses de julio a octubre. La parte más contaminada de la cuenca se localiza en la salida del mar, en donde el crecimiento de la actividad socioeconómica de la zona conurbada de Tampico-Madero-Altamira, ha causado graves deterioros por los

ÁREA DE ESTUDIO

contaminantes incontrolados, tanto en las marismas como en el litoral y en la desembocadura (SEDUE, 1983).

La cuenca del Río Pánuco recibe la principal fuente de contaminación del país, que es el área metropolitana de la ciudad de México, toda esta agua residual alcanza las aguas del Río Tula, después el Moctezuma y por último el Pánuco. Asimismo, recibe las descargas de Pachuca, Ciudad Valles, Pánuco y Tampico. Se considera que el 46% de la contaminación en el río se origina por la población, y el resto por las distintas industrias (Vizcaíno-Murray, 1975 y García-Michel, 1985). A lo largo del cauce del Río Pánuco se incorporan una serie de descargas entre los que destacan: las aguas negras de las redes locales de los drenajes municipales, aguas residuales industriales, detergentes, plaguicidas, metales pesados, desechos orgánicos, derrames de hidrocarburos, manchas de aceite, basura, etc. En la parte cercana a la desembocadura del río Pánuco y sobre su margen se encuentran instaladas diversas empresas, entre las más importantes se pueden citar: 1) Concretos Anahuac; 2) Recinto Fiscal; 3) Proteínas de Tampico; 4) Terminal Marítima de PEMEX; 5) Astilleros de Marina Uno; 6) Química del Mar; 7) Minera Autlan; 8) Muelle de Metales; así como diversas 9) Pescaderías y 10) Compañías manufactureras de plataformas marinas. Tal proceso de industrialización y modernización ha marcado desde hace tiempo un profundo impacto ambiental en la zona costera, la cual es influenciada por la descarga de las aguas del río Pánuco al ambiente marino (Sría. de Marina, 1982a). En su desembocadura con el mar el efecto de las corrientes marinas, permite la descarga y mezcla, diluyendo los contaminantes que pudiera acarrear el río.

Características sedimentológicas

Con base en la distribución, tipo y origen de los sedimentos, así como a la orientación de la plataforma continental, el Golfo de México se ha dividido en 7 provincias. La región sur de Tamaulipas se encuentra ubicada en la Cuarta. En ésta provincia los sedimentos están dominados por lodos terrígenos, cuya presencia se debe principalmente a los ríos que desembocan y contribuyen a la formación de una franja de limos arenosos terrígenos cercana a la costa. En la región frente a las costas de Tamaulipas se pueden encontrar sedimentos arenosos en la zona costera, seguidos por limos y arcillas a mayores profundidades y lejos de la costa (Pica-Granados *et al*, 1991).

ÁREA DE ESTUDIO

La Secretaría de Marina (1998a, 1998b; 1998c) señala para la zona de estudio dos distintos componentes granulométricos: sedimentos areno-limosos y limosos-arenosos. La proporción de componentes gruesos se reduce con respecto a distancia de la costa. Estas proporciones se deben a variaciones temporales, modificaciones en las corrientes y las descargas. La zona más costera es el área que presenta mayor variabilidad temporal, apareciendo en la temporada de nortes una disminución de la proporción de arenas en la desembocadura del río.

Franco-Piña (2000) señala, a partir de una caracterización sedimentológica de la Plataforma de Tamaulipas, que en la zona cercana a la desembocadura del Pánuco los tipos de sedimentos son limo-arenoso y aproximadamente el 90% de ellos se deben a aportes terrígenos. La composición mineralógica corresponde a sedimentos arenosos calcáreos principalmente formados por cuarzo.

La principal playa de Ciudad Madero es la Playa Miramar, la cual es de tipo arenosa, de pendiente suave y con una longitud de aproximadamente 6 km. En la parte norte las dunas son más homogéneas y altas, la playa presenta un declive pronunciado y en ocasiones se forman desniveles, con una parte alta en la cual se forman charcas en la época de lluvias (Ortiz-Lozano, 1998).

Circulación Oceánica

La dinámica de la circulación marina frente a las costas de Tamaulipas es compleja. La configuración de la costa, topografía del fondo, mareas, ondas internas, oleaje y el aporte del río son condiciones determinantes en el comportamiento de las corrientes marinas.

La Secretaría de Marina (1979), menciona que la corriente costera tiene una dirección hacia Norte durante el invierno, y hacia el sur en el verano. Costa fuera, de 15 a 20 millas de la playa, la corriente se establece generalmente al Norte con velocidades de aproximadamente 1 nudo. Estudios puntuales de la Secretaría de Marina han reportado, frente a la desembocadura del río, en el mes de julio, una corriente paralela a la costa con dirección norte y una contracorriente con dirección sur (Sria. de Marina 1982 b). Esta misma institución (1982 c) reporta para finales de octubre una corriente paralela a la costa con una velocidad promedio de 9 cm/seg.

Emilsson *et al.* (1973), señalan que frente a la desembocadura del río se presenta una corriente litoral hacia el sur con velocidad promedio de 15 cm/seg, que se origina como

ÁREA DE ESTUDIO

consecuencia de las escolleras y los bancos situados frente a la desembocadura, dando lugar a un desvío de la corriente Norte, la cual forma una contracorriente o un remolino frente a la playa; y por la descarga del río origina a un "efecto de chorro" induciendo un movimiento en la misma dirección.

La circulación oceánica frente a las costas de Altamira presenta patrones bien definidos periódicamente. En la época de secas se presenta con dirección del NW con velocidades medias de 4.1 cm/seg y cambia al SE con velocidad media de 5.2 cm/seg. Para el período de lluvias la dirección de las corrientes es al S y SE con velocidades medias de 5.5 cm/seg y con dirección del NW con velocidad media de 4.85 cm/seg. Para la temporada de nortes la dirección principal es al SW y S, con velocidades medias de 8.4 cm/seg. (Ortiz-Gallarza *et al*, 2000).

METODOLOGÍA

La zona de estudio objeto de ésta tesis se ubica en el litoral de los estados de Tamaulipas y Veracruz, frente a la desembocadura del Río Pánuco. El proyecto se realizó en tres periodos de muestreo, secas, nortes y lluvias. El periodo de secas correspondió del 16 al 19 de mayo de 2000; el segundo muestreo se realizó en febrero del 2002 (nortes) y el tercero en septiembre de 2002 (lluvias); que en lo sucesivo se denominarán cruceros Panuco I, Panuco II, Panuco III; los muestreos y registro de algunos parámetros ambientales se realizaron a bordo del B/O “Justo Sierra”. Entre los diferentes parámetros que se evaluaron son los hidrocarburos (agua y sedimento), metales (agua y sedimento), salinidad y temperatura, entre otros. En cuanto a las muestras de Hidrocarburos Totales del Petróleo e Hidrocarburos Aromáticos, tanto para agua como en sedimentos se obtuvieron y analizaron 17 muestras en el crucero Panuco I, en Panuco II fueron 29 y para Panuco III 31. El número de muestras colectadas y analizadas dependió de la programación asignada para cada campaña y de los recursos asignados en cada una de ellas.

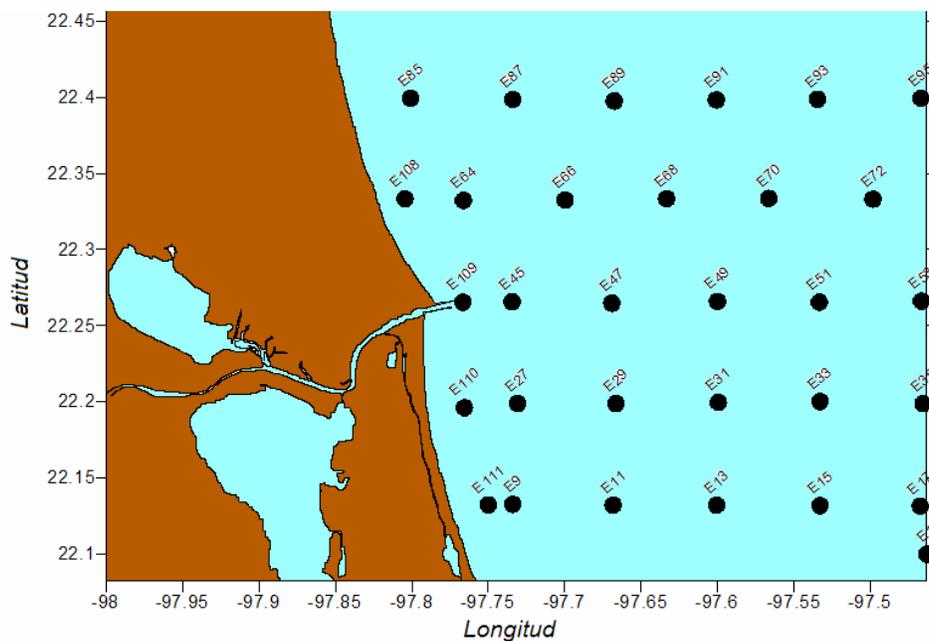


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo

El trabajo experimental de esta tesis comprende dos fases, una de campo a bordo del buque y una segunda correspondiente a los análisis de laboratorio, utilizando técnicas de espectroscopia de infrarrojo y de fluorescencia.

Fase de campo

Muestreo de agua

Las muestras de agua para la determinación de hidrocarburos fueron colectadas desde la proa del buque, para evitar que la propia embarcación contaminara la muestra. Se utilizó un frasco de vidrio ámbar de un galón de capacidad, el cual se fijó al muestreador metálico especial para hidrocarburos (García-Figueroa and Flores Ríos, 1983). Todos los recipientes utilizados fueron previamente lavados con detergente, mezcla crómica, agua corriente, agua destilada y cloroformo. Se ha planteado que en el agua superficial, de manera general, se tienen las concentraciones más altas de hidrocarburos (Hiltabrand, 1978; Ventajas, 1986; Hellou, 1996), por lo tanto el muestreador con el frasco se introdujo hasta una profundidad de 1 m para de allí tomar la muestra (IOC/UNESCO, 1984; Alvarez-Larrauri and González-Macias, 1986).

Para la extracción de los hidrocarburos se utilizó tetracloruro de carbono grado espectro como disolvente y un embudo de separación de 2L (García-Figueroa y Flores-Ríos, 1983; Cedeño, 1991). La muestra recuperada en los frascos ámbar fue vaciada al embudo de separación con 20 ml de tetracloruro de carbono y se agitó durante 2 minutos. Kocmur (1986) recomienda un tiempo de 5 min de agitación. Se realizó una modificación con 2 min de agitación y 3 repeticiones, para asegurar la máxima eficiencia en la extracción (Badawy and Al-Harthy, 1991; Domenico *et al*, 1994; Ávila-Chávez, 1999). La fase orgánica se recuperó en frascos ámbar de 125 ml. que se preservaron a 4°C en oscuridad.

Muestreo de sedimento

Las muestras de sedimento de cada una de las estaciones se colectaron empleando una draga Smith-McIntyre (Al-Lihaibi and Ghazi, 1997; Yamane *et al*, 1997; Solís, 2000); esta draga es útil para muestras de sedimentos superficiales (hasta 20 cm de profundidad). Las muestras se colectaron en frascos de vidrio de boca ancha de 250 ml de la parte superior y del centro de la draga, procurando colectar los sedimentos recientes y evitando

tocar el material. Fueron tapadas, etiquetadas y conservadas en refrigeración a 4°C en oscuridad. Todos los recipientes que estuvieron en contacto con la muestra fueron previamente lavados con detergente, mezcla crómica, agua corriente, agua destilada y cloroformo, en ese orden para evitar residuos de compuestos orgánicos que pudieran alterar la determinación de la muestra.

Fase de laboratorio

Los análisis de las muestras para la determinación de hidrocarburos totales del petróleo e hidrocarburos aromáticos fueron realizados en el laboratorio de espectroscopia del Instituto Mexicano del Petróleo.

Hidrocarburos Totales del Petróleo en agua

Antes de manipular las muestras fue necesario preparar una curva de calibración. Se mezclaron 15 ml de n-hexadecano, 15 ml de isobuctano y 10 ml de clorobenceno, (EPA, 1996) de esta solución se pesaron 0.75 g en un matraz volumétrico de 50 ml., con ello se obtuvo una mezcla con una concentración de 15,000 µg/l. A partir de esta solución se tomaron alícuotas y se prepararon distintas concentraciones que fueron leídas en orden ascendente de concentración. Con la concentración conocida y la lectura se construyó una línea de tendencia donde se interpolaron los resultados de las muestras (IMP-QA-619, 1997 y IMP-QA-620, 1997).

El frasco de vidrio ámbar, con el extracto de hidrocarburos disueltos/dispersos en agua, se mantuvo en refrigeración y oscuridad hasta el momento de su análisis en el laboratorio. Para recuperar el volumen original y evitar interferencias por volumen, se calentó la muestra a temperatura ambiente. Posteriormente se realizó una limpieza de la muestra, para eliminar los restos de humedad en el extracto. La muestra se hizo pasar por un embudo con filtro al cual se le agregó sílica gel. El disolvente se recuperó en un matraz volumétrico de 100 ml. y se aforó. Con esta solución se llenó una celda de cuarzo de 10 cm (análisis previos sirvieron para seleccionar el mejor grosor de celda, que fue la utilizada en la curva de calibración). La muestra se determinó en un Espectrómetro NICOLET 710 FTIR a una longitud de onda de 2930 cm⁻¹ (EPA, 1983; Cedeño, 1979; Hutcheson, 1996; IMP-QA-619, 1997; Reddy and Quinn, 1999; Nadim *et al*, 2000).

Hidrocarburos Totales del Petróleo en sedimentos

La muestra con sedimento contenida en el frasco de vidrio se homogeneizó perfectamente con una espátula. En cajas petri, se pesaron 70 g de sedimento y se secaron por 3 hr a 80°C. Una vez seca la muestra, se molió y homogeneizó en un crisol se pesaron 10 g en un matraz Erlenmeyer de 250 ml, agregando 50 ml de tetracloruro de carbono grado espectro o uvasol, 1 g de sulfato de sodio y 1 g de sílica gel. Se colocó en un agitador mecánico por 30 min. La fase orgánica se separó por filtración a través de papel filtro y se aforó a 100 ml. Con esta solución se llenó una celda de cuarzo de 10 cm (análisis previos sirvieron para seleccionar la mejor celda, que fue la utilizada en la curva de calibración). La muestra se determinó en un Espectrómetro NICOLET 710 FTIR a una longitud de onda de 2930 cm^{-1} (EPA, 1983; Cedeño, 1979; Alvarez-Larrauri y and González-Macías, 1986; IMP-QA-620, 1997; Nadim *et al*, 2000).

El método IMP-QA-620, 1997 fue validado y determinando un nivel de precisión de $\pm 3\%$ con un nivel de confianza del 95%. El límite de detección determinado fue de 0.3814 mg/kg.

Hidrocarburos Aromáticos (HA)

El procedimiento en laboratorio para la determinación de los hidrocarburos aromáticos fue por la técnica espectroscopia de fluorescencia (Acuña, 1986; Ventajas, 1986; Badawy and Al-Harthy, 1991; Weber and Bicego, 1991; Abdullan *et al*, 1996; Beltran *et al*, 1997; Weber *et al*, 1998; González *et al*, 1999; Zanardi, 1999). La técnica de análisis fue seleccionada por ser un método simple y sensitivo para detectar bajas concentraciones de hidrocarburos aromáticos (Badawy and Al-Harthy 1991; Calva-Benites, 2000).

Antes de manipular la muestra se preparó la curva de calibración. En un matraz volumétrico de 200 ml, se pesaron en una balanza analítica, 0.025 g de criseno que se diluyeron con hexano grado espectro o uvasol hasta el aforo. La concentración de la mezcla preparada fue de alrededor 125,000 $\mu\text{g/l}$ de hidrocarburos aromáticos con base en criseno, a partir de esta solución se prepararon soluciones con concentraciones de 100 $\mu\text{g/l}$, 200 $\mu\text{g/l}$, 400 $\mu\text{g/l}$, 600 $\mu\text{g/l}$ 800 $\mu\text{g/l}$ y 1000 $\mu\text{g/l}$. Con la lectura del equipo y la concentración conocida se trazó una línea de tendencia donde se interpolaron los resultados de las muestras (IMP-QA-610, 1997).

La muestra analizada por espectroscopia de infrarrojo fue utilizada para la determinación de compuestos aromáticos por espectroscopia de fluorescencia. El extracto con tetracloruro de carbono fue llevado a sequedad en vasos de precipitado de 120 ml, por medio de evaporación, a temperatura ambiente (Succar *et al*, 1987). Posteriormente se agregaron 4 ml de hexano grado espectro o uvasol deslizando por las paredes del vaso y mezclando perfectamente, para asegurar el arrastre de todos los compuestos aromáticos. Con esta solución se llenó una celda de cuarzo de 1 cm de espesor y se analizó en un espectrómetro de fluorescencia Perkin Elmer LS50B a una longitud de onda de excitación de 310 nm y de emisión de 380 nm (Badawy *et al*, 1993; Domenico *et al*, 1994; Abdullan *et al*, 1996; IMP-QA-610, 1997; Kornilios, 1998; Shriadah, 1998; Wattayakon *et al*, 1998; Commendatore *et al*, 2000; Ngabe, 2000). La longitud de onda seleccionada ha sido probada para un estándar de referencia como criseno, sin embargo, si se utiliza otro estándar se deberán adecuar las longitudes de onda a las condiciones óptimas de lectura (BMEPC, 1981).

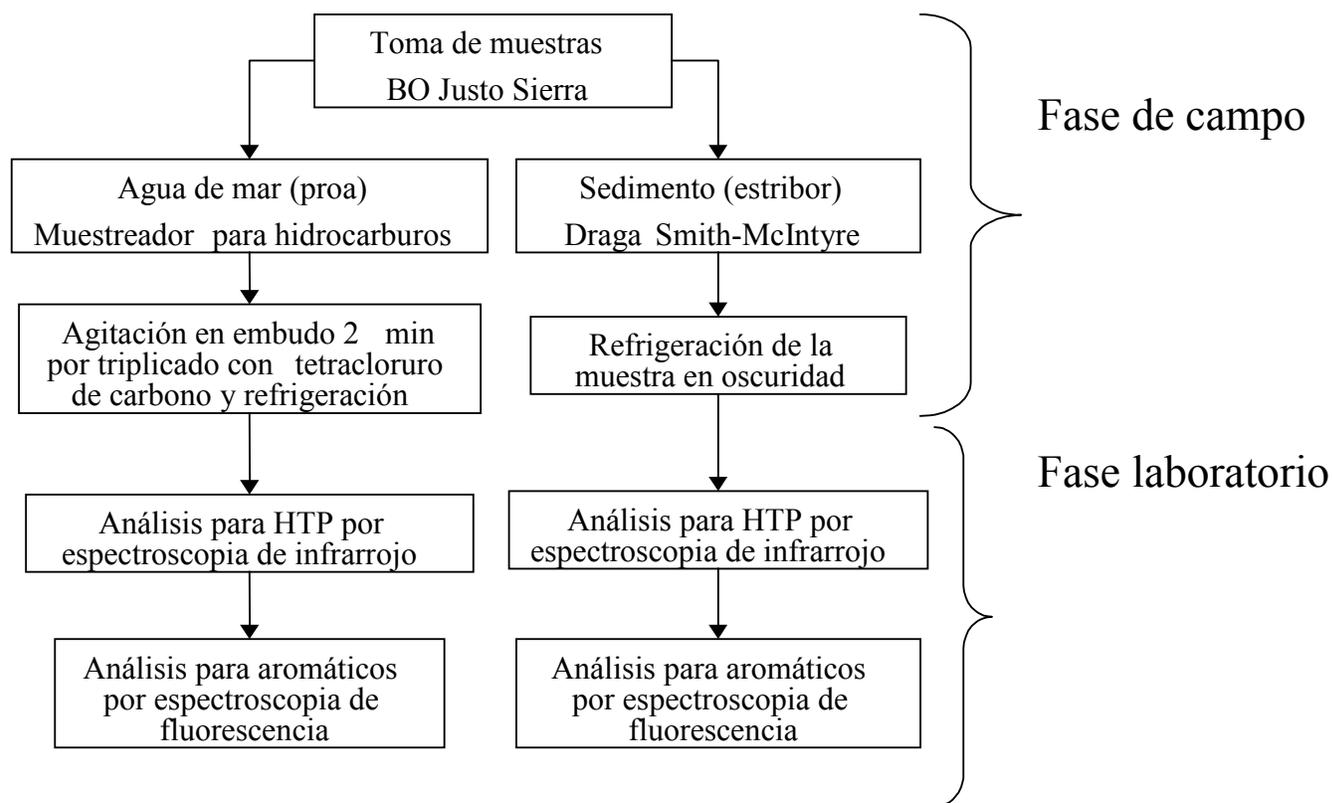


Figura 2. Diagrama de flujo para la fase de campo y de laboratorio

Fase de gabinete

La fase de gabinete consistió en el análisis gráfico y estadístico de la información generada del muestreo y análisis de las muestras colectadas. Los datos se trabajaron de tal manera que en primera instancia se realizó un análisis del comportamiento espacial de los hidrocarburos en las matrices agua y sedimento, por medio de gráficos de isoconcentración, para ello se utilizó el programa Surfer 7.0. Fue necesaria la digitalización del mapa de la zona de estudio y sobre éste se sobrepusieron las estaciones con coordenadas y concentración. El programa genera líneas de isoconcentración entre las estaciones adyacentes y se pueden identificar de manera visual las zonas con concentraciones más elevadas.

Posteriormente se compararon los resultados entre las diferentes temporadas de muestreo, utilizando una herramienta estadística de agrupación de datos, diagramas de cajas (Box and Whisker Plot), en este análisis estadístico se concentra el total de las observaciones y se pueden distinguir semejanzas y diferencias entre distintos lotes de datos, así también se puede distinguir la dispersión y sesgo. El programa que se utilizó para este análisis estadístico fue STATGRAPHICS Plus 5.0.

Para buscar explicación del comportamiento de los hidrocarburos con algunos parámetros se realizó un análisis de correlación directa y un análisis de componentes principales. En el análisis de correlación se utilizó el programa STATISTICA y para el análisis de componentes principales XLSTAT-Pro versión 7.5. Estos últimos dos análisis sirvieron para aproximar una relación positiva o negativa con el resto de los parámetros determinados.

Cabe mencionar que este trabajo se circunscribe dentro de un proyecto entre diferentes instituciones, el trabajo de esta tesis se enfoca en la determinación del comportamiento espacial y temporal de los hidrocarburos en agua y sedimento. El resto de los datos que se presentan en la correlación y componentes principales fueron realizados en el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los muestreos se realizaron en tres periodos, correspondientes a tres distintas temporadas. La determinación del comportamiento espacial y temporal de los Hidrocarburos Aromáticos (HA) e Hidrocarburos Totales del Petróleo (HTP), fue el objetivo perseguido en el presente estudio, sin embargo el proyecto contempló la determinación de diferentes parámetros físicos y químicos frente a la desembocada del río Pánuco. A continuación se describe el comportamiento espacial de los hidrocarburos, tanto en agua como en sedimento para cada una de las temporadas de muestreo. Tal como se describió en la metodología los resultados de los tres períodos de muestreo se analizaron de la siguiente manera: el comportamiento espacial temporal y la posible relación con otros parámetros físicos y/o químicos

Análisis Espacial

En esta sección se describirán los resultados de las mediciones realizadas durante los tres cruceros oceanográficos frente a la desembocadura del río Pánuco.

Para fines de interpretación de los resultados, se desarrollaron diagramas de isolíneas de concentración. Las concentraciones de cada estación de muestreo se coincidieron sobre el mapa del cuadrante de estudio. Se construyeron isolíneas de concentración para hidrocarburos totales y aromáticos, tanto en agua como en sedimento. Los gradientes de concentración pueden ser observados fácilmente y se pueden hacer inferencias sobre las posibles regiones de influencia asociados con la descarga del río. Sin embargo, debido a que el programa introduce los valores mínimos y máximos de ese periodo de muestreo, las variaciones entre cada temporada pueden ser muy altos, el análisis sirve para interpretar sólo el comportamiento en ese momento dado. Los diagramas de isoconcentración son presentados como ayuda visual para interpretar la diferencia en concentraciones a lo largo de la zona de estudio.

Los mapas de isolíneas se construyeron con el uso del programa GOLDEN SURFER, versión 6.01, considerando los siguientes criterios: Las estaciones se localizaron por la latitud y longitud. Los parámetros utilizados para la interpolación fueron los predeterminados por el programa, que involucran el uso del total de los datos.

Pánuco I (Secas)

En la **Figura 8** se presentan los valores de concentración de HTP en agua, para el cruce denominado Pánuco I.

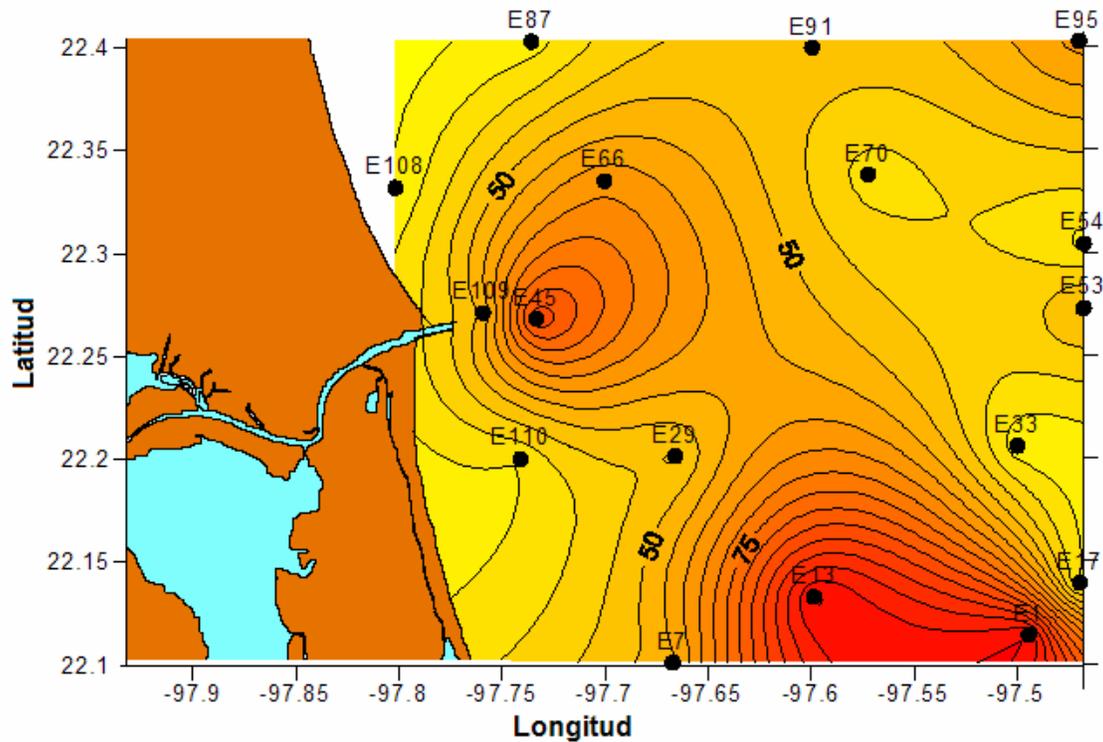


Figura 1. Distribución espacial HTP disueltos/dispersos en agua superficial

Como se puede apreciar en la **Figura 8**, la distribución espacial, presenta dos zonas de mayor concentración: la primera y más evidente en la parte sureste del cuadrante muestreado y la otra frente a la desembocadura del río.

La primera la conforman las estaciones E1 y E13 con valores de 109.9 y 111.0 $\mu\text{g/l}$, respectivamente, este incremento en concentración por su posición espacial no es ocasionada por la influencia de la descarga del río, más bien parece ser consecuencia del tráfico marino. Louati *et al*, (2001), en un estudio dentro de una zona costera adyacente a un área urbana, señala que la principal fuente de contaminación se ocasiona por el tráfico marítimo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La segunda zona está determinada por la estación E45 (89.4 µg/l) la cual se ubica frente a la escollera, esta zona presenta la influencia directa de la descarga del río Pánuco. El interés de esta zona es debido a que el transporte de contaminantes se incrementa por el arrastre de éstos adsorbidos a los sedimentos fluviales (Konhauser *et al*, 1997). Sin embargo, cabe mencionar que la estación E109 se encuentra más cercana a la escollera y presenta valores menores que la E45. De acuerdo a González-Orduño (2001), todas las estaciones costeras presentan una columna bien mezclada, a excepción de la estación E109, donde se distingue la influencia del río entre los 4 a 8 m de profundidad, por el contrario en la estación E45 se observa un patrón de perturbación como consecuencia del río en toda la columna. Al parecer, frente a la desembocadura, el agua dulce se percibe a una profundidad media, después de los 4 m, posteriormente, como consecuencia de la densidad, el agua dulce asciende, fenómeno que se percibe hasta la estación E45. Bouloubassi *et al*, (2001), reporta un estudio en un estuario donde los hidrocarburos antropogénicos provienen de la descarga del río y se acumulan en las partes bajas. Si se parte del supuesto que la descarga del río es la responsable del incremento en los valores de HTP, y la columna en la estación más cercana no esta completamente mezclada, se puede explicar el motivo que la estación E109 presenta un valor menor a la estación E45. De esta manera se puede esperar que después de los cuatro metros de profundidad los valores de hidrocarburos sean mayores que en la superficie, solo para la estación E109.

En cuanto a los HTP en el sedimento, la estación E45 presenta la concentración más elevada con 144.3 mg/kg, la mínima se registró en la estación E108 con 8.1 mg/kg. Tal como puede apreciarse en la **Figura 9**, en donde se ilustra el comportamiento espacial, la concentración más alta de hidrocarburos se presenta frente a la desembocadura del río. Las descargas de las actividades industriales, urbanas y agrícolas aportan cantidades importantes de hidrocarburos a los sistemas estuarinos (Abdullah *et al*, 1994; 1997; Wattayakorn, 1998; Calva and Botello, 1999; Wang, 2002). Contrariamente a lo esperado la estación que se encuentra más cercana a la escollera E109, a pesar de encontrarse por encima del promedio de los resultados no es la que presenta la concentración de HTP más elevada.

Se ha planteado que frente a la desembocadura del río se presenta una zona de alta energía. La hidrodinámica de las corrientes locales provoca alta turbulencia con la dispersión del material depositado recientemente (Cabrera-Ramírez, 2003). Al parecer el mecanismo dispersor que se presenta en la estación E109, ocasiona que el material

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

sedimentado sea distribuido de acuerdo a las corrientes. En la estación E45 parece que los fenómenos de turbulencia han disminuido, provocando la acumulación del material, por ello en ésta estación se presentan las concentraciones más elevadas de hidrocarburos.

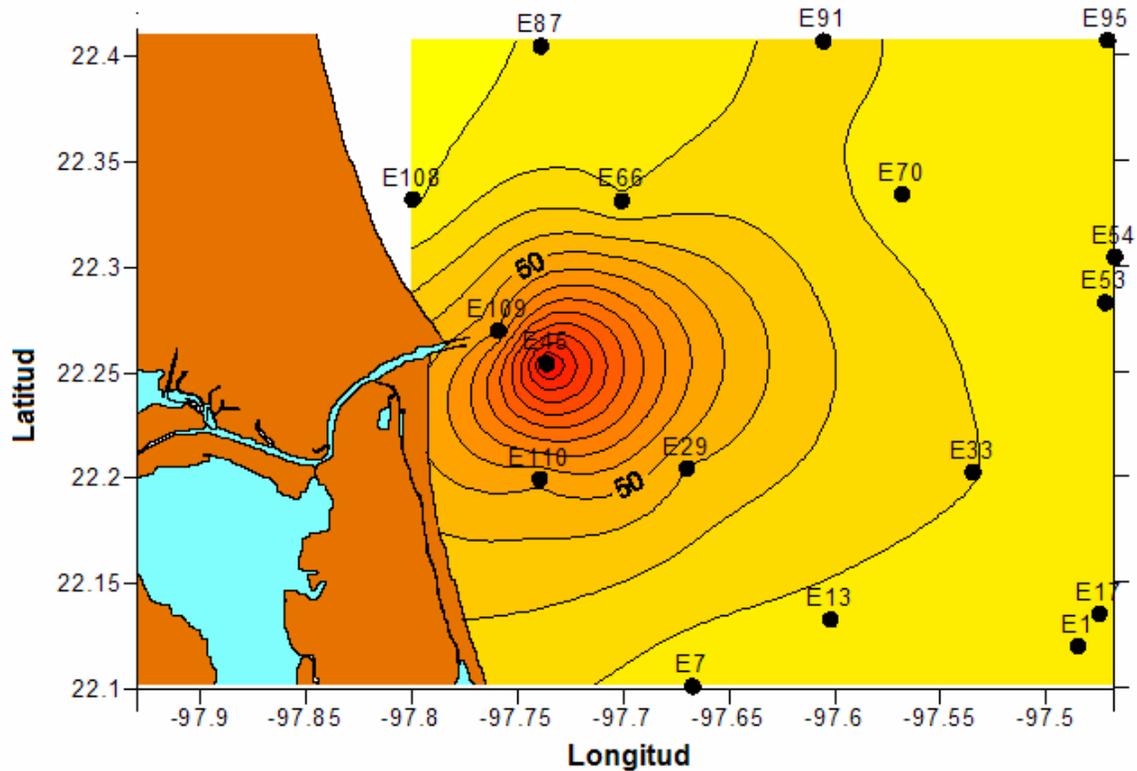


Figura 2. Distribución espacial HTP en sedimento.

Debe notarse la diferencia de tres órdenes de magnitud entre las concentraciones de HTP en agua y las del sedimento, puesto que en los sedimentos se presentan fenómenos de acumulación dificultando los procesos de degradación, situación que ocurre más fácilmente en la columna de agua.

Los resultados obtenidos del análisis de HA en agua, pueden ser observados en la **Figura 3**. Se presenta un comportamiento muy localizado. Frente a la desembocadura del río aparece una zona de máxima concentración, que se forma como consecuencia de dos análisis por encima de las 10 $\mu\text{g/l}$. Las estaciones E45 y E109 presentan valores muy superiores a la mediana, dicho comportamiento parece ser indicativo de la influencia directa del río, ya que ambas estaciones se encuentran adyacentes a la desembocadura.

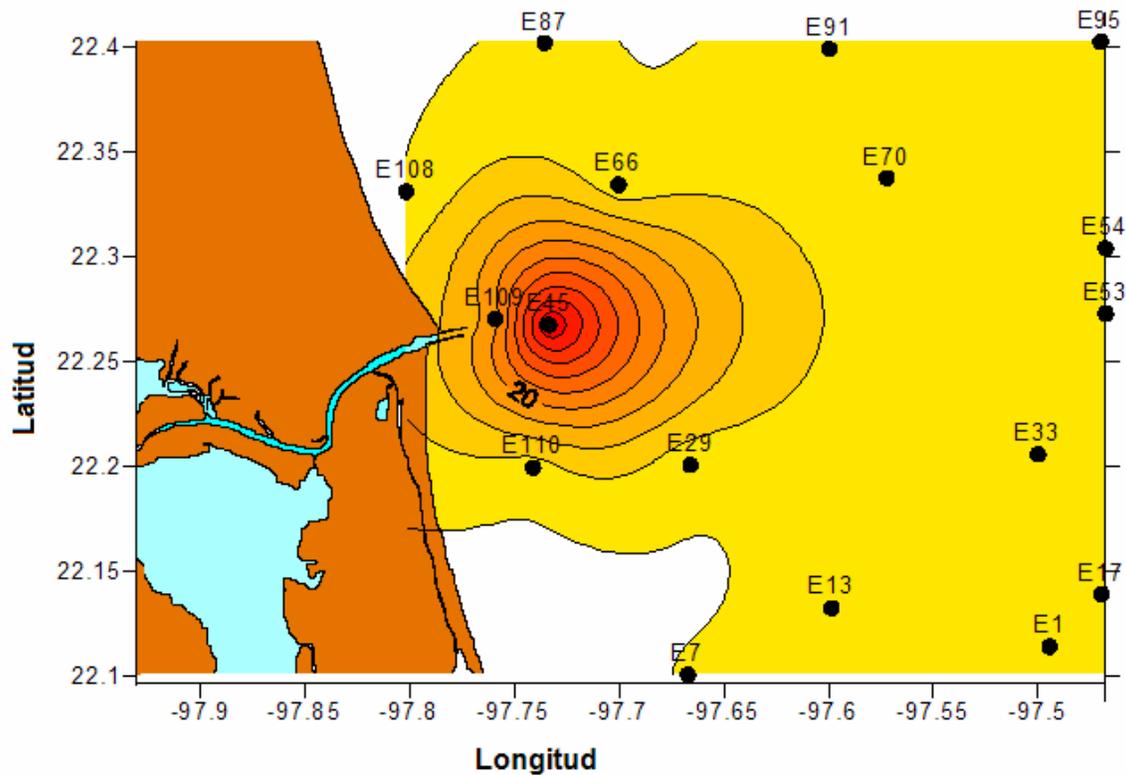


Figura 3. Distribución espacial HA disueltos/dispersos en agua superficial.

De forma similar a lo registrado con los HTP la estación E45 presenta una concentración más elevada que la estación E109 y confirma las suposiciones previas. En la estación E109 la influencia del río se percibe entre los 4 a 8 m. Por el contrario en la estación E45 las perturbaciones por la descarga tienen más influencia en toda la columna de agua. La toma de las muestras de agua se realizó a nivel superficial, por lo cual en la E109, de acuerdo a los comportamientos de la mezcla la influencia del río se podría percibir a una profundidad mayor.

Por el contrario el análisis de HTP muestran una zona de alta concentración en la parte sureste de la zona de estudio, fenómeno que no se percibe con los HA, sin embargo, debido a que son varias las fuentes por la que los hidrocarburos pueden entrar al medio marino no siempre se presenta una relación directa entre el contenido de HTP y los HA. Wetzel *et al* (2003) sugiere la principal fuente de HAP es a través de la depositación atmosférica producto de la combustión.

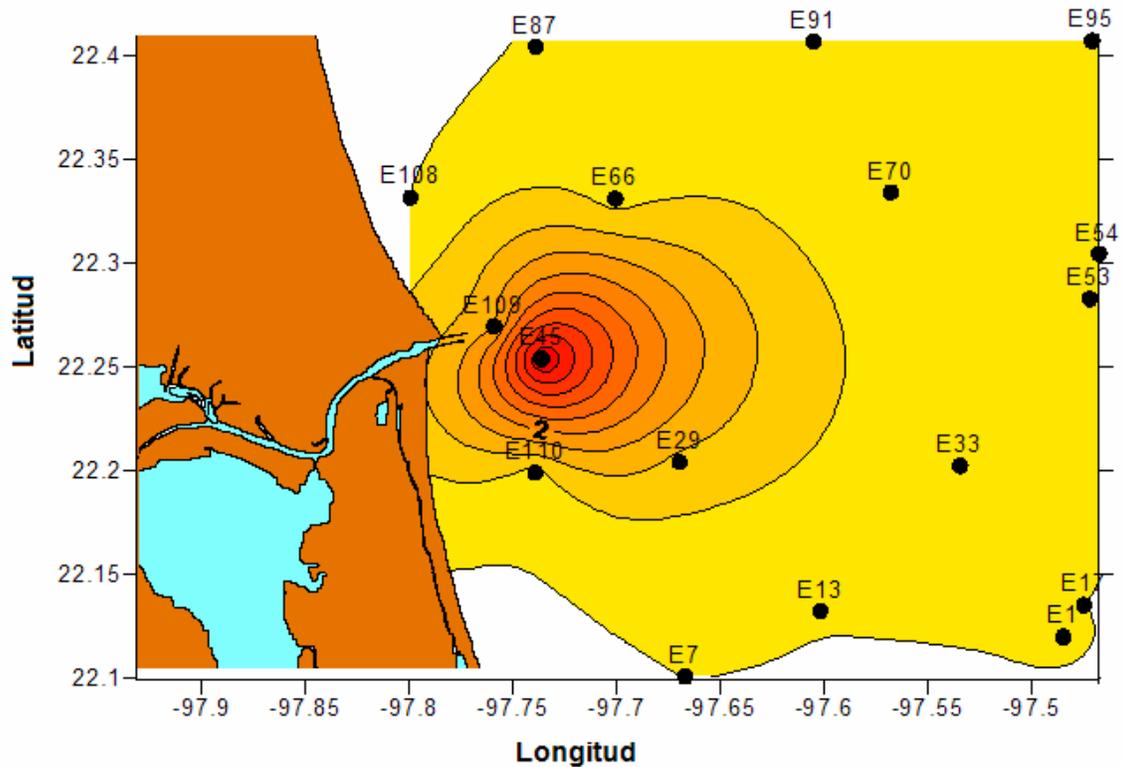


Figura 4. Distribución espacial HA en sedimento superficial.

La distribución espacial para los HA en sedimento (**Figura 11**) muestra que frente a la desembocadura del río se presenta una zona de máxima concentración influenciada por la estación E45. El 18% de las muestras, representado por tres estaciones (E29, E45 y E109) presentan valores por encima del promedio, precisamente éstas estaciones se encuentran adyacentes a la desembocadura del río, lo que hace suponer que el incremento de la concentración en la zona puede ser ocasionadas por la descarga del río.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Cabrera-Ramírez (2003), las estaciones del norte cercanas a la costa (E108 y E64), presentan proporciones altas de arenas, mientras que la estación E110, presenta una proporción alta de limos. Frente a la desembocadura, estación E109, presenta alta proporción de arenas. Con estos resultados se puede estimar que las corrientes del norte ocasionan el arrastre del material fino hacia la parte sur de la escollera, mientras frente a la desembocadura se crean condiciones de alta turbulencia. La estación E45 presenta una mayor proporción de limos, que es consecuencia de la depositación de material fino. Este comportamiento confirma lo señalado por Heidel (1956), donde afirma que los ríos transportan grandes proporciones

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

de sedimentos suspendidos y “lavan” a las arcillas y los limos debido a las diferencias en las tasas de transporte.

La distribución de los sedimentos puede, asimismo, explicar el motivo que la estación E45 presenta niveles mayores que la E109. El material fino tiene mayor superficie de adsorción. En las fracciones más finas se puede acumular mayor contenido de hidrocarburos. Cabrera-Ramírez (2003), señala que en las estaciones más cercanas a la costa predomina el material terrígeno. Este material es arrastrado desde partes altas del río, donde ha adsorbido hidrocarburos en su superficie y se deposita después de la desembocadura. Las corrientes de salida arrastran el material, por tal motivo el sedimento más fino no se acumula en la estación más cercana a la desembocadura sino en la estación E45, donde se encuentran las concentraciones más elevadas por ser material más fino, con mayor superficie de adsorción.

Pánuco II (Nortes)

En el muestreo realizado en el mes de febrero de 2002, Crucero Oceanográfico Pánuco II, se contemplaron un total de 31 estaciones. Sin embargo, las condiciones meteorológicas no permitieron la toma de muestra en los últimos dos puntos programados, que se ubican en la parte noroeste de la zona de estudio.

En la distribución espacial (**Figura 12**), se puede apreciar un comportamiento homogéneo del sistema. La distribución de la salinidad puede dar un indicio de la influencia que ejerce de agua dulce hacia el sistema marino. Los resultados para la salinidad superficial oscilan entre 33.06 a 34.16 unidades de salinidad, poco más de sólo una unidad de salinidad, por lo que no resulta evidente la influencia directa de la descarga de agua dulce.

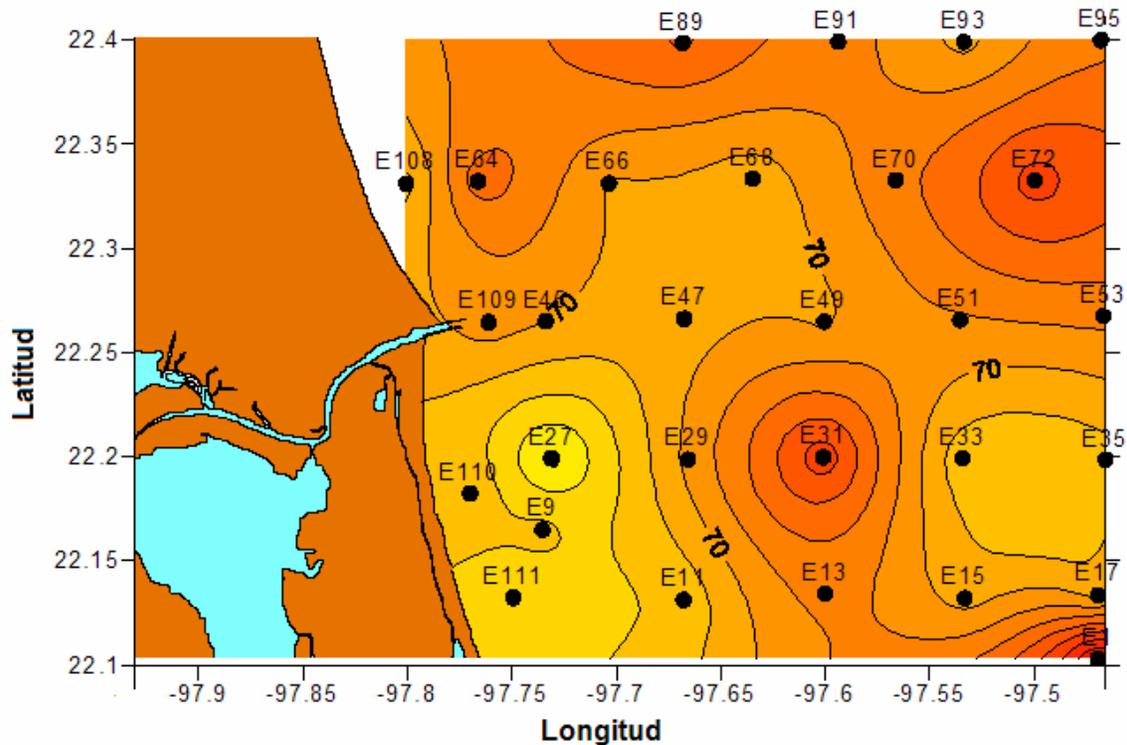


Figura 5. Distribución espacial HTP disueltos/dispersos en agua superficial.

Esta temporada se caracteriza por la intensidad de los vientos procedentes del norte y las lluvias ocasionales que se presentan con éstos frentes, lo que ocasiona la mezcla de las aguas superficiales con el agua de lluvia. Debido a los fuertes vientos que se presentaron durante el crucero se debieron de suspender la toma de muestras en las dos últimas estaciones.

Tanto el comportamiento de la salinidad como el de los hidrocarburos en la superficie presenta un patrón homogéneo, consecuencia del intenso proceso de mezcla ocasionado por los vientos del norte. En cuanto a la distribución espacial de HTP en sedimentos (**Figura 13**) las dos estaciones que presentan los valores máximos, se encuentran cercanas a la desembocadura del río.

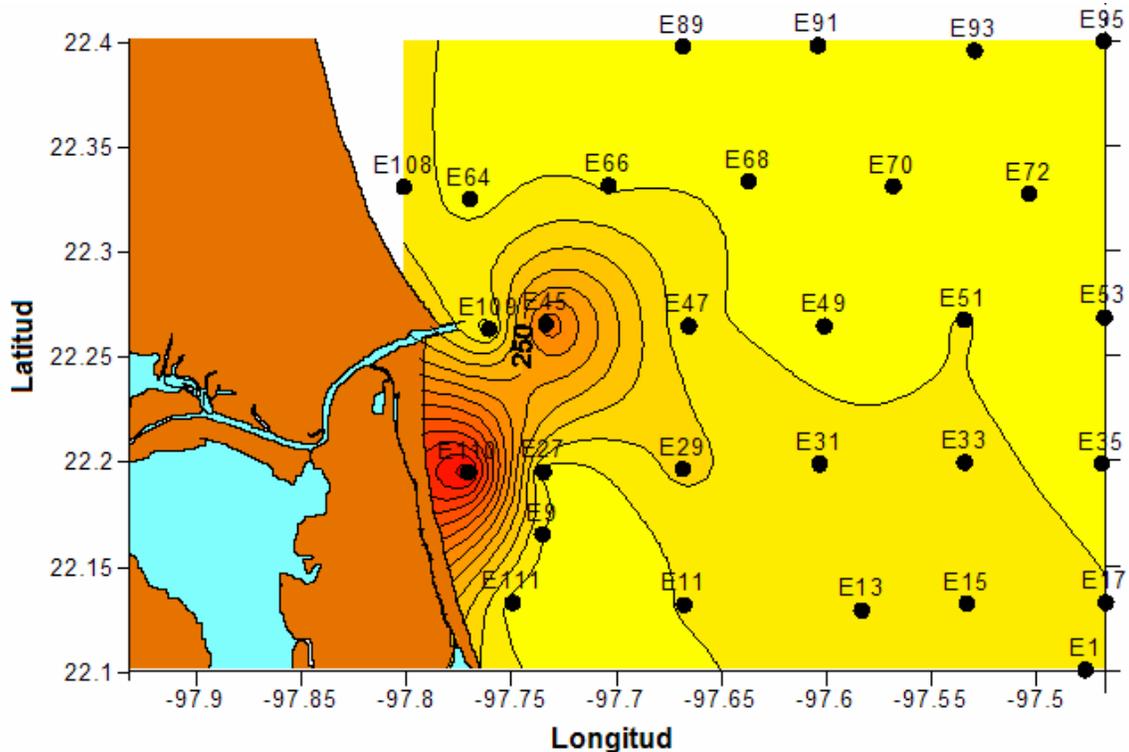


Figura 6. Distribución espacial HTP en sedimento superficial.

De manera similar a la distribución al comportamiento encontrado en el crucero Pánuco I, la estación E45 presenta una concentración superior a la estación E109. Sin embargo, a diferencia de lo registrado en la anterior campaña se tiene que en la estación E110 registra el valor máximo. Ortiz-Gallarza *et al*, (2000), mencionan que en la temporada de nortes la dirección predominante de la corriente es hacia SW y S. Un mecanismo importante en la mezcla es cuando los vientos soplan del norte, la pluma tiende a seguir al frente haciendo que se plieguen las aguas hacia la costa, provocando que la capa se mezcle (Wiseman y Stuges, 1997). Este comportamiento es consistente con lo señalado por González-Orduño (2002) donde menciona que la distribución a 8 m de profundidad es hacia el sur. En la estación E110 el fondo oceánico se ubica a una profundidad de 12 m. A los 8 m de profundidad el agua del río tiende a acumularse en la parte sur de la escollera. La turbulencia provoca la depositación cerca de la estación E110.

El resto de las estaciones presenta un comportamiento homogéneo. Solo el 10 % de las muestras, representadas por las dos anteriormente mencionadas (E45 y E110) y la estación E29 superan el promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Figura 14**, se observa el comportamiento espacial de los hidrocarburos aromáticos disueltos/dispersos en la capa superficial de agua durante el mes de febrero de 2002. El comportamiento del sistema parece homogéneo, no se presentan valores máximos, que puedan ser atribuibles a un fenómeno particular. Los resultados físicos (salinidad y temperatura) presentan una homogénea distribución, siendo consistentes con el comportamiento espacial de los hidrocarburos. La dinámica del sistema puede presentar uniformidad como consecuencia de la mezcla de las capas superiores con las inferiores, ocasionado por los vientos. Con los resultados no se aprecia un aporte de agua dulce hacia el sistema marino, que si bien puede ocurrir no es evidente debido a que los procesos de mezcla son superiores a los aportes.

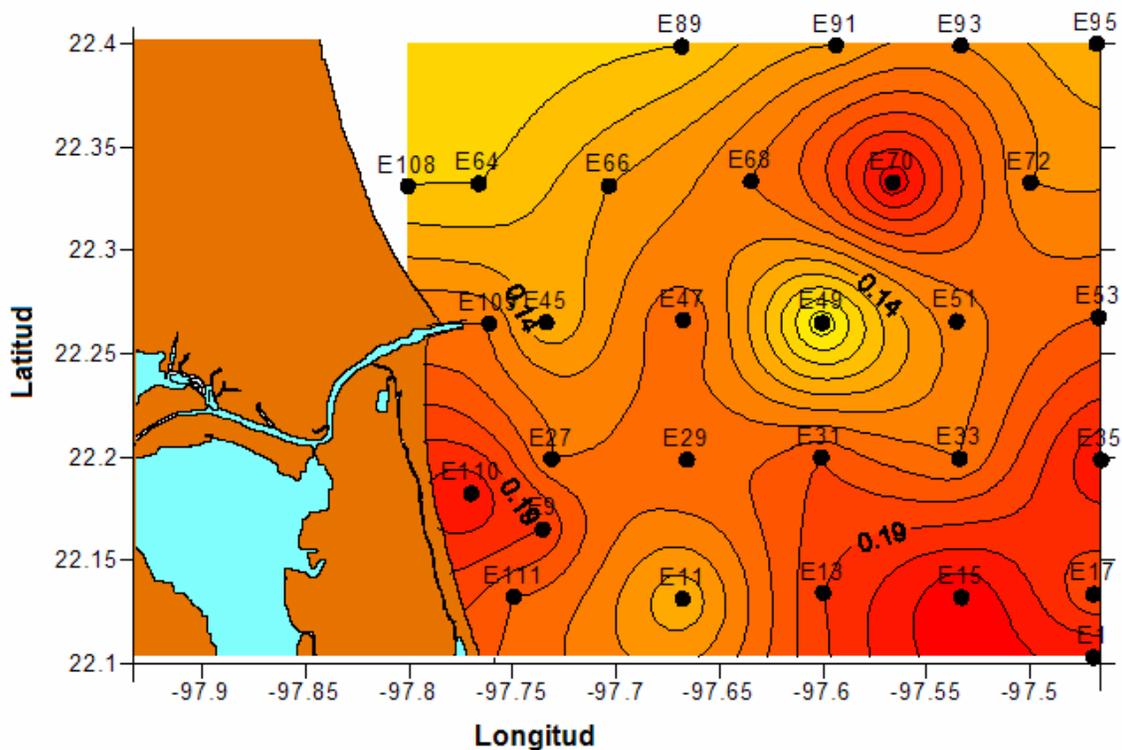


Figura 7. Distribución espacial HA disueltos/dispersos en agua superficial.

El patrón de distribución espacial de los HA en el sedimento (**Figura 15**) muestra una máxima concentración frente a la desembocadura. En las estaciones E45 ($35.66 \mu\text{g/l}$) y E110 (2.56) se encontraron valores por encima de la media. Adicionalmente, las estaciones E29 y E108 tienen concentraciones mayores al grueso de los datos y se encuentran adyacentes la zona de máxima concentración. Como lo menciona Metwally *et al*, (1997) la contaminación se presenta a diferentes grados dependiendo de la distancia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

de la fuente. La distribución espacial puede confundir al lector, el desplazamiento hacia la parte sur puede visualmente enmascarse, debido a la diferencia en concentración entre la estación E45 y el resto. Sin embargo, los resultados para las estaciones E110, E29 y E108, corroboran la acumulación hacia el sur de la escollera.

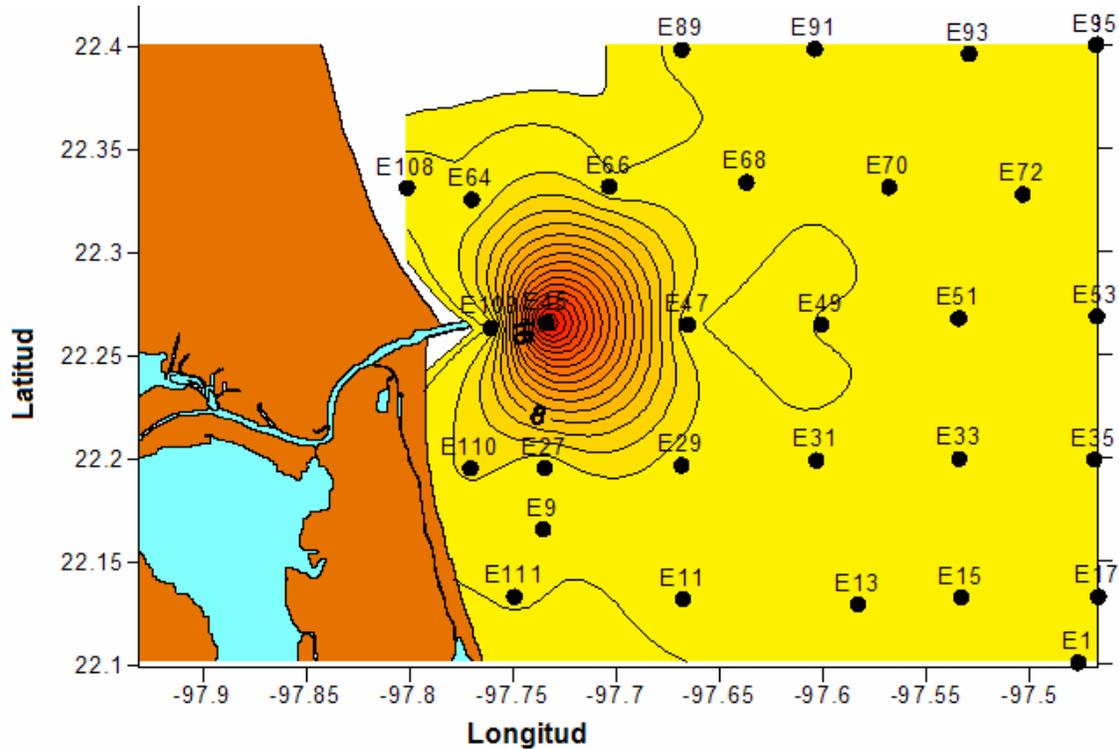


Figura 8. Distribución espacial HA en sedimento superficial.

Las estaciones cercanas a la costa (E108, E64, al norte y E110, E27 al sur) presentaron proporciones altas de arena. De acuerdo con Holmes (1982) el patrón textural se vuelve más fino al aumentar la distancia de la fuente de origen. En la parte sur y norte de la escollera se cumple este hecho. Sin embargo, esto no siempre ocurre en las zonas de frentes como en la desembocadura de un río. La estación E109 se encuentra en la zona de mayor energía. A diferencia del muestreo realizado en mayo de 2000, la estación E109 presenta una proporción mayor de material fino que la estación E45, sin embargo la concentración de hidrocarburos de la primera es menor. Al parecer en la estación E109 el material era más reciente que en la estación E45, debido a los fenómenos de turbulencia y acumulación que se presentan en ésta zona.

Pánuco III (Lluvias)

El Crucero Oceanográfico Pánuco III fue realizado en el mes de Septiembre de 2002. De acuerdo a UNH/GRDC, 2003 y Hudson, 2003, septiembre es el mes del año donde se registra la mayor precipitación anual. El crucero fue planeado para abarcar el periodo de mayor precipitación, sin embargo sólo hasta el último día de muestreo se presentó abundante lluvia. Los registros meteorológicos mostraron condiciones de calma durante los meses anteriores, por tanto las condiciones meteorológicas pueden no reflejar el comportamiento esperado para esta campaña.

Se colectaron y analizaron un total de 31 muestras perteneciente a igual número de estaciones. Tal como se puede apreciar en la **Figura 16**, el patrón de distribución de HTP disueltos/dispersos en agua, presenta dos zonas con concentraciones mayores al promedio. La primera y con mayor representación, la conforman las estaciones E13, E33 y E51, y la segunda, se encuentra frente y hacia la parte sur de la desembocadura. González-Orduño (2003) señala que las estaciones cercanas a la costa muestran una columna de agua bien mezclada, esta puede ser la explicación que frente al río no se registre la máxima concentración, sin embargo los niveles encontrados frente a la desembocadura, pueden indicar como fuente principal de aporte de hidrocarburos la descarga del río hacia el medio marino.

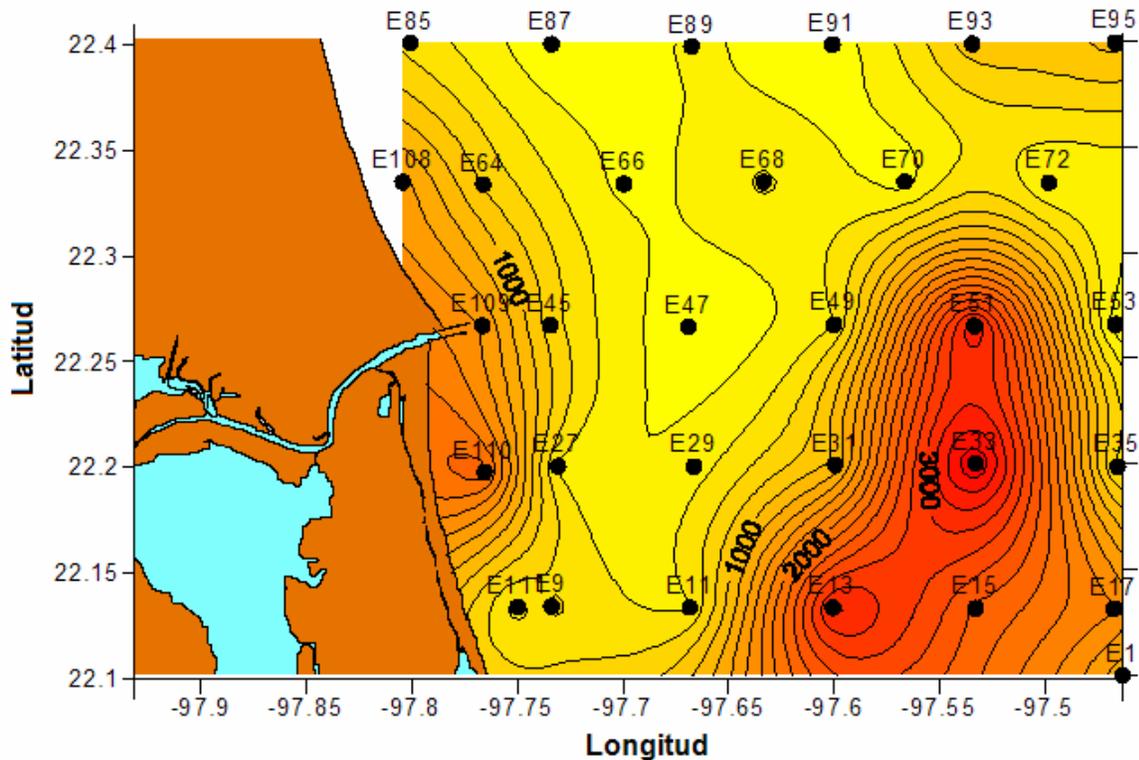


Figura 9. Distribución espacial HTP disueltos/dispersos en agua superficial

La concentración de hidrocarburos para la zona al sureste no puede ser explicado por la descarga del río, más bien puede ser consecuencia de actividades marítimas. El perfil de temperatura y salinidad para estas tres últimas estaciones señala condiciones de mezcla sólo hasta 5 a 10 m de profundidad. Otra posible explicación puede ser consecuencia de las corrientes. Algunos autores han encontrado una contracorriente o remolino frente a la playa (Emilsson *et al.*, 1973). La descarga del río, se presenta en forma discontinua, las menores salinidades superficiales se registraron al sur de la escollera, ésta condición puede ocasionar zonas de altas y bajas concentraciones. La distribución espacial de este tipo de muestreo está fuertemente influenciada por el factor tiempo, ya que a medida que el crucero ascendió en latitud, las condiciones del tiempo fueron cambiando, modificando la estructura de la columna de agua por los vientos del norte y la precipitación pluvial.

En cuanto a los niveles de HTP en sedimentos, de manera similar a lo observado en las campañas anteriores, frente a la desembocadura del río se presenta una zona de alta concentración, provocado por el valor de la estación E45 (**Figura 17**), la cual presenta un caso extremo superior al del resto de los datos con una concentración de 158.67 mg/kg.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la parte noreste la estación (E72) presenta un registro muy superior al promedio 106.56 mg/kg. Este dato puede ser considerado como un valor extremo y que, según los datos de las muestras adyacentes no está influenciado por la descarga del río.

En el río continuamente se realizan actividades de dragado para mantener el calado de las embarcaciones. El material removido, debe ser depositado algunos kilómetros costa fuera. Las dragas transportan este material hasta donde la autoridad lo dispone. Esta puede ser una posible explicación de que la estación E72 presente un valor elevado.

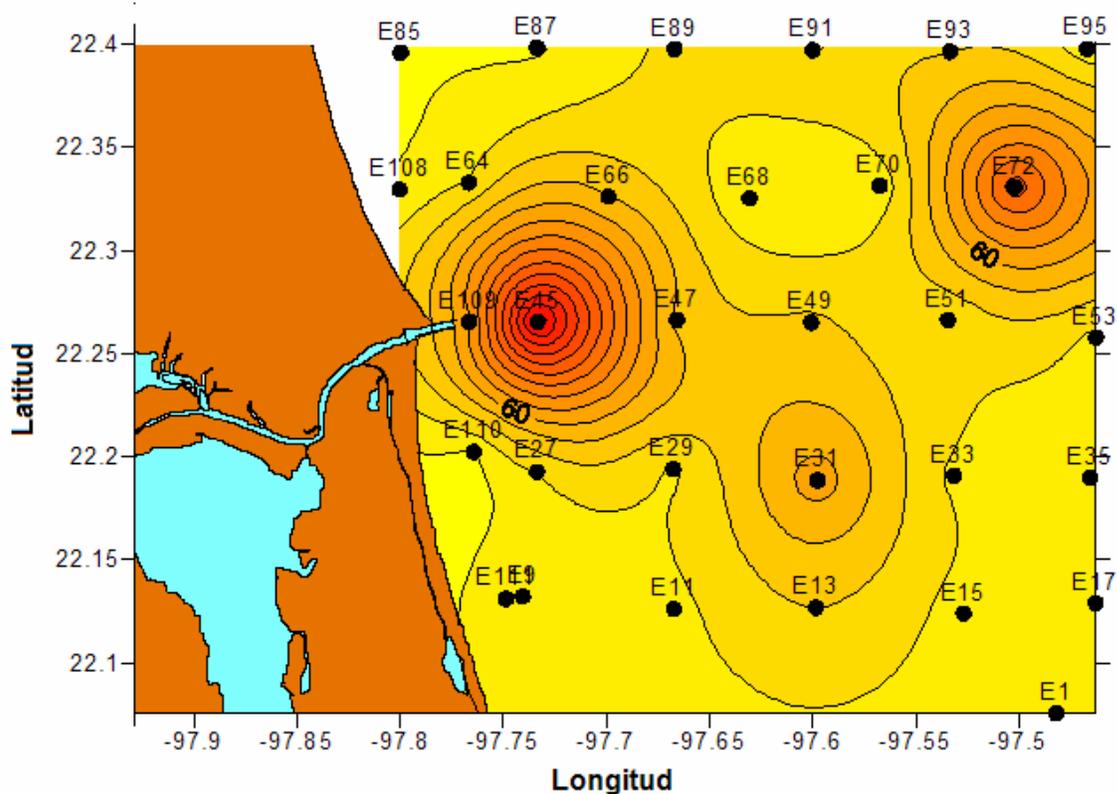


Figura 10. Distribución espacial HTP en sedimento superficial.

Con respecto a la distribución espacial de los HA en la columna de agua durante esta temporada (Figura 18) presenta una zona con alta concentración en la parte sur de la desembocadura (E27), que puede confirmar lo señalado en el comportamiento con los HTP donde al parecer se presenta un desplazamiento hacia el sur de la escollera. González-Orduño (2003) menciona, con datos de temperatura y salinidad, que no resulta evidente la pluma de río sobre las aguas costeras. Lira *et al*, (1997) con imágenes de satélite en el mes de octubre observa un desplazamiento de las corrientes desde el norte

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

hacia el sur. El viento predominante en este muestreo consistentemente provenía del norte. No se observa evidencia clara de la influencia de la pluma hacia el medio marino. La estación E27, de acuerdo a los perfiles de temperatura y salinidad no muestra estratificación. La influencia de la descarga del río no es evidente de acuerdo a los resultados obtenidos por los HA.

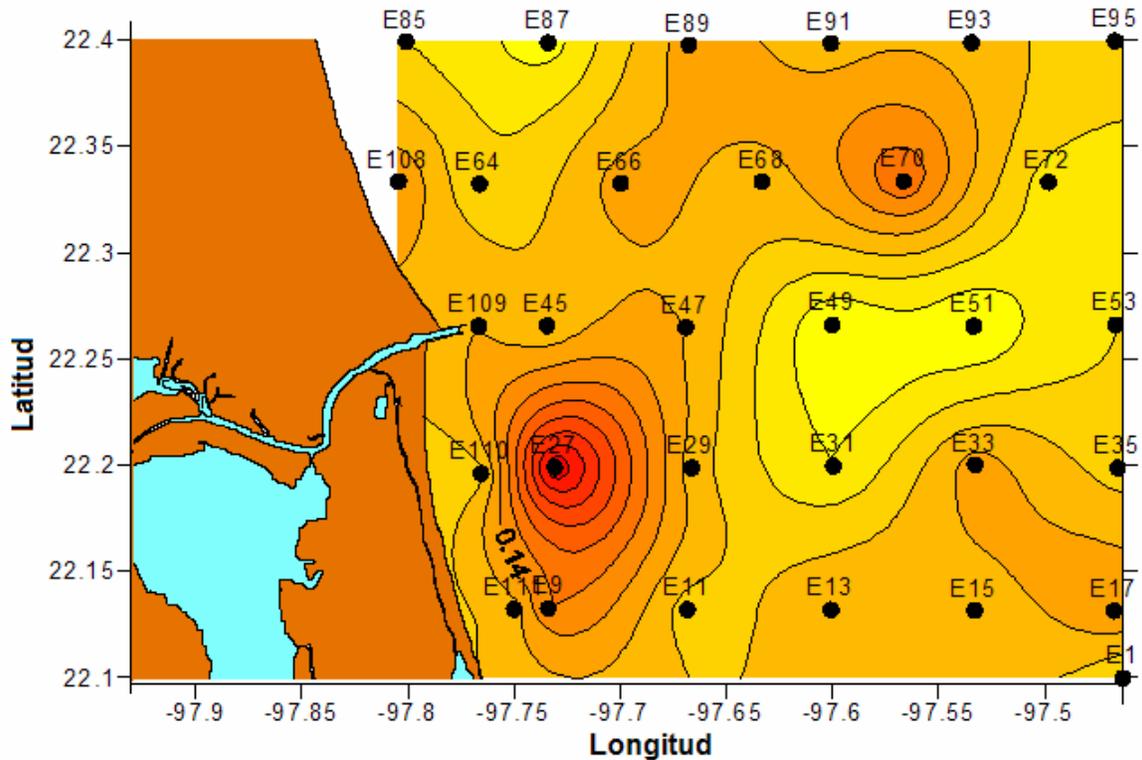


Figura 11. Distribución espacial HA disueltos/dispersos en agua superficial

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera general los resultados de los HA tuvieron un patrón de comportamiento similar a los HTP. Los HA presentan dos zonas con altas concentraciones una frente a la desembocadura, señalada por las estaciones E45 (9.45 mg/kg) y E47 (1.45 mg/kg) y la otra zona en la parte noreste a consecuencia de la estación E72 (8.71 mg/kg). En esta temporada los vientos predominan del norte. Sin embargo, no se observa una acumulación hacia la parte sur de la desembocadura, más bien parece que el sedimento acarreado por el río se acumuló perpendicularmente a la playa, hasta la estación E47, que al parecer es el límite de influencia de la descarga del río hacia el medio marino.

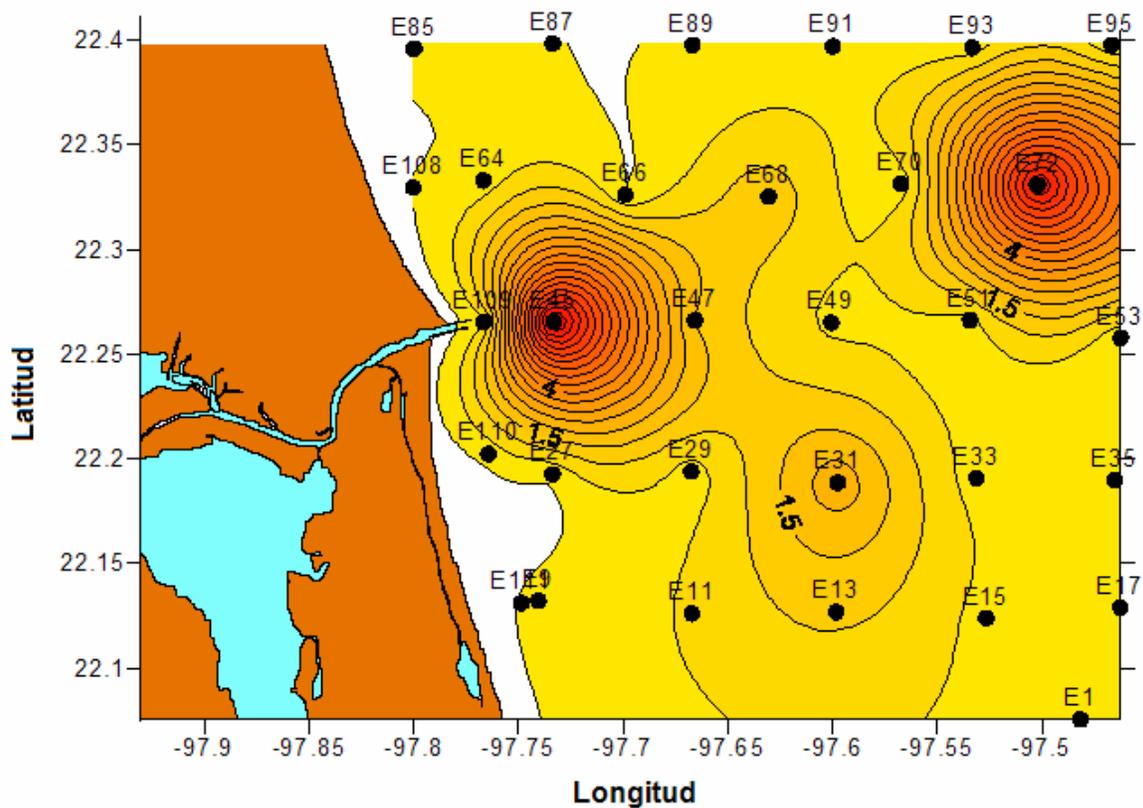


Figura 12. Distribución espacial HA en sedimento superficial

A partir de lo observado por los comportamientos entre los hidrocarburos del petróleo y los HA en sedimento, se aprecia que las distribuciones espaciales de ambos parámetros son muy similares. De manera general, los hidrocarburos se acumularon frente a la desembocadura en los cruceros Pánuco I y Pánuco III. Los procesos estuarinos juegan un rol importante en la distribución y tasa de los contaminantes (Pereira *et al*, 1992).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Asimismo, los vientos del norte ocasionaron que la acumulación del material se presentara hacia la parte sur de la escollera. Lira *et al*, (1997) señala que existe una interconexión muy importante entre el río Pánuco y la zona marina como consecuencia de los sedimentos acarreados por el río, lo cual es consistente con los registros obtenidos durante las tres campañas, evidenciándose una movilidad del sistema sedimentario principalmente frente a la desembocadura del río.

Otro fenómeno que se hizo evidente bajo este análisis es el hecho que en todos los muestreos la estación E109 registró concentraciones menores a la estación E45. Este fenómeno puede ser explicado debido a la dinámica del sistema. Frente a la desembocadura se crean condiciones de alta energía que ocasionan que el material fino depositado sea continuamente removido, además el material limo arcilloso puede adsorber mayor contenido de hidrocarburos que los sedimentos con alto contenido de arenas, las que se presentan principalmente frente a la descarga.

En la campaña denominada Pánuco II el comportamiento difiere ligeramente entre los HA y los HTP. Se observa una acumulación de hidrocarburos del petróleo en la parte sur de la escollera, que no se refleja en los HA. Reddy and Quinn (2001), señalan que la estimación del contenido de HA por la determinación de los HTP puede acarrear un error, debido a que no siempre existe una correlación entre los hidrocarburos del petróleo y los HA, asimismo Singer and Finnerty (1984) mencionan que los alcanos son los primeros componentes en ser degradados. Bajo este supuesto cuando se presenta un incremento en la proporción de HTP/HA se puede estimar una descargas reciente, sin embargo, este supuesto debe de ser comprobado con diferentes tipos de estudios. De manera general el comportamiento espacial en el sistema entre ambos parámetros es muy similar en el resto de los muestreos.

Análisis Temporal

Los niveles de hidrocarburos en un sistema marino fluctúan con el tiempo (Esteves and Commendatore, 1993), bajo este principio se agrupó el total de los datos para visualizarlo en forma de diagramas de cajas y bigotes (Box and Whisker Plot) y obtener una agrupación de toda la zona de estudio por crucero oceanográfico, señalando la dispersión y el comportamiento general entre diferentes muestreos. El diagrama de cajas y bigotes resume un conjunto de observaciones univariadas. Es una herramienta de análisis exploratorio de datos que es útil para estudiar la simetría, verificar suposiciones sobre una distribución y detectar puntos extremos (*outliers*). Sirve para comparar lotes paralelos de datos. De este análisis visual se pueden distinguir semejanzas y diferencias entre los lotes respecto al total de los datos (nivel, dispersión, sesgo y casos extraordinarios). Cuando las cajas se presentan con muestras laterales alrededor de la mediana se facilitan las evaluaciones de la localización.

Los extremos en los diagramas de cajas son guías en la comparación del nivel de medianas aún cuando los requerimientos para la realización de pruebas de hipótesis no se cumplen estrictamente. Cuando extremos de los datos analizados muestran traslape no existe una diferencia estadísticamente significativa entre lote y lote de datos. De esta manera se puede explorar gráficamente el conjunto comparándolos con otro conjunto de datos.

El análisis de cajas está basado en una agrupación del total de los datos. La línea intermedia señala la mediana de todos los valores. Se utiliza la mediana por ser una medida de tendencia central con menor influencia de los casos extremos. El punto en medio de la caja señala la mediana, de esta manera se puede observar la diferencia entre la mediana y el promedio, cuando difieren ambos valores es debido a que el promedio se desplaza por los casos extremos. Al graficar los resultados por campaña se pueden realizar una comparación temporal del comportamiento en las distintas épocas del año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hidrocarburos totales del petróleo en agua

El promedio de los resultados de los HTP disueltos/dispersos en agua durante la temporada de secas muestran un valor promedio de 54.11 $\mu\text{g/l}$, con una mediana de 47.70 y una desviación estándar de 26.05; el 47% de los resultados se encuentra por encima de las 50 mg/kg . Por otra parte, en el siguiente muestreo, Pánuco II, el valor medio fue de 73.89 $\mu\text{g/l}$, con una mediana de 68.50 $\mu\text{g/l}$, una desviación estándar de 24.98. El 93% de los resultados fue superior a 50 $\mu\text{g/l}$, teniendo un intervalo desde los 26.3 $\mu\text{g/l}$ a 143 $\mu\text{g/l}$. Finalmente para el último crucero éste mismo análisis presentó mayor amplitud en los resultados, encontrándose como límite inferior 3.47 $\mu\text{g/l}$ y 382.2 $\mu\text{g/l}$ como valor extremo superior, el valor promedio fue de 98.79 $\mu\text{g/l}$, con una mediana de 53.32 $\mu\text{g/l}$ y una desviación estándar de 104.5. El 55% de los resultados (17 de 31 muestras) se encuentran por encima de los 50 $\mu\text{g/l}$.

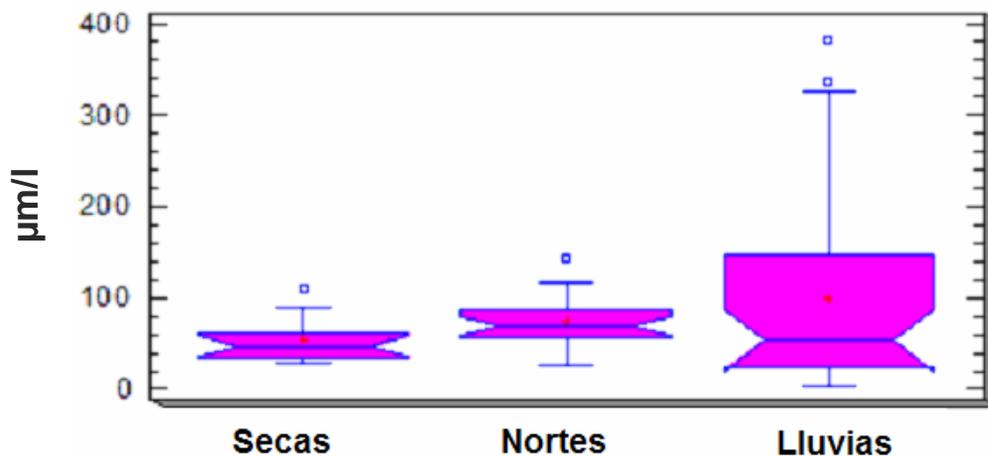


Figura 13. Variabilidad temporal HTP disueltos/dispersos en agua superficial.

Como se puede apreciar en la **Figura 13**, en la temporada de secas se encuentra poca dispersión de los resultados, prácticamente todos los valores se agrupan por debajo de las 100 $\mu\text{g/l}$. El comportamiento en la temporada de nortes parece indicar que en general el contenido de hidrocarburos del petróleo en el sistema se incrementó, manteniendo la tendencia para el último crucero (Lluvias). Sin embargo, la distribución de los resultados, en el último muestreo, señala una mayor dispersión y un promedio por encima del valor de la mediana. La mediana una medida de tendencia central menos influida por los casos extraordinarios. A pesar de la variación entre los tres distintos periodos de muestreo, no

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

se observa traslape entre las cajas, por lo que se puede asumir que no existe diferencia estadísticamente significativa entre cada uno de los tres periodos de muestreo.

Los hidrocarburos provenientes de tierra adentro emitidos por fuentes naturales o antropogénicas son movilizados por el transporte atmosférico asociados con partículas (Ventajas, 1986; Vázquez-Botello *et al*, 1993; Dale *et al*, 1995). La lluvia es una importante fuente de hidrocarburos en ambientes costeros. Principalmente en sitios cercanos a zonas urbanas (Calva and Botello, 1999; Ngabe *et al*, 2000). En el primer crucero (temporada de secas) se presentan las condiciones más homogéneas en el sistema y las concentraciones tienden a ser menores. Para el segundo muestreo las concentraciones aumentan ligeramente. Por el contrario en la época de lluvias, se observa una mayor dispersión de los datos, sin embargo, la tendencia general se mantiene y es consistente con las dos campañas previas. El transporte atmosférico y la precipitación asociada a la lluvia pueden explicar el comportamiento para la tercera temporada. En las dos últimas temporadas se presentaron condiciones meteorológicas diferentes a la primera campaña.

Hidrocarburos totales del petróleo en sedimento

Los sedimentos estuarinos de ríos urbanos contienen hidrocarburos del petróleo los cuales se derivan de numerosas fuentes. Las descargas de ríos y los propios sedimentos por procesos de arrastre contribuyen a la introducción de contaminantes al medio marino (Cedeño, 1991; Bouloubassi *et al*, 2001). El contenido de los hidrocarburos en el mar tiende a fluctuar a través del año y están sujetos a variaciones estacionales (Abdullah, 1996). Por el contrario en los sedimentos se acumulan los hidrocarburos y permanecen durante mayor tiempo. El contenido de hidrocarburos en sedimento resulta ser un índice adecuado para evaluar la contaminación (Beltrán *et al*, 1997). Las desembocaduras de ríos y las playas son lugares donde pueden presentarse con mayor frecuencia modificaciones originadas por condiciones locales, ya que están más expuestos a las corrientes; y en el caso de la zona de estudio, a las actividades de dragado.

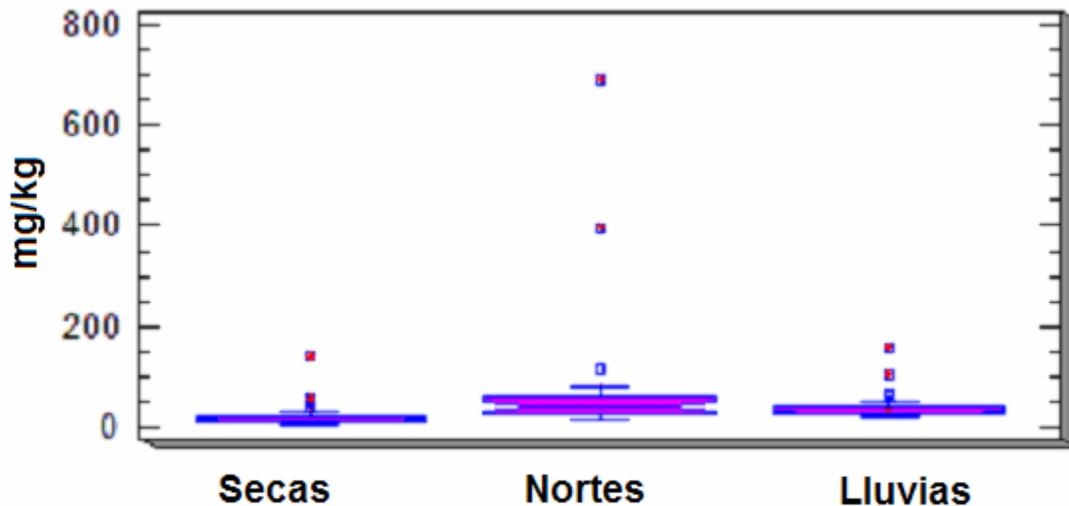


Figura 14. Variabilidad temporal HTP en sedimento superficial

La determinación de los HTP en sedimento para la temporada de secas, tuvo un promedio de 29.4 mg/kg, con una mediana de 19.3 mg/kg y una desviación estándar de 32.9. Sólo una de las diecisiete estaciones (6%) presentó una concentración por encima de las 70 mg/kg. Por otra parte, en nortes promedio de los resultados en el sedimento fue de 79.5 mg/kg, la mediana de 43.24 mg/kg y la desviación estándar de 135.9; el 48 % de los

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

resultados presentó una concentración por encima de las 70 mg/kg. El resumen estadístico de los resultados obtenidos para los HTP en sedimento para la campaña realizada en lluvias, señalaron un promedio de 38.8 mg/kg, la mediana de 28.7, con un intervalo desde 18.6 hasta 158.7 mg/kg. Sólo el 7% de los resultados, representado por 2 muestras, se encuentran por encima de 70 mg/kg.

El análisis temporal para los hidrocarburos del petróleo en sedimento, representado por el gráfico de cajas (**Figura 14**), muestra ligeras variaciones. Para el muestro denominado Panuco I el valor máximo superior extraordinario fue consecuencia de la estación E45. Por otra parte, en los nortes la estación E110 alcanzó la concentración más elevada y finalmente en el último muestreo nuevamente la concentración más elevada se registró en la estación E45.

En la campañas oceanográficas de secas y lluvias los valores extremos superiores están asociados a la desembocadura del río (estación E45), debe recordarse que el último crucero, por fechas, corresponde a lluvias, sin embargo las condiciones meteorológicas no registraron tal comportamiento. En la temporada de nortes valor extremo se debe a la Estación E110, sin embargo, la estación E45 presenta el segundo valor más alto. En el resto de la zona de estudio se presenta una distribución uniforme de las concentraciones, lo que hace suponer que la descarga del río ejerce influencia sobre las concentraciones de hidrocarburos en el sedimento frente a la desembocadura del río. Sria. De Marina (1998 a, b, c) señala que la zona más costera es el área que presenta mayor variabilidad temporal, observándose en la temporada de nortes una disminución de la proporción de arenas. En secas y nortes frente a la desembocadura (E109) se presentaron bajas proporciones de arenas, comportamiento contrario en la estación E45, al parecer la zona con mayor dinamismo es precisamente en la zona inmediata a la descarga del río. Las corrientes arrastran el material sedimentario, teniendo influencia en las estaciones más cercanas a la costa.

Hidrocarburos aromáticos en agua

El resumen estadístico de los análisis determinados para los HA disueltos/dispersos, en la temporada de secas muestra que en el promedio fue de 5.0 $\mu\text{g/l}$, con un valor en la mediana de 0.87 y la desviación estándar de 12.98, dos estaciones presentaron valores muy superiores al resto de las estaciones. Por otra parte en nortes se alcanzó un promedio de 0.23 $\mu\text{g/l}$, una mediana de 0.16 y una desviación estándar del 0.40. El intervalo de los datos se encuentra desde 0.09 hasta 2.32 $\mu\text{g/l}$. Los resultados determinados en lluvias muestran en promedio un valores de 0.108 $\mu\text{g/l}$, la mediana de 0.11 y la desviación estándar de 0.045.

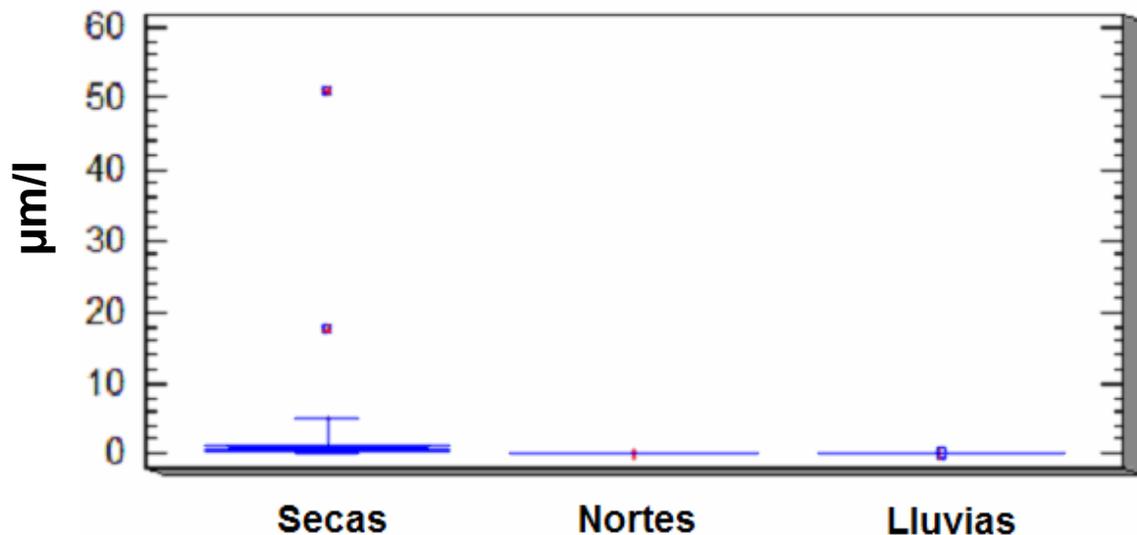


Figura 15. Variabilidad temporal HA disueltos/dispersos en agua superficial

El comportamiento temporal presentado por el análisis de cajas y bigotes se observa que en secas se obtuvieron las concentraciones más altas con respecto a los siguientes dos cruces (Figura 15), un valor extremo alcanzó los 51.07 $\mu\text{g/l}$. En las siguientes dos campañas se presentan condiciones de tendencia central similares. Partiendo de estos resultados se hace notar que en la temporada de secas es cuando se presentan los valores más elevados en las concentraciones de HA y es cuando se pueden presentar casos extremos. Wattayakorn *et al*, (1998) en un estudio realizado en la descarga de un río durante la temporada de secas señala que la corriente neta fue pequeña y provocó una ligera mezcla entre el agua del río y la costera, este mismo fenómeno se presentó en

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

el sistema. Con los resultados de los parámetros físicos y químicas se logra identificar una ligera influencia de la descarga del río.

En las siguientes dos temporadas las condiciones generales tienden a ser más homogéneas con disminución general de los HA y con poca dispersión. Bajo condiciones de turbulencia los procesos de dilución y degradación se aceleran (Betz en Perez-Nieto, 1980), al parecer en las dos últimas campañas los procesos de dilución y degradación se vieron favorecidos. El motivo de este comportamiento parece ser consecuencia de las condiciones de turbulencia que ocasionan una mezcla del material que se ve reflejado en la homogeneidad del sistema.

De acuerdo a este análisis, en la temporada de secas se presenta un comportamiento diferente a los siguientes dos periodos. A pesar de la diferencia visual, con un 95 % de confianza se puede afirmar que no existen diferencias estadísticas entre el total de los datos en los tres periodos de muestreo.

Hidrocarburos aromáticos en sedimento

Los resultados de HA asociados al sedimento, durante el crucero Pánuco I, presentan un promedio de 0.50 mg/kg, con un valor en la mediana de 0.04 mg/kg y una desviación estándar de 1.25. Para la siguiente campaña el promedio fue de 1.63 mg/kg y la mediana de 0.23; la desviación estándar fue de 6.58. En el tercer muestreo el promedio fue 0.95 mg/kg, con un valor en la mediana de 0.26 mg/kg, y una desviación estándar de 2.23.

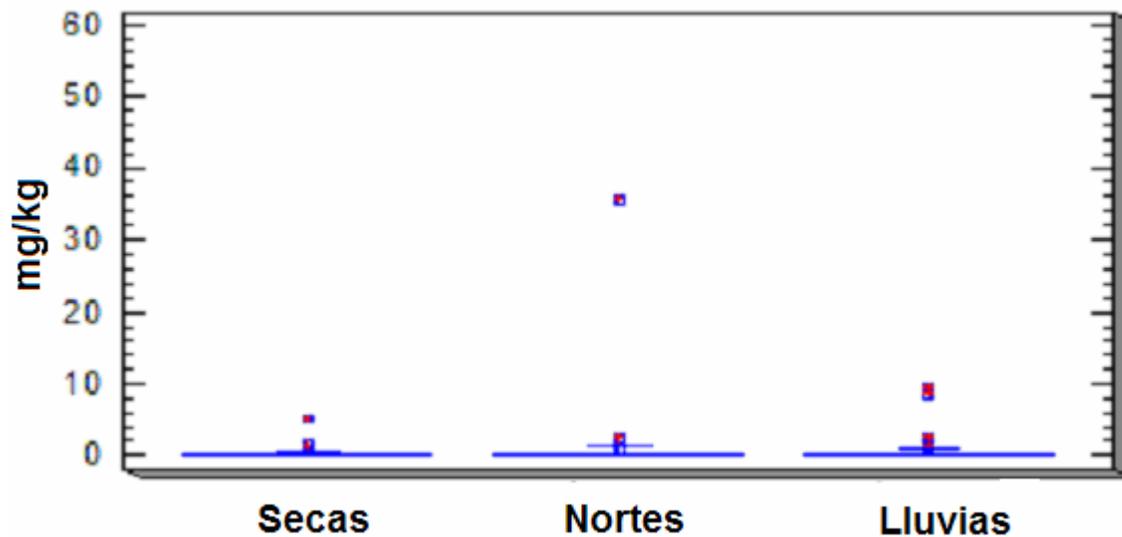


Figura 16. Variabilidad temporal HA en sedimentos superficiales

El comportamiento temporal para los HA en sedimento (**Figura 16**) presenta un patrón homogéneo en los tres periodos, variando ligeramente los valores de la mediana. De forma general, en lluvias se registraron las concentraciones más elevadas para la zona. La temporada que presenta mayores variabilidades fue el muestreo realizado en el mes de febrero (nortes), cuando la estación E45 alcanzó 35 mg/kg. El resto del sistema muestra una distribución muy homogénea. Los datos extremos están representados por la misma estación (E45) en las tres temporadas. Sólo frente a la desembocadura se presentan las mayores concentraciones. Este hecho puede señalar que los procesos de acumulación se manifiestan principalmente frente a la desembocadura del río (Estación E45). El resto del sistema presenta concentraciones muy similares, que parece indicar que éste parámetro se ve ligeramente influenciado por la temporalidad a excepción de las estaciones más cercanas a la costa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La descarga promedio del río Pánuco en el mes de mayo es de 154 m³/s, en febrero es de 144 m³/s y para el mes de septiembre de 1,383 m³/s (UNG/GRDC, 2003 y Hudson, 2003). En el mes de febrero (menor descarga) es cuando se presentan las concentraciones más altas frente a la desembocadura. La estación E45 en este mes alcanza concentraciones hasta casi tres veces mayores a los restantes muestreos. Adicionalmente, se presenta una zona en la parte sur de la escollera con alta concentración que al parecer demuestra que la contaminación tiende a acumularse en esta área debido a la acción de la corriente marina (Commendatore *et al*, 2000). Ortiz-Gallarza *et al*, 2000, señala que para la temporada de nortes la dirección principal de las corrientes son al SW y S, con velocidades medias de 8.4 cm/seg.

El comportamiento de los registros para toda la zona de estudio en las tres temporadas es muy similar, a pesar de los casos extremos no se presenta diferencia estadísticamente significativa entre cada uno de los periodos. Este hecho puede ser explicado debido a que sólo las estaciones más cercanas a la desembocadura son las que presentan mayor variabilidad. En el resto del área las condiciones se mantienen más estables. Los casos extremos identificados en las estaciones cercanas a la desembocadura son debido a tres factores principales: la descarga de agua dulce, la cantidad de sedimentos arrastrados por el río y las condiciones meteorológicas. En la temporada de nortes los vientos provocan el movimiento de la columna de agua, originando una dirección de las corrientes hacia la parte sur y ocasionando el arrastre y dispersión del material frente y al sur de la desembocadura. En la temporada de secas el material acarreado por el río es mínimo, pero se acumula hasta el inicio de la temporada de lluvias. De acuerdo a lo señalado por Hudson (2003) las mayores descargas de sedimento ocurren en el mes de junio, al inicio de la estación lluviosa. En el mes de septiembre se presenta la mayor descarga, pero el material suspendido ha sido acarreado en meses previos. Con estos datos es necesaria la realización de un muestreo al inicio de la estación de lluvias cuando se descarga la mayor cantidad de sedimentos hacia el medio marino y cuando pueden identificarse mayores aportes antropogénicos.

Análisis estadístico (componentes principales)

El presente trabajo forma parte del proyecto FIES 98/19/VI, R.00054 “Análisis Ambiental Interdisciplinario de la zona Marina del Golfo de México, comprendida entre los 22°06´ y 22°45´ latitud norte y 97°20´ a 97°50´ longitud oeste, con el apoyo de imágenes de satélite”. Este trabajo de tesis se enfocó en la determinación y análisis del comportamiento de los HA e HTP en las matrices de agua y sedimento, sin embargo, la participación de diferentes instituciones enriqueció la evaluación del comportamiento del sistema, así para ello, se analizaron diferentes parámetros en cada uno de los cruceros. A bordo del buque se realizó la medición de diferentes parámetros físicos como temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. El Instituto de Ciencias del Mar y Limnología realizó la determinación de algunos otros parámetros químicos y físicos como contenido de níquel, vanadio, materia orgánica y tamaño de sedimento. Para una evaluación integral se utilizaron éstos parámetros para compararlos con el comportamiento de los hidrocarburos.

El análisis de componentes principales es uno de los análisis estadísticos que se utilizó para apoyar los resultados del comportamiento espacial y temporal de los hidrocarburos. El objetivo de este análisis es aproximar las correlaciones entre las diferentes variables e identificar condiciones o comportamientos que se puedan distinguirse del resto. Este análisis es muy eficaz para la exploración de datos cuantitativos que se presentan bajo diferentes variables y diferentes observaciones, permitiendo visualizar y analizar rápidamente las correlaciones, de tal forma que la dispersión entre los datos sea preservada cuanto más posible.

Esta prueba estadística se realizó para identificar la relación entre los distintos parámetros evaluados, con énfasis en la relación entre los hidrocarburos con el resto de los variables. Se consideró que existe un comportamiento diferente, aunque dependiente a lo largo del tiempo entre la matriz agua y la matriz de sedimento. Por tal motivo y para identificar relaciones locales y puntuales, los parámetros fueron evaluados de forma independiente. En primer lugar se describen los resultados del análisis de componentes principales en la de matriz sedimento para cada una de las temporadas y posteriormente se muestran los resultados del análisis para la componente agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de las variables en sedimento

Pánuco I (Secas)

Esta prueba estadística se empleó para identificar la relación entre los hidrocarburos con el resto de las variables analizadas. En el análisis se consideraron las características granulométricas (índice de fineza), contenido de metales (níquel y vanadio) y materia orgánica.

De acuerdo al análisis de componentes principales, el 73.97% de la variación de los datos fue debida a dos factores principales. Para confirmar el hecho que una variable está fuertemente vinculada a un factor, se obtuvo el coseno cuadrado de las variables. El valor más alto del factor 1 corresponde a la variable materia orgánica, mientras que el valor más alto del factor 2 corresponde al níquel. Con estos factores se puede estimar que la materia orgánica y la concentración de níquel son los responsables de 73.97% de la variación de los datos. Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales de las variables determinadas en el sedimento se resumen en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en sedimento en la campaña Pánuco I (Secas).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propio	2.884	1.554	0.835	0.518	0.193	0.015
% varianza	48.071	25.903	13.911	8.635	3.223	0.257
% acumulado	48.071	73.975	87.886	96.521	99.743	100.000

Tabla 2. Valores propios calculados para los dos factores principales

Factor 1	Factor 2
Materia orgánica	Níquel
0.719	0.414

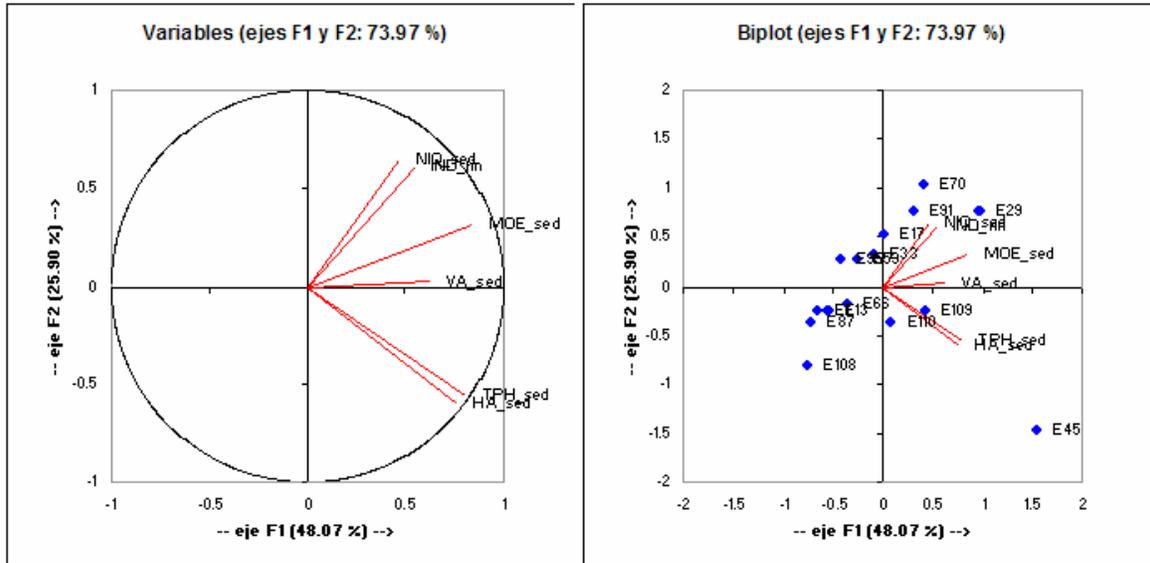


Figura 17. Análisis de componentes principales, variables en sedimento (Pánuco I).

En base en el análisis gráfico del análisis de componentes principales (**Figura 24a**) se observa, como ha sido descrito anteriormente que, existe una estrecha relación entre la concentración de HA con hidrocarburos del petróleo. A su vez se presenta una correlación positiva entre el índice de fineza con la concentración de níquel. El contenido de materia orgánica y el contenido de vanadio tienen un comportamiento independiente con el resto de las variables.

Del análisis biplot (**Figura 24b**) se puede observar que como estaciones particulares, es decir, excéntricas del resto de los datos, se presentan la E45 y la E108. Como anteriormente ha sido descrito debido al contenido de hidrocarburos, la estación E45 presenta los valores más extremos, al parecer esta puede ser la explicación que ésta estación se aleje de resto de los datos. Por otro lado, la estación E108 presentó un alto contenido de arenas, por lo tanto un bajo índice de fineza, este parámetro puede ser el responsable del desvío con respecto al resto de los datos.

Pánuco II (Nortes)

Para la segunda campaña el análisis de componentes principales señaló que el 83.88% de la variación de los datos fue debida a tres factores principales. El valor más alto del factor 1 corresponde a la variable Níquel, el valor más alto del factor 2 corresponde a los HA y el valor más alto del factor 3 es debido al índice de fineza. Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales para las variables determinadas en el sedimento se resumen en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en sedimento en la campaña Pánuco II (Nortes).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propio	2.223	1.643	1.167	0.565	0.222	0.180
% varianza	37.051	27.387	19.447	9.408	3.699	3.008
% acumulado	37.051	64.437	83.884	93.293	96.992	100.000

Tabla 4. Valores propios calculados para los tres factores principales.

Factor 1	Factor 2	Factor 3
Níquel	HA	Índice de Fineza
0.820	0.856	0.640

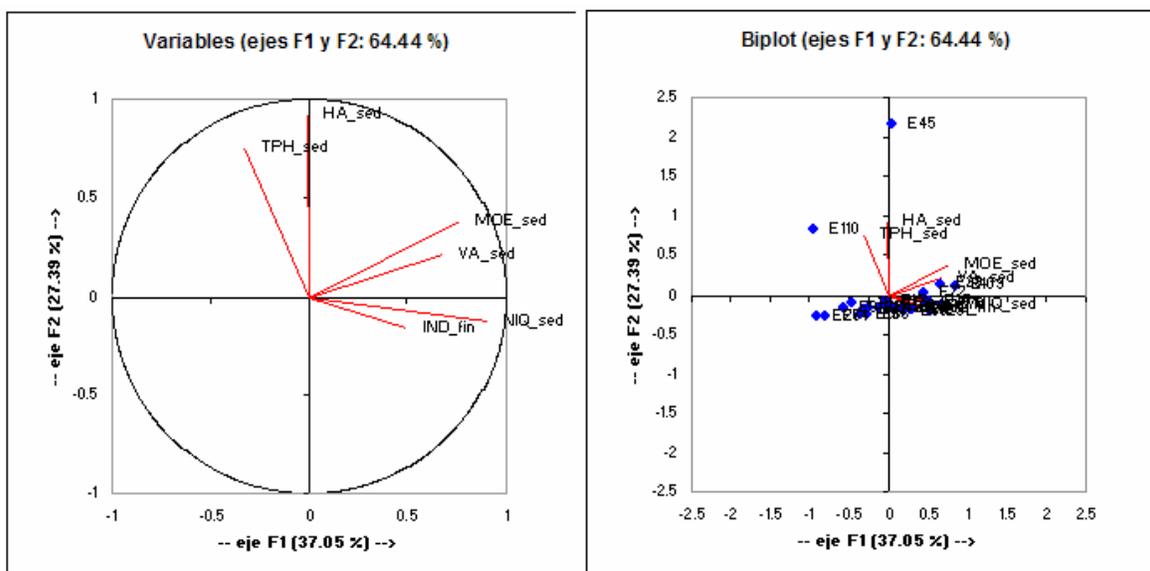


Figura 18. Análisis de componentes principales, variables en sedimento (Pánuco II).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base en el análisis gráfico de componentes principales, como se ha sido analizado, se observa que existe una fuerte relación entre la concentración de HA con HTP (**Figura 25a**). Al parecer se relacionan de manera positiva el índice de fineza con la concentración de níquel y al parecer el contenido de contenido de materia orgánica se acompaña con el aumento en la concentración de vanadio. Del análisis biplot se puede observar que como estaciones particulares, es decir, excéntricas del resto de los resultados, se presentan la estación E45 y la estación E110 (**Figura 25b**), al parecer la excentricidad de estas estaciones es consecuencia principal del contenido de HA, de la fuerte relación de éstos con los HTP, y la baja vinculación de ambos con el resto de las variables.

Pánuco III (Lluvias)

El tercer y último crucero (Pánuco III) muestra de acuerdo al análisis de componentes principales que el 72.27% de la variación fue debida a dos factores principales. El valor más alto del factor 1 corresponde a la variable vanadio, mientras que el valor más alto del factor 2 corresponde a los HA. Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales para las variables determinadas en el sedimento se resumen en la Tabla 5 y Tabla 6.

Tabla 5. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en sedimento en la campaña Pánuco III (Lluvias)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propio	3.089	1.547	0.609	0.579	0.116	0.060
% varianza	51.490	25.777	10.147	9.653	1.935	0.998
% acumulado	51.490	77.267	87.414	97.067	99.002	100.000

Tabla 6. Valores propios calculados para los tres factores principales.

Factor 1	Factor 2
Vanadio	HA
0.658	0.569

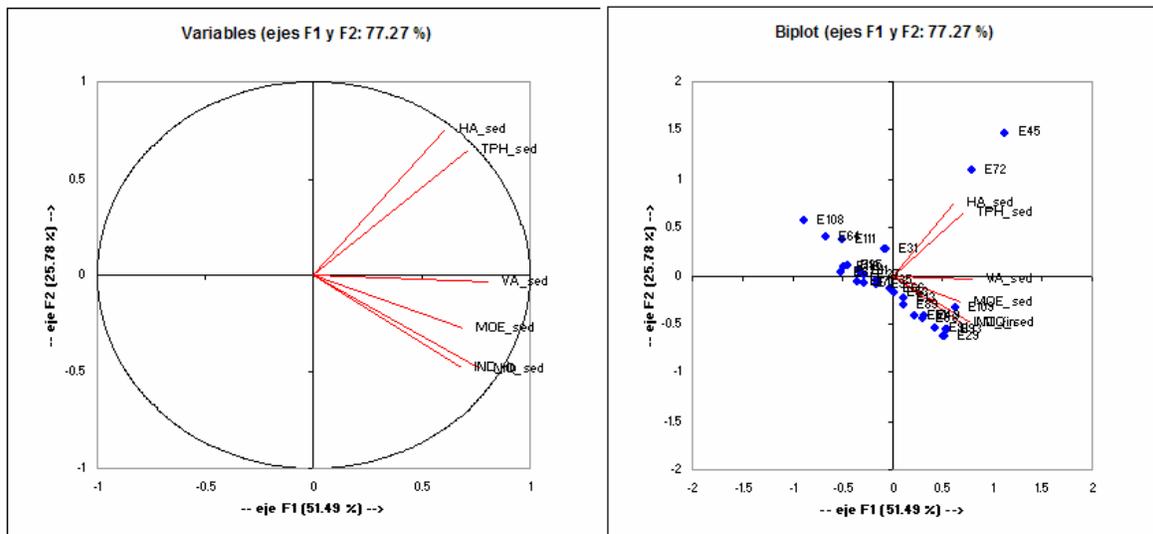


Figura 19. Análisis de componentes principales, variables en sedimento (Pánuco III).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como ha sido demostrado por otros análisis y como se observa en el análisis gráfico de componentes principales existe una fuerte relación entre la concentración de HA con el contenido de hidrocarburos del petróleo (**Figura 26a**). Por otra parte se observa que el incremento en la concentración de níquel va acompañado del aumento en el índice de fineza, es decir a menor tamaño de partícula mayor afinidad por la adsorción del metal níquel. Tal como se ha observado en las anteriores campañas el contenido de materia orgánica y la concentración de vanadio en sedimento parecen presentar un comportamiento independiente al resto de las variables, a pesar que entre estas dos determinaciones se observa ligera relación.

Del análisis biplot se observa que como estaciones particulares, es decir, excéntricas del resto de los datos, se encuentran E45 y E72 (**Figura 26b**). En la descripción del comportamiento espacial se describió que tanto los HA como los HTP, en estas dos últimas estaciones, habían mostrado las concentraciones más elevadas, consecuencia de estos valores se presenta el desvío de la nube de datos.

Análisis de las variables en agua

Pánuco I (Secas)

En éste análisis de componentes principales se consideraron algunas variables físicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) y otras variables químicas (materia orgánica, níquel, vanadio), además de los hidrocarburos. De acuerdo al análisis estadístico de componentes principales el 75.56% de la variación de los datos se presenta como consecuencia de tres factores principales. Las variables asociadas a cada factor son la salinidad, vanadio e HTP, respectivamente. La salinidad asociada al principal factor es el parámetro que provoca la principal fuente de variación. Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales para las variables determinadas en agua se resumen en la Tabla 7 y Tabla 8.

Tabla 7. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en agua en la campaña Pánuco I (Secas)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valor propio	1.995	1.471	1.068	0.786	0.501	0.179
% varianza	33.244	24.522	17.798	13.096	8.357	2.983
% acumulado	33.244	57.766	75.564	88.660	97.017	100.000

Tabla 8. Valores propios calculados para los tres factores principales

F1	F2	F3
Salinidad	Vanadio	HTP
0.801	0.795	0.797

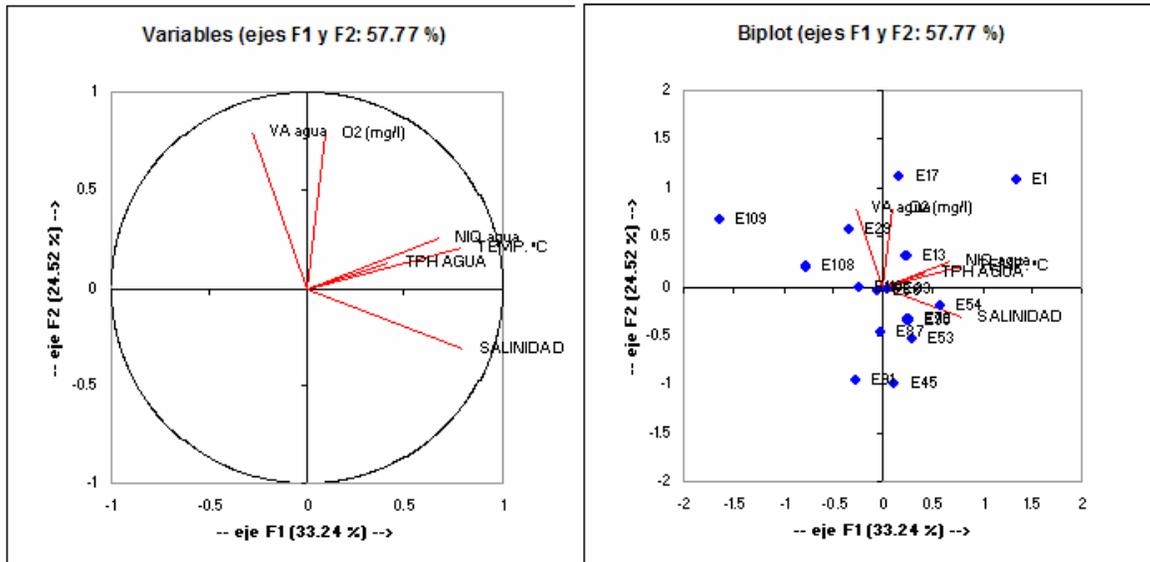


Figura 20. Análisis de componentes principales, variables en agua (Pánuco I).

En base en el análisis gráfico de componentes principales parece que existe una relación positiva entre los HA, HTP, níquel y la temperatura (**Figura 27a**). Al parecer no se presenta otro tipo de relación directa, entre las variables de análisis. La baja relación entre las variables y la dispersión de los datos puede ser consecuencia del reducido número de colectas, por ello el análisis estadístico no es confiable en las relaciones que se presentan. Por otra parte, como puede apreciarse en el gráfico biplot (**Figura 27b**) son varias las estaciones que se presentan fuera de la nube de datos (E109, E91, E45 y E1). La dispersión de estas estaciones es consecuencia de la combinación de éstas con cada uno de los otros parámetros.

Pánuco II

El resultado del análisis de componentes principales para los datos obtenidos del muestreo denominado Pánuco II, muestra que el 65.54% de la variación de los resultados para las variables analizadas en el agua superficial corresponden a cuatro factores principales. Los cuatro factores relacionados con cada parámetro analizado corresponden en orden de importancia a: salinidad, temperatura, oxígeno disuelto y contenido de níquel. Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales para las variables determinadas en agua se resumen en la **Tabla 9** y **Tabla 10**.

Tabla 9. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en agua en la campaña Pánuco II (Nortes).

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valor propio	1.987	1.630	1.228	1.054	0.989	0.832	0.588	0.369	0.322
% varianza	22.077	18.109	13.649	11.706	10.989	9.246	6.538	4.105	3.580
% acumulado	22.077	40.186	53.835	65.541	76.530	85.777	92.315	96.420	100.000

Tabla 10. Valores propios calculados para los cuatro factores principales

F1	F2	F3	F4
Salinidad	Temperatura	Oxígeno disuelto	Níquel
0.612	0.399	0.316	0.668

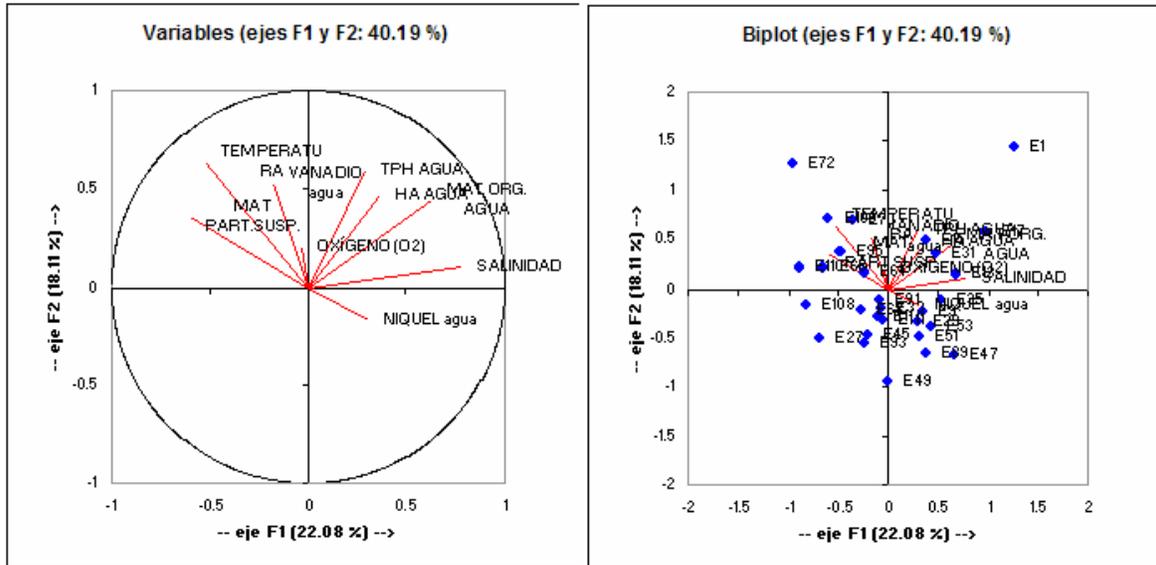


Figura 21. Análisis de componentes principales, variables en agua (Pánuco II).

Similar a la campaña anterior, a pesar de obtener una cantidad mayor de análisis, no se presenta una correspondencia visual evidente que relacione el comportamiento entre una u otra variable (**Figura 28a**). Al parecer, se presenta una ligera dependencia entre el contenido de total de HTP, HA y materia orgánica. Cabe mencionar, que durante este muestreo se presentaron las condiciones más homogéneas en el sistema, éste fenómeno se presentó por la permanente mezcla de las capas superiores con las inferiores.

En el gráfico biplot (**Figura 28b**) se observa que tres estaciones (E1, E49 y E72) se encuentran fuera de la nube de datos. Similar a la campaña previa la estación E1, presentó un comportamiento alejado del total de variables y de los análisis. En las tres estaciones mencionadas parecen que el comportamiento espacial de los hidrocarburos no parece estar relacionado con la excentricidad dentro del gráfico biplot. Al parecer la variabilidad se presenta como consecuencia de una relación acumulada con el resto de los parámetros analizados.

Pánuco III (Lluvias)

Los resultados correspondientes al análisis de componentes principales en la tercera campaña oceanográfica muestran que fueron tres los parámetros principales que ocasionaron la variabilidad del sistema, a mencionar; concentración de oxígeno disuelto, temperatura superficial e HTP disueltos/dispersos, en orden de importancia. Los resultados obtenidos del análisis de componentes principales para las variables determinadas en agua se resumen en la **Tabla 11** y **Tabla 12**.

Tabla 11. Valores propios para representar la varianza de los parámetros en agua en la campaña Pánuco III (Lluvias)

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
HTP agua	0.292	0.048	0.709	-0.473	0.428	-0.050
HA agua	0.291	0.554	-0.446	0.052	0.487	-0.411
MAT ORG. agua	0.324	0.376	0.462	0.680	-0.279	-0.009
TEMP. °C	-0.436	0.575	0.036	-0.043	0.201	0.661
Salinidad	-0.511	-0.287	0.202	0.493	0.563	-0.237
Oxígeno	0.524	-0.369	-0.206	0.258	0.379	0.580

Tabla 12. Valores propios calculados para los cuatro factores principales

F1	F2	F3
Oxígeno	Temperatura	HTP
0.612	0.447	0.585

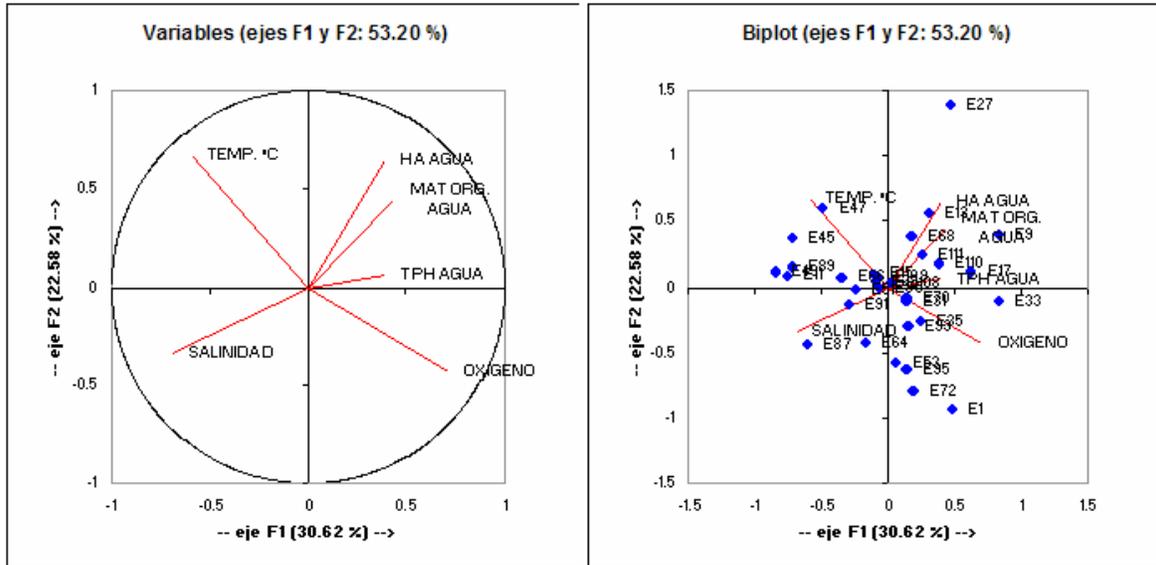


Figura 22. Análisis de componentes principales, variables en agua (Pánuco III).

Como puede apreciarse en la **Figura 29a** se presentan mayores relaciones entre los diferentes parámetros analizados. El número de determinaciones fue mayor y distribución espacial permitió la diferenciación de distintas zonas. El parecer existe una relación inversa entre la temperatura superficial del agua y el contenido de oxígeno disuelto. El contenido de gases disueltos disminuye con el incremento de la temperatura del agua (Libes, 1992). Así también, se presenta una dependencia directa entre el contenido de materia orgánica y de HA disueltos/dispersos, ambos parámetros tienen una relación inversa con la salinidad superficial. Este último fenómeno puede ser explicado como consecuencia que en agua dulce, del río, contiene cantidades menores de sales disueltas, pero al mismo tiempo puede acarrear altos contenidos de materia orgánica e hidrocarburos.

Por su parte el análisis biplot (**Figura 29b**), de manera similar a las campañas anteriores la estación E1 presenta un comportamiento diferente al grueso de los datos. La excentricidad de este valor no puede ser explicada por la concentración de los hidrocarburos, ni como consecuencia de la descarga del río. En los tres muestres el derrotero inició desde este punto. Los factores de estabilización de condiciones, tiempo de medición e instrumental pueden ser los responsables de la discrepancia en los resultados.

Análisis de Correlación

Para buscar similitud estadística entre los diferentes parámetros analizados se realizó un análisis de correlación. La información se condensa en las Tablas 13 y 14. El primer dato corresponde a la correlación entre cada par de variables. El coeficiente de correlación se encuentra en el intervalo de entre -1 y +1 y representa la magnitud de la relación lineal entre las variables. Entre paréntesis se muestra el número de pares de datos usados para calcular cada coeficiente. El tercer número arriba hacia abajo es el valor de P-value el cual prueba la significancia estadística de la correlación estimada. P-values por debajo de 0.05 indican correlación estadística significativa con un 95 % de confianza ($p > 0.05$).

Parámetros de agua

En la **Tabla 13** y **Figura 23** se presentan correlaciones directas e inversas entre los parámetros analizados.

Tabla 13 Matriz de correlación para los parámetros analizados en la matriz agua

	Parámetros			
	HA Agua	O ₂ disuelto	Salinidad	Temperatura
HA Agua				
n				
P-value				
O₂ disuelto	-0.2898			
n	(74)			
P-value	0.0123			
Salinidad	0.1281	-0.7093		
n	(74)	(74)		
P-value	0.2766	0.0000		
Temperatura	0.058	-0.7373	0.9033	
n	(74)	(74)	(74)	
P-value	0.9607	0.0000	0.0000	
HTP Agua	-0.0105	-0.0598	0.0312	0.1266
n	(74)	(74)	(74)	(74)
P-value	0.9295	0.6129	0.792	0.2823

Con $p > 0.05$ se presentan la relación entre los siguientes pares de variables:

- HA en agua vs oxígeno disuelto
- Oxígeno disuelto vs salinidad
- Oxígeno disuelto vs temperatura

- Salinidad vs temperatura

Debe aclararse que este análisis de correlación toma en cuenta el total de los resultados correspondientes a las tres campañas.

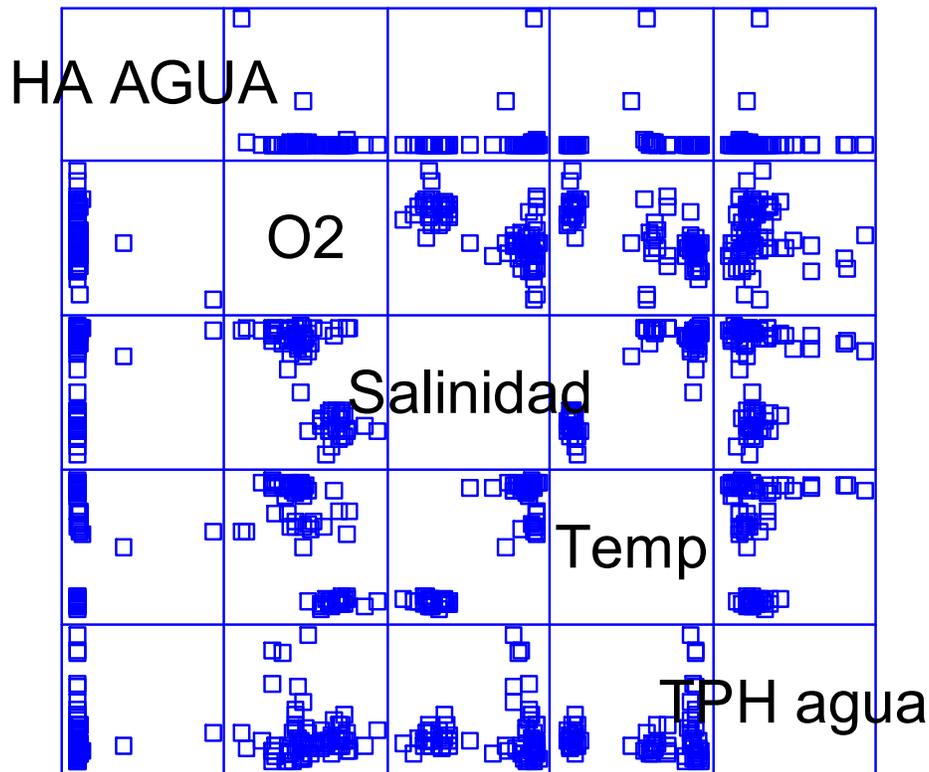


Figura 23. Matriz de correlación, variables en agua superficial

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto es una medición de un factor ambiental importante que afecta la vida acuática y la capacidad del agua para recibir materia orgánica sin causar molestia (Wetzel, 1982). El oxígeno participa en muchas reacciones importantes tanto químicas como biológicas (Goldman y Horne, 1983). Puede ser adicionado al agua por la atmósfera o como producto de la fotosíntesis de plantas acuáticas (Wetzel *op cit*). La determinación de oxígeno disuelto proporciona una medida del grado de eutrofia derivado de las reacciones de los compuestos orgánicos en el sistema.

Los valores registrados de oxígeno disuelto en agua superficial presentan pocas variaciones para las tres campañas. En secas y lluvias se registraron promedios de 4.9

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$\mu\text{g/l}$ y $4.71 \mu\text{g/l}$ en promedio para el sistema. El promedio de oxígeno disuelto en Pánuco II fue de 5.74 mg /l . Las condiciones climatológicas en esta última campaña fueron de fuertes vientos del norte y mezcla de la columna de agua. Así también, el muestreo se realizó con alta nubosidad. Estos hechos pueden hacer notar que se presentó una transferencia de este gas desde la atmósfera hacia el agua de mar como consecuencia de la turbulencia y de la mezcla.

De acuerdo al análisis de correlación entre el oxígeno disuelto con otros parámetros físicos y químicos se estimó que $p > 0.05$ se presenta una correlación negativa de 0.289 entre la cantidad de oxígeno disuelto y el contenido de HA disueltos/dispersos; una correlación negativa de 0.70 y 0.73 con la salinidad y temperatura, respectivamente. Es decir a mayor contenido de oxígeno disuelto menores valores de HA disueltos/dispersos, menor salinidad y menor temperatura.

Las variaciones en la temperatura y la salinidad del agua marina superficial puede ser consecuencia de diversos factores, los principales son: la descarga de los ríos y las condiciones meteorológicas. De acuerdo a la temporada el agua dulce puede tener mayor o menor temperatura que el agua marina; en todos los casos la salinidad es significativamente menor. Por otra parte, los vientos y las lluvias pueden ocasionar la disminución de la salinidad y la temperatura superficial del agua marina.

En la primera campaña, cuando las condiciones climatológicas fueron más estables, se observa una mayor influencia del agua de río hacia el medio marino, con menor temperatura, menor salinidad y mayor contenido de hidrocarburos disueltos/dispersos. Por el contrario, en las siguientes dos temporadas de muestreo las condiciones climatológicas propiciaron que la columna de agua estuviera mezclada, no haciendo tan evidente la descarga del río. Debe de recordarse que los muestreos se realizaron en mayo, febrero y septiembre. El viento y la lluvia, condiciones que se presentaron en las campañas Pánuco I y Pánuco II, ocasionan disminución de temperatura, mezcla de la columna de agua e incremento del oxígeno disuelto (menor temperatura y mayor turbulencia), esta puede ser la explicación que se presente una correlación negativa entre el oxígeno disuelto con el resto de los parámetros analizados en agua.

Salinidad

La salinidad es la cantidad de material disuelto en gramos contenidos en un kilogramo de agua de mar, donde todos los carbonatos han sido extraídos. Se mide con base a la conductividad eléctrica. Los más importantes solutos en el agua de mar son el Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} y K^+ , entre estos iones se conforma más del 99.8% de la masa de los solutos disueltos en el agua de mar. El sodio y el cloro conforman el 86 % del total. La salinidad promedio del agua de mar se encuentra alrededor del 35 ups, sin embargo en las regiones costeras es muy variable debido a la influencia de los ríos y al agua freática que se incorpora al sistema marino (Libes, 1992). El agua de los ríos contienen iones disueltos que inducen conductividad eléctrica, sin embargo la cantidad de sales disueltas en el agua marina es generalmente mucho mayor; por lo tanto en las descargas de los ríos se observa una disminución de la salinidad.

Al océano pueden llegar diversos tipos de contaminantes. Los ríos transportan desechos industriales y municipales, así como desechos de actividades mineras, agrícolas y de otras actividades humanas (Botello, 1982). En este estudio se correlacionó la salinidad contra el resto de los parámetros analizados en la matriz agua. Los resultados demuestran que la salinidad se relaciona negativamente con la concentración de oxígeno disuelto (0.709) y positivamente con la temperatura (0.903).

La distribución de la salinidad superficial del reporte técnico (González-Orduño, 2001) muestra que en la temporada de secas los valores más bajos de salinidad y temperatura se encuentran frente a la desembocadura. Por el contrario en la temporada de nortes (Gonzalez-Orduño, 2002), no se observó una evidencia clara de agua dulce del río hacia la zona marina, al parecer la distribución espacial está fuertemente influida por el factor tiempo. Por el contrario en lluvias se presenta la menor salinidad en la parte sur de la desembocadura, sin embargo la temperatura no presenta el mismo comportamiento. No se observa una influencia directa de las descargas de agua dulce hacia el medio marino, la salinidad puede alterarse por la dilución con el agua de lluvia.

Temperatura

Una característica física importante del agua de mar de fácil medición es la temperatura. En aguas abiertas es un parámetro conservativo y ayuda en la determinación de las masas de agua. Como parte del proyecto global se realizaron perfiles de medición con el objetivo de determinar características de mezcla y más particularmente influencia de la descarga del río. En éste estudio se correlacionó el valor de la temperatura superficial con el resto de los parámetros determinados superficialmente. Los reportes técnicos donde se describe el comportamiento de la columna de agua sirvieron para conocer los procesos de mezcla en el momento que se realizó la toma de las muestras.

La temperatura se correlacionó de forma inversa con el contenido de oxígeno disuelto (-0.7343) y positivamente con la salinidad (0.9033). Partiendo del hecho que las salinidades bajas son consecuencia de la influencia del río se puede explicar que el agua descargada contiene, en términos generales, mayor contenido de oxígeno disuelto y menor temperatura. Anteriormente ha sido explicada la relación que guarda la temperatura superficial del agua de mar con los otros parámetros físicos como la salinidad y la concentración de oxígeno disuelto.

Comentarios adicionales

De acuerdo a las correlaciones entre cada par de variables, no existe una relación directa entre los HTP con ningún parámetro físico ambiental. Los HA solo se relacionan de manera significativa con el contenido de oxígeno disuelto. Adicionalmente, el análisis de componentes principales no refleja relación entre la concentración de hidrocarburos con los parámetros físicos. Sin embargo, el comportamiento espacial parece indicar que frente y cercano a la desembocadura se presentaron las concentraciones más elevadas, tanto de HTP como de HA. En los ríos los hidrocarburos se pueden encontrar en el agua disueltos o dispersos (Reddy and Quinn, 2001). Así también, los parámetros físicos ayudaron a identificar la pluma del río en las estaciones más cercanas a la costa. Estos comportamientos son similares a un estudio dentro de un estero, Ávila-Chávez (1999) encuentra una baja correlación inversa entre la salinidad y el contenido de HA, a pesar que el análisis espacial en varias temporadas haya mostrado bajas salinidades con alto contenido de HA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bajo la interpretación estadística el único parámetro que se relaciona con los hidrocarburos es la concentración de oxígeno disuelto contra el contenido de HA. Estos resultados pueden explicar que salvo casos muy excepcionales, frente a la desembocadura se observa influencia de la descarga. Sin embargo el total de los resultados para las tres campañas no refleja relación directa entre el agua de río y la concentración de hidrocarburos. Al parecer la principal entrada de hidrocarburos al medio marino se presenta por transporte atmosférico y a consecuencia de las actividades marítimas. El contenido de hidrocarburos disueltos/dispersos en las estaciones más cercanas a la desembocadura es consecuencia del arrastre del río.

Parámetros para sedimento

Los sedimentos marinos están compuestos de partículas no consolidadas que cubren el fondo del mar. Estos varían en su composición química, tamaño de partícula, origen, tasa de sedimentación y distribución geográfica (Libes, 1992). Conocer el patrón natural de sedimentación resulta importante como una referencia para entender la posible extensión del impacto por el aporte de sedimentos (Salazar-Vallejo, 1991). Betz (1980), señala que los contaminantes son transportados por el agua del río y absorbidos en los sedimentos. Las propiedades de los sedimentos pueden favorecer la captación de sustancias contaminantes. Las partículas de arena son comparativamente de tamaño grande y, por lo tanto, exponen una superficie pequeña comparada con la expuesta por partículas de arcilla o limo. La arcilla puede tener miles de veces más área superficial por gramo que el limo y aproximadamente un millón de veces más área superficial que las arenas más gruesas (Foth, 1975).

Tabla 14. Correlación para los distintos parámetros en sedimento

	Parámetros				
	HTP sed	HA sed	MO sed	Ind_fin	Ni_sed
HA sed	0.5461				
n	(66)				
P-value	0.0000				
MO sed	0.0566	0.2246			
n	(66)	(66)			
P-value	0.6515	0.0698			
Ind_fin	0.05883	-0.0734	0.4444		
n	(66)	(66)	(66)		
P-value	0.6420	0.5582	0.0002		
Ni_sed	-0.1391	-0.0717	0.3461	0.3031	
n	(66)	(66)	(66)	(66)	
P-value	0.2654	0.5674	0.0044	0.0134	
Va_sed	0.0033	0.1434	0.3969	0.2186	0.6012
n	(66)	(66)	(66)	(66)	(66)
P-value	0.9792	0.2505	0.0010	0.0779	0.0000

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la **Tabla 14** y **Figura 24** se muestra el análisis de correlación con los parámetros analizados en los sedimentos. Como se explicó anteriormente el primer dato corresponde al valor de correlación y el tercero al valor de P-value. De acuerdo a esta tabla con $p > 0.05$ los siguientes parámetros presentan relación.

- HA vs HTP.
- Materia orgánica vs níquel, vanadio y índice de fineza
- Níquel vs materia orgánica, vanadio y tamaño de grano
- Vanadio vs materia orgánica y níquel
- Índice de fineza vs materia orgánica y níquel

De acuerdo a esta información se encuentra una correlación positiva entre los HA y los HTP, con un valor de correlación de 0.5461. La fracción de los aromáticos se encuentran incluidos dentro de los de los HTP, por lo cual es evidente que se presente una relación positiva entre el primero y segundo parámetro.

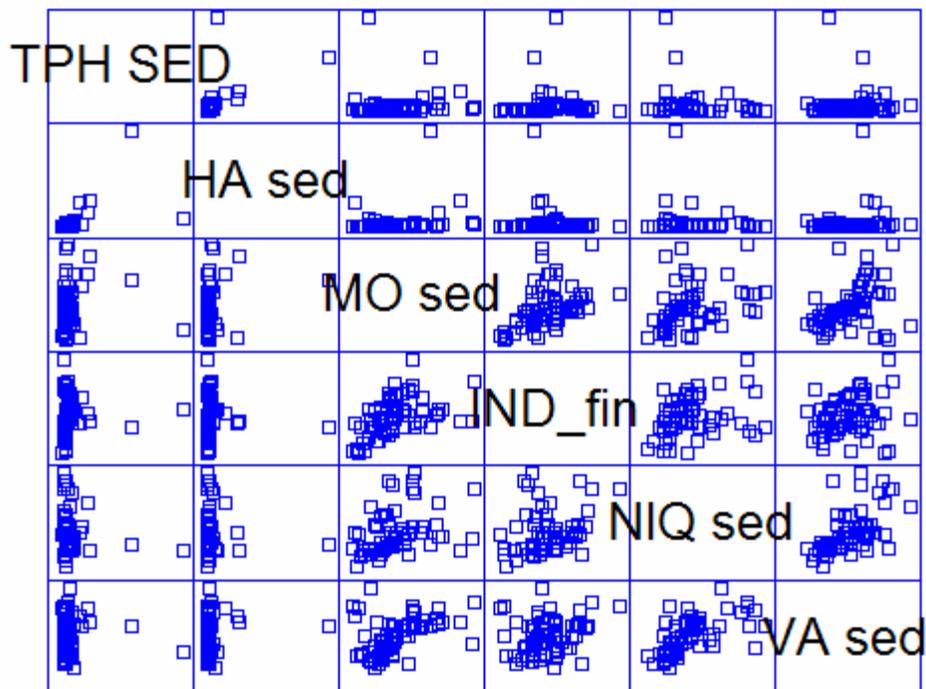


Figura 24. Matriz de correlación, variables en sedimento

El tamaño de grano es un elemento determinante en la capacidad de adsorción del sedimento. Se correlaciona positivamente con el contenido de materia orgánica (0.444) y el níquel (0.3031).

El contenido de materia orgánica presenta, asimismo, una correlación positiva con tres parámetros: índice de fineza (0.444), níquel (0.346) y concentración de vanadio (0.397), estas relaciones positivas pueden ser explicadas, debido a la naturaleza negativa de los compuestos orgánicos, los cuales tienden a captar cationes, principalmente de tipo metálico, donde eventualmente se precipitan hasta el sedimento, así también la materia orgánica puede afectar las propiedades mecánicas de los sedimentos o adsorberse a las partículas de menor tamaño (Libes, 1992) de aquí que se presente una relación positiva con el con el índice de fineza.

Cabe aclarar que el contenido total de hidrocarburos, tanto aromáticos como totales del petróleo se relaciona entre sí de forma positiva, sin embargo no se encuentra una relación clara estadística con el resto de los análisis para sedimento.

HA vs HTP

Los sedimentos son el receptáculo final de materiales y sustancias dispersas en la columna de agua, por lo que su análisis es de gran importancia para detectar, evaluar y cuantificar la presencia de algunos contaminantes en ambientes acuáticos. La composición de los hidrocarburos en sedimento puede ser muy variada, dependiendo del tiempo de residencia y de la composición del petróleo. Los análisis de hidrocarburos realizados consistieron en la determinación de los HTP y los HA. El análisis de los HTP se define como la determinación total de grasas y aceites menos la cantidad de componentes no polares (aceites vegetales y animales) separados por un absorbente polar (EPA, 1983). Por el contrario los HA representan la fracción de estos hidrocarburos que contiene anillos aromáticos, pudiendo ser desde ligeros, como los contenidos en las gasolinas, hasta pesados, como los encontrados en el crudo de petróleo. La toxicidad de los HA incrementa en función del número de anillos (Neff, 1979). En los sedimentos es más probable encontrar mayores proporciones de HTP que en la columna de agua. En la columna de agua los HA están más sujetos a los procesos de degradación y la

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

concentración disminuye con la profundidad (Neff, 1979). Así también los HA son más solubles en el agua.

En zonas con poca influencia de contaminación la concentración de hidrocarburos saturados sobrepasa a la de los aromáticos, presentando una relación de hasta 2 veces superior (Farrington, 1985 en Echaniz-Hernández, 1988).

En estudios ambientales realizados a partir del análisis de los sedimentos se ha encontrado que existe una relación entre el tamaño de partícula y su potencial recepción de contaminantes. Por ello es importante analizar el tamaño de partícula de los sedimentos (Carranza-Edwards, 1997).

De las tres temporadas de muestreo dos de ellas (Secas y lluvias) presentan correlaciones mayores al 90%. Únicamente en la temporada de nortes se registra una correlación positiva superior al 50%. Estos resultados demuestran que existe una clara relación positiva entre los HA y los HTP, estos resultados discrepan con Readman *et al*, (2002), donde no encuentra una correlación entre los HTP y los HAP, en los sedimentos. Reddy and Quinn (2001) encontraron que los hidrocarburos más ligeros se remueven del sedimento más rápidamente. Generalmente las cadenas lineales de hidrocarburos y de aromáticos son degradados más rápidamente que los compuestos alifáticos ramificados (ATSDR, 1995). Al parecer, debido a que existe una relación directa entre ambas determinaciones la acumulación y renovación se presenta de forma continua. La proporción entre HTP e HA es desde 40 a casi 60 veces. En la temporada de secas se presentan concentraciones hasta casi 60 veces más de HTP en relación con los HA. Al parecer los procesos de degradación en esta temporada actúan sobre los HA, que puede ser consecuencia del incremento en la degradación por las mayores temperaturas o el tiempo de permanencia de los hidrocarburos en los sedimentos. La temporada de secas se caracterizó por la mayor temperatura y la estabilidad en la columna de agua.

Hidrocarburos vs materia orgánica

El contenido de materia orgánica en los sedimentos marinos está en función de la cantidad de producto descargado por los ríos y por los fenómenos de productividad. La zona de estudio está influida de manera permanente por la descarga del río Pánuco. Además de acarrear materia orgánica lleva disueltas altas concentraciones de nutrientes. Estos nutrientes estimulan el crecimiento de organismos y eventualmente son depositados

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

en los sedimentos. Por ello las zonas inmediatamente costeras son las más productivas y por lo tanto en los sedimentos se puede reflejar este fenómeno.

En ninguna de las tres temporadas se registra una correlación significativa entre el contenido de material orgánico en el sedimento y las concentraciones de hidrocarburos tanto aromáticos como del petróleo. Por el contrario, tanto en las temporadas de lluvias y nortes los resultados demuestran baja relación negativa entre estos parámetros. Este resultado no parece consistente con lo reportado por Bouloubassi, (2001), donde encuentra que los hidrocarburos se correlacionan de manera positiva con el contenido de materia orgánica.

Hidrocarburos vs metales pesados (sedimento)

En cuanto a los resultados obtenidos de las correlaciones entre los metales pesados y los hidrocarburos. No se encuentra relaciones estadísticamente significativas entre uno y otro parámetro. Únicamente en la temporada de lluvias parece haber una relación positiva entre el vanadio y los HA (0.36) y los HTP (0.41). Sin embargo, estas correlaciones no se repiten en el resto de las campañas. Los hidrocarburos están más sujetos a los procesos de degradación en relación con los metales. En sedimentos estables con baja incidencia de contaminación el tiempo es suficiente para degradar a los hidrocarburos y no así a los metales que tiene un tiempo de permanencia mayor que los hidrocarburos. Esta puede ser una explicación de que no exista una relación clara entre los metales pesados y los hidrocarburos encontrados en los sedimentos. Sin embargo, se parte del supuesto que los procesos de acumulación y renovación son permanentes.

Comparación con otros sitios

Como puede apreciarse en la **Tabla 15** las concentraciones de hidrocarburos que pueden determinarse en un sistema son ampliamente variables. Wang (2002) después de un derrame determinó una concentración de hasta 1,070 µg/L. En otro derrame, pero en una zona costera se alcanzaron concentraciones de 483 µg/L. Celis, *et al*, (1987), determinó que en el Golfo de México las concentraciones promedio son de 15 µg/L, la cual toma en cuenta concentraciones tanto en zonas marinas como áreas destinadas a la extracción de petróleo. El promedio determinado de HTP en agua, en el sistema, para los tres periodos de muestreo es de 75.7 µg/L. El sistema no presenta características de un derrame reciente y debido a su cercanía con la costa, tampoco refleja las concentraciones de mar abierto. Otro punto que debe ser aclarado es que el promedio total se incrementa por los datos extremos superiores. Las concentraciones elevadas con respecto a lo señalado por la UNESCO y los datos para el Golfo de México pueden ser explicados por la intensa actividad marítima a lo largo de todo el año.

Tabla 15. Comparación de Hidrocarburos Totales del Petróleo en agua

Autor	Máximo µg/L	Mínimo µg/L	Promedio µg/L	Observaciones
Muniz <i>et al</i> (2004)	21.11	119.72	43.06	Determinación de Hidrocarburos Alifáticos en periodo de verano.
Muniz <i>et al</i> (2004)	26.07	47.19	33.78	Determinación de Hidrocarburos Alifáticos en invierno
Wang (2002)			1,070	Caso de un derrame como emergencia altos contenidos de gasolina
Reddy and Quinn (2001)	3,940		483	Derrame en una zona costera
Douabul and Al-Shiwafi (1998)	59	<0.1	26	Crudo equivalente. Golfo de Arabia
Celis <i>et al</i> ., 1987			15	Golfo de México
Este trabajo	382	3.47	75.69	Tres temporadas

En todos los periodos se presentan valores superiores a la concentración reportada por UNESCO (1976) de 10 µg/l como límite para aguas no contaminadas. En el crucero Pánuco III (septiembre de 2002) el promedio de los valores se encuentra por encima de

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

los dos previos muestreos. Sin embargo, no se encuentran diferencias estadísticamente significativas entre los tres periodos de muestreo. A pesar de ello se presentan marcadas fluctuaciones entre los valores máximos y mínimos determinados.

El global de los datos puede ser comparado con trabajos realizados en otros sitios. Wang (2002) y Reddy and Quinn (2001) posterior a un derrame encuentran como promedio 1,070 $\mu\text{g/l}$ y 483 $\mu\text{g/L}$ de hidrocarburos del petróleo. Por el contrario Douabul and Al-Shiwafi (1998) para caracterizar las condiciones generales de contaminación en el golfo de Arabia encuentra como promedio 26 $\mu\text{g/L}$ de crudo equivalente. Bajo estos datos la zona no se encuentra dentro de las características como área donde han ocurrido derrames recientes. Más bien parece presentar concentraciones más consistentes con una zona de actividades petroleras, tal como el Golfo de Arabia.

El comportamiento de los HTP en agua superficial parece no tener un aporte continuo, en este caso el río. En ocasiones se encontraron las concentraciones más altas en estaciones alejadas de la costa, lo que hace suponer que en estos periodos los aportes de hidrocarburos hacia el sistema analizado no son consecuencia de la descarga. Durante los muestreos se observaron actividades de fondeo de barcos. La zona costera frente a la desembocadura del río está sujeta a diversas actividades marítimas. Es el paso obligado de los barcos que entran o salen del puerto de Tampico. Al parecer las actividades de los barcos representan un importante aporte de hidrocarburos a la zona de estudio. El aporte del río pareció tener poca influencia sobre el sistema marino para en las fechas realizadas.

El comportamiento temporal de los HA en agua presenta un patrón similar a lo largo de cada uno de los muestreos. No se presenta importantes variaciones entre los diferentes periodos. No se determina una diferencia estadísticamente significativa entre los distintos periodos.

Tabla 16. Comparaciones de Hidrocarburos Aromáticos en agua

Autor	Máximo µg/L	Mínimo µg/L	Promedio µg/L	Observaciones
Reddy and Quinn, 2001	115		21.9	Derrame en una zona costera PAH
González <i>et al</i> 1999			1.34	Zona costera Colombia
Zanardi <i>et al</i> , 1999	0.85	0.43	0.54	IOC
Shriadah, 1998			15.7	IOC Golfo de Arabia y Golfo de Oman
Kornilios, 1998	0.317	0.092	0.145	IOC Mar de Creta Criseno equivalente
Wattayakorn, 1998	76.2	0.01	2.05	Golfo de Tailandia. Fluorescencia. En dos periodos 1994 y 1995
Weber, 1998	2.5	0.35	0.945	Cerca de una terminal petrolera, sujeta a frecuentes derrames
Este trabajo	51.07	0.04	1.17	Tres temporadas

En la **Tabla 16** se presenta la comparación entre diferentes autores para valores de HA disueltos/dispersos en agua. Como se mencionó en la metodología el valor obtenido corresponde a una estimación por medio de un estándar, en este caso criseno; el criseno es un hidrocarburo con cuatro anillos aromáticos. Otros autores han utilizado diferentes técnicas analíticas para la estimación de los HAP, como por ejemplo la separación cromatográfica. En este trabajo se evaluó la concentración del total de aromáticos por espectroscopía de fluorescencia. En un derrame reciente Reddy and Quinn (2001) reporta un promedio de 21.9 µg/L de de HAP valor obtenido por cromatografía. Zanardi (1999), Shriadah (1998), Kornilios, (1998), Wattayakorn, (1998), Weber, (1998). Realizan estudios utilizando como estándar de referencia criseno y analizado bajo los criterios de la IOC, de la manera como se realizó la determinación de HA en este trabajo. A excepción de los reportado por Shriadah, (1998), quien analiza los HA después de un derrame. Los resultados parecen ser consistentes con trabajos previos realizados en zonas costeras. Bajo estos resultados las características de la zona de estudio parecen tener características más cercanas a zonas costeras con actividades marítimas. Los sitios donde se han presentado derrames recientes reportan concentraciones varias veces mayores a los señalados en este estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En promedio para las tres temporadas se encontró una concentración de 52.02 mg/kg de hidrocarburos en sedimento. Los resultados son consistentes con valores reportados en otros sistemas sedimentarios costeros y marinos. Rozas (2000), tomando análisis tanto de un estuario como de su bahía adyacente en el mes de septiembre registró de un promedio de 299.6 mg/kg. Por el contrario en mayo los niveles fueron menores, teniendo un promedio de 122 mg/kg. De manera particular este estudio coincidió en los meses de muestreo. El valor más bajo se encontró en la temporada de secas, similar a este trabajo. Estos resultados demuestran el dinamismo de los sistemas estuarinos y de sus sedimentos asociados.

Tabla 17. Comparaciones de Hidrocarburos Totales del Petróleo en Sedimento.

Autor	Máximo mg/kg	Mínimo mg/kg	Promedio mg/kg	Observaciones
Rozas (2000)			299.6	HTP Septiembre. Estuario y Bahía
Rozas (2000)			122	HTP Mayo Estuario y Bahía
Chernova <i>et al</i> , (1999)	10.5	4.6		Como normal
Botello <i>et al</i> (1996)			26	Sedimentos de la Laguna Madre
Botello <i>et al</i> (1996)			53	Sedimentos de la Laguna Pueblo Viejo
Botello <i>et al</i> (1996)			69.0	Diversos puntos en el Golfo de México
Este trabajo	688	8.10	52.02	Tres periodos frente a las desembocadura del río Pánuco

Chernova *et al* (1999) determina una concentración como “normal” de 4.6 mg/kg, en una bahía. El menor valor determinado en este trabajo fue de 8.10 mg/kg, concentración superior al promedio señalado por este autor. Debe ser tomado en cuenta que todo el sistema es un área sujeta a diversas actividades de transporte marítimo y que una zona cercana a la desembocadura está fuertemente influida por la descarga del río.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, la zona presenta en promedio concentraciones por debajo de los criterios establecidos por la UNESCO para sedimentos contaminados de 70 mg/kg. Solo en una temporada (febrero de 2002), el valor general de los resultados se encuentra por encima de este criterio. Asimismo, los resultados son consistentes con registros obtenidos en sitios cercanos. En la Laguna Madre se determinaron concentraciones de 26 mg/kg. En la Laguna de Pueblo Viejo, sistema lagunar asociado al estuario del río Pánuco, se determinaron concentraciones de 53

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

mg/kg y en el Golfo de México el promedio de diferentes determinaciones señala 69.0 mg/kg.

Tabla 18. Comparaciones de Hidrocarburos Aromáticos en Sedimento.

Autor	Máximo mg/kg	Mínimo mg/kg	Promedio mg/kg	Observaciones
Al-Saad (1987)	76	0.2	19	Golfo de Arabia
Badawy and Al-Harthy, (1991)	40.35	3.1	14.6	Algunos sitios en las costas del Sultanado de Omán
Botello <i>et al</i> (1993)	3120	455	1052	Diversos sitios en el Sureste, Golfo de México
Commendatore <i>et al</i> (2000)	737.6	1.4		Sedimentos costeros en costas de Argentina
Ávila-Chávez, 1999	130	40	75	Sedimentos de un estero en Salina Cruz, Oaxaca, México
Este trabajo	35.6	ND	1.1	Tres periodos frente a la desembocadura del río Pánuco

Tomando en cuenta los tres periodos de muestreo y el promedio de la concentración en toda la zona de estudio, en este trabajo se alcanzaron concentraciones en promedio concentraciones de 1.1 mg/kg. El valor más elevado fue de 35.6 mg/kg de hidrocarburos aromáticos en sedimentos superficiales, presentándose importantes variaciones, tal como ha sido explicado anteriormente, tanto en la distribución espacial como en la temporal. Los resultados contrastan con otros autores, por ejemplo en el Golfo de Arabia Al-Saad (1987) reporta concentraciones promedio de 19 mg/kg; en un estudio para determinar los niveles de contaminación Basawy and Al-Harthy (1991) reporta para diferentes puntos de las costas del Sultanado de Omán concentraciones promedio de hidrocarburos aromáticos de 14.6 mg/kg, señalando que la contaminación es debido a hidrocarburos desde ligeros hasta pesados. En sedimentos superficiales de un estero adyacente a una refinería Ávila-Chávez (1999) reporta niveles de 75 mg/kg. Por otra parte, el reporte que presenta los niveles más cercanos a éste trabajo es el realizado por Commendatore *et al*, 2000, ellos realizan muestreos en un área costera de la Patagonia en Argentina. Debe de recordarse que cada sitio presenta condiciones muy particulares. El área adyacente a la desembocadura del río Pánuco presenta condiciones de alta turbulencia ocasionando una remoción del material sedimentario y dificultando los procesos de acumulación.

CONCLUSIONES

Con bases a los resultados obtenidos a partir de la distribución espacial y temporal de los hidrocarburos tanto aromáticos como totales del petróleo para las matrices de agua y sedimento, además de la relación con los diferentes parámetros físicos y químicos, se puede concluir que:

1. La descarga del río representa el principal aporte de hidrocarburos al sistema, sin embargo, tanto el tráfico marítimo como el aporte atmosférico pueden tener una contribución sobre los niveles de hidrocarburos disueltos/dispersos en el área de muestreo, debido a que algunos valores no pudieron ser atribuidas a la descarga directa del río.
2. La temporada de nortes (febrero) presentó las condiciones más homogéneas en el sistema, los vientos y la lluvia ocasionaron la mezcla de las capas superiores de agua, sin observarse influencia de la descarga. Para esta misma campaña la distribución de los hidrocarburos en el sedimento se relacionó con las corrientes del norte, señalando una acumulación hacia la parte sur de la escollera.
3. En base a los resultados de hidrocarburos en sedimentos la influencia de la descarga directa del río es menor a 10 km mar adentro. En los sedimentos más cercanos a la desembocadura se presentan una dinámica muy particular de alta energía, provocados por las corrientes locales las cuales generan una turbulencia y dispersión del material depositado recientemente. En la estación E45, los fenómenos de turbulencia disminuyen ocasionando la acumulación de material fino proveniente del río.
4. En los sedimentos se determinaron amplias variaciones en concentración como consecuencia de los procesos de acumulación. Las concentraciones más elevadas de hidrocarburos, estuvieron siempre asociadas con la descarga del río. Sin embargo, de acuerdo a análisis temporal, a pesar de observarse fluctuaciones globales para cada uno de los muestreos, no se observó evidencia estadísticamente significativa en los niveles de hidrocarburos entre las diferentes campañas.
5. En promedio se alcanzaron concentraciones de HTP de casi 80 $\mu\text{g/l}$ nivel que rebasa el máximo señalado por la UNESCO de 10 $\mu\text{g/l}$ para ser considerado como agua no contaminada. En cuanto a la concentración de HTP en los sedimentos en

CONCLUSIONES

promedio, para toda la zona de estudio, se alcanzaron concentraciones de 52 mg/kg. De acuerdo a estos resultados los sedimentos pueden ser considerados como “no contaminados”. El criterio de la UNESCO señala como límite 70 mg/kg, algunas estaciones, principalmente frente a la desembocadura se encontraron valores de hasta casi 10 veces lo señalado en los criterios de la UNESCO.

6. En base al análisis de componentes principales no se observa una relación clara entre los hidrocarburos con algún otro parámetro físico o químico; únicamente se presentó, una relación positiva entre el contenido de hidrocarburos totales del petróleo y los hidrocarburos aromáticos. Solo en algunos casos se observó relación entre los hidrocarburos con el níquel, vanadio, salinidad o índice de fineza. Tanto el níquel como el vanadio están relacionados con contaminación por industrias o productos del petróleo, esta relación apoya el origen de los hidrocarburos.
7. La descarga del río Pánuco ejerce una influencia directa hacia la zona marina adyacente a la descarga del río. La influencia está en función de la temporalidad, sin embargo aún en la temporada de menor descarga se puede apreciar la influencia hacia la zona marina. Por otra parte, los patrones de distribución espacial y temporal de los hidrocarburos están en función no sólo de la afluencia del agua dulce desde la costa, sino también de la dinámica costera, la cual ejerce una influencia sobre los procesos de remoción y de acumulación de material sedimentario. La distribución espacial, para las temporadas estudiadas, está en dependencia del material arrastrado desde el río y de los procesos de dilución mar adentro.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdullan, A.R.; N.M. Tahir and L.K. Wei (1994) "Hydrocarbons in Seawater and Sediment from the West Coast of Peninsular Malaysia" ***Environmental Contamination and Toxicology*** 53:618-626.
- Abdullan, A.R.; W.C. Woon and R.A. Bakar (1996) "Distribution of Oil and Grease and Petroleum Hydrocarbons in the Straits of Johor, Peninsular Malaysia" ***Environmental Contamination and Toxicology*** 57:155-162.
- Acosta-Lara, E. A. (1976) "Estudio de Contaminación en el Estuario del Río Pánuco". Tesis de Licenciatura (Químico). Facultad de Química. UNAM. 156 p.
- Acuña, J.A.; M.M. Murillo and F. Araya (1986) "Estudio Preliminar sobre la Presencia de Hidrocarburos de Petróleo en la Zona Fluvial Río Moin-Canales de Tortuguero" ***Ing. Cienc. Quim.*** 10(34):3-4.
- Ahmad S.R. and D. M. Reynolds (1999) "Monitoring of Water Quality Using Fluorescence Technique: prospect of On-Line Process Control" ***Wat. Res.*** 33(9):2069-2074.
- Al-Lihaibi S.S. and S.J. Ghazi (1997) "Hydrocarbon Distribution in Sediments of the Open Area of the Arabian Gulf Following the 1991 Gulf War Oil Spill" ***Marine Pollution Bulletin*** 34(11):941-948.
- Al-Saad, H. T. (1987) "Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Superficial Sediments from Al-Arab River and the North-West region of the Arabian Gulf" ***Mar. Pollut. Bull.***, 18(5):25-32.
- Alvarez-Larrauri R. y C. González-Macias, (1986) "Niveles Actuales de Hidrocarburos y Metales Pesados en Aguas Costeras del Océano Pacífico Mexicano". ***Revista del Instituto Mexicano del Petróleo.*** 18(3):59-68.
- Amezcua-Allieri, M. A. (1998) "Poliquetos Bentónicos Indicadores de la Calidad del Agua y Sedimento del Río Pánuco, Tamaulipas, México" Tesis de Licenciatura (Biólogo). Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 135 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Amezcua-Allieri, M. A. (2000) "Calidad Ambiental del Sedimento del Río Pánuco, con Base a su contenido de Níquel y Vanadio" Tesis de Maestría. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Zacatenco. Instituto Politécnico Nacional. 142 p.
- Arise, F.; C. Gooijer and N. H. Velthorst (1993) "Application of fluorescence spectroscopic techniques in the determination of PAHs and PAH metabolites" p. 449-480. *in* B. Barceló (Ed) Environmental Analysis: Techniques and Quality Assurance. Elsevier Science Publishers.
- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1995) "Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons" Department of Health and Human Services, Atlanta, USA, 458 p.
- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1999) "Toxicological Profile for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)" Department of Health and Human Services, Atlanta, USA, 231 p.
- Ávila-Chávez, M A. (1999) "Determinación de las Concentraciones de Hidrocarburos Aromáticos en el Estero la Ventosa, Salina Cruz, Oaxaca". Tesis de Licenciatura (Biólogo). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 82 p.
- Badawy, M.I. and F. Al-Harthy (1991) "Hydrocarbons in Seawater, Sediment, and Oyster from the Omani Coastal Waters" ***Bull. Environ. Contam. Toxicol.*** 47:386-391.
- Badawyl, M.I.; I.S. Al-Mujainy and M.D. Hernández (1993) "Petroleum-derived Hydrocarbons in Water, Sediment and Biota from the Mina al Fahal Coastal Waters" ***Marine Pollution Bulletin*** 26(8):457-460.
- Beltran, J.G; V.P. Martínez; F.E. Ruiz y J.G. Casal (1997) "Niveles de Hidrocarburos Petrogénicos en Ecosistemas Marinos Cubanos" ***INDOTECNICA*** 8(1-3):43-46.
- Betz, M. (1980) "La Contaminación Marino-Costera por hidrocarburos y la degradación de petróleo en áreas Tropicales" p.27-39.en Pérez-Nieto "Contaminación e Impacto Ambiental Marino Costero" Simposio Primeras Jornadas Científicas. Universidad Simón Bolívar. 233 p.
- Bidleman, T. F.; A. A. Castleberry; W. T. Foreman; M. T. Zaransk and D. W. Wall (1990). "Petroleum Hydrocarbons in the Surface Water of Two Studies in the Southeastern United States". ***Est. Coast Shelf Science.*** 30:91-109.

BIBLIOGRAFÍA

- Bloomfield, M.M. (1992) "Química de los Organismos Vivos" Editorial Limusa, México.
- BMEPC, Baltic Marine Environment Protection Commission (1981) "Workshop on the Analysis of Hydrocarbons in Seawater" [en línea] Baltic Marine Environment Protection Comisión —Helsinki Comisión— [12 junio de 2003] Disponible en <http://www.helcom.fi/proceedings/proc6.pdf>.
- Botello, A. V. (1982) "La Contaminación en el Mar" **Ciencia y Desarrollo. CONACYT** 43:91-101.
- Botello, A. V. and L. G. Calva (1999) "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from Pueblo Viejo, Tamiahua, and Tampamachoco Lagoons in the Southern Gulf of Mexico" **Bull. Environ. Contam. Toxicol.** 60:96-103.
- Botello, A. V.; C. González and G. Díaz (1991) "Pollution by Petroleum Hydrocarbons in Sediments from Continental Shelf of Tabasco State, México". **Bull. Environ Contam. Toxicol.** 47:565-571.
- Botello, A. V.; G. V. Ponce y S. A. Macko (1996) "Niveles de Concentración de Hidrocarburos en el Golfo de México" p.225-253. In: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, D. Zárata-Lomelí (Eds). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, 5. 666 p.
- Botello, A. V.; G. V. Ponce; A. Toledo; G. G. Díaz; S. Villanueva (1992) "Ecología recursos costeros y contaminación en el Golfo de México" **Ciencia y Desarrollo.** 17(102):28-48.
- Botello, A.V. (1996) "Características, Composición y Propiedades Fisicoquímicas del Petróleo". p. 203-210. In: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, y D. Zárata-Lomelí (Eds). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, **EPOMEX** Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche, México. 666 p.
- Bouloubassi, I, J. Fillaux and A. Saliot (2001) "Hydrocarbons in surface sediments from the Changjiang (Yangtza River) Estuary, East China Sea" **Marine Pollution Bulletin.** 42(12):1335-1346.

BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera-Ramírez, M. A. (2003) "Estudio de Sedimentos del Ambiente de Plataforma Frente al Río Pánuco" Tesis de Maestría" Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. 94 p.
- Calva L. B. and A. V. Botello (1999) "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from Sontecomapan Lagoon, Veracruz, México" *Hidrobiológica*. 9(1):45-52.
- Calva-Benítez, L. G. (2000) "Determinación de los niveles actuales de hidrocarburos fósiles en la Laguna de Sontecomapan, Veracruz, México". Tesis de Doctorado (Doctorado en Ciencias). Facultad de Ciencias, UNAM, México. 152 p.
- Campos-Aranda, D. F. (1996) "Caracterización Hidrológica de Crecientes en la Cuenca Baja del Río Pánuco con Base en Niveles Máximos Anuales" *Ingeniería Hidráulica en México*. 11(2):15-31.
- Carranza-Edwards (1997) "La Granulometría y su uso en Estudios Geoquímicas y Ambientales". *Actas INAGEQ* 3:235-243.
- Cedeño, G.F. (1991) "Distribución de Hidrocarburos en la Bahía de Pozuelos y Áreas Adyacente, Estado Anzoátegui, Venezuela" *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente*. 30(1-2):97-104.
- Celis, G. L., A. V. Botello, M. Mendelewicz y G. Díaz (1987) Actividades del Proyecto Caripol en las Zonas costeras de México: I. Hidrocarburos disueltos/dispersos. *Carib. Journ. Sci.* 23(1):11-18
- Chang, R. (1977) "Principios Básicos de Espectroscopia" Editorial A.C., Madrid, España. 302 p.
- Chernova T. G.; A. L. Paropkari; Y. I. Pikovskii and T. A. Alekseeva (1999) Hydrocarbons in the Bay of Bengal and Central Indian Basin Botton Sediments: Indicators of Geochemical Processes in the Lithospher" *Marine Chemistry* 66:231-243.
- Commendatore, M.G; J.L. Esteves and J.C Colombos (2000) "Hydrocarbons in Coastal Sediments of Patagonia, Argentina: Levels and Probable Sources" *Marine Pollution Bulletin* 40(11):989-998.
- CONACYT, 1997 "El Petróleo en México y en el Mundo" Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. 366 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Coria-Lara, Y. (2002) "Análisis de la distribución de clorofilas, sólidos suspendidos y temperatura en la desembocadura del río Pánuco a través de imágenes de satélite LANDSAT ETM, durante la época de secas" Reporte Técnico, Instituto Mexicano del Petróleo, Programa de Investigación sobre Medio Ambiente y Seguridad (PIMAS).
- Cruz-Ábrego, F. M.; F. Flores-Andolais y V. Solís-Weiss (1991) "Distribución de Moluscos y Caracterización Ambiental en Zonas de Descarga de Aguas Continentales del Golfo de México", **Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología Universidad Nacional Autónoma de México**, 18 (2):247-259.
- Day, R.A. and A.L. Underwood (1989) "Química Analítica Cuantitativa" 5ª edición. Prentice-Hall Hispanoamericana. México, 841 p.
- Dean, J.; L. Merritt; F. Settle and H. Willard (1988) "Instrumental Methods of Analysis" 7a edition. Wadsworth Publishing Company, USA 895 p.
- DePuy, C.H. y K.L. Rinehart (1983) "Introducción a la Química Orgánica" Editorial Continental, México.
- Domenico, L.; E. Crisafi; G. Magazzu; A. Puglisi; and Rosa (1994) "Monitoring of Petroleum Hydrocarbon Pollution in Surface Waters by a Direct Comparison of Fluorescence Spectroscopy and Remote Sensing Techniques" **Marine Pollution Bulletin** 28(10):587-591.
- Douabul A. A. Z. and N. A. Al-Shiwafi (1998) "Dissolved/dispersed Hydrocarbons in the Arabian Region" **Marine Pollution Bulletin** 36(10):844-850.
- Duggan, J.X. (1982) "Practical Examples of Fluorescence Spectroscopy" PERKIN-ELMER Fluorescence Spectroscopy-Applications Data Bulletin.
- Echaniz-Hernández, V. (1988) "Determinación de los niveles de hidrocarburos en agua, sedimentos recientes y hojas de pasto marino *Thalassia testidium* (Konig, 1805) en Tres Islas Arrecifales de Puerto de Veracruz, Ver". Tesis de Licenciatura (Biólogo). Facultad de Ciencias. UNAM. 81 p.
- Emilsson, I., M. A. Alatorre, A. Fernández, R. R. Lankfoed y F. Ruíz. (1973) "Investigaciones sobre la contaminación costera en Altamira, Tamps. Reporte Técnico. Instituto de Geografía. UNAM.

BIBLIOGRAFÍA

- EPA Environmental Protection Agency (1983) "Method 418.1 Total Recoverable Petroleum Hydrocarbons by Infrared Spectrophotometry" Groundwater Analytical Technical Bulletin, Winter 1991/1992, Groundwater Analytical Inc., Buzzards, MA.
- EPA Environmental Protection Agency (1996) "Method 8440 Total Recoverable Petroleum Hydrocarbons by Infrared Spectrophotometry"
- Espina, S. y C. Venegas (1996) "Ecotoxicología y Contaminación" p. 69-106. *In*: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, y D. Zárate-Lomelí (Eds). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, **EPOMEX** Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche, México. 666 p.
- Esteves J. L. and M. G. Commendatore (1993) "Total aromatic hydrocarbons in water and sediment in a coastal zone of Patagonia, Argentina" **Marine Pollution Bulletin** 26(6):910-918.
- —Estudio de la Contaminación Marina en los Litorales del Golfo y Mar Caribe de México (1996) Universidad Veracruzana, Secretaría de Marina, Secretaría de Desarrollo Social.
- Evans, E. D. and E. E. Bray (1974) "Distribution of n-paraffins and separation of saturated hydrocarbons from recent marine sediments. **Analytical Chemistry**. 29:1858-1861.
- Flores-Zacarías, J. I. (1986) "Estudio Ecológico para la Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales en la Construcción, Operación y Mantenimiento del Puerto Industrial de Altamira, Tamaulipas". Tesis de Licenciatura (Biólogo). ENEP-Iztacala, UNAM, 83 p.
- Foth, H. D. y L. M. Turk (1975) "Fundamentos de la Química del Suelo" Editorial Continental, S. A. de C. V., México, 433 p.
- Franco-Piña (2000) "Caracterización Sedimentológica de la Plataforma Continental de los Estados de Tamaulipas y Veracruz, México" Tesis de Licenciatura (Ingeniero Geólogo). Facultad de Ingeniería. UNAM. 89p.
- Froehlich, P. D. (1983) "Energy Sources and Fluorescence Spectroscopy". **Perkin-Elmer Corporation**, Oak Brook Instrument Division 2000 York Road, Illinois, USA. 70 p.
- Futoma, D.J.; S.R. Smith; T.E. Smith and J. Tanaka (1981) "Polycyclic Aromatic in Hydrocarbons in Waters System" CRC Press, Inc. USA. 190 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Gaillardet, J.; B. Dupré; P. Louvat; C. J. Allègre (1999) "Global Silicate weathering and CO₂ Consumption Rates Deduced from the Chemistry of Large Rivers" ***Chemical Geology*** 159:3-30.
- García, E. (1973) "Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen", Instituto de Geografía. UNAM. México.
- García, E. F. y M. R. Flores (1983) "Estudio de Hidrocarburos Totales en Agua de Mar de la Sonda de Campeche" ***Revista del Instituto Mexicano del Petróleo***. 15(4):101-106.
- García-Figueróa, M.E. and M.A. Flores-Ríos (1983) "Estudio de Hidrocarburos Totales en Agua de Mar de la Sonda de Campeche" ***Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*** 15(4):101-106.
- García-Michel, H. (1985) "El Pánuco: un río sin Pesca" *Técnica Pesquera* 18(204):6-8.
- Goldman, C. R. and A. J. Horne (1983) "Limnology" McGraw-Hill Book Company, United States. 576 p.
- González L., M. C.; González M., M. C.; Mondragón, J. L. y García V., V. M. (1997) Diagnostico Ambiental en el Río Pánuco como Marco de Referencia para las Actividades de Dragado. **Res. 4to. Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar**. Mérida. Yuc.
- González, A.J. M.; R. F. Maestre and R. G.Ibarra (1999) "Total Hydrocarbons in Water Superficial Sediments and Bioindicator Bivalves in the Pacific Colombian Coast" ***Marine Pollution Bulletin*** 38(9):819-823.
- González-Estrada, 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 (Biólogo). E.N.E.P. Zaragoza. UNAM, México., 108 pp.
- González-Estrada, C. (1998) "Evaluación de los Niveles de Hidrocarburos Alifáticos y Aromáticos Policíclicos en Sedimentos Recientes de la Costa Occidental de Baja California, Mex." Tesis de Maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, México. 100 p.
- González-Macias, M. C. (1997) "Análisis de la Comunidad Bentónica en una Chapopotera del Golfo de México y su Relación con la Presencia Crónica de

BIBLIOGRAFÍA

- Hidrocarburos del Petróleo”. Tesis de Maestría (Maestría en Ciencias), Facultad de Ciencias, UNAM, 114 p.
- González-Orduño, A. M. (2001) “Análisis de datos oceanográficos registrados por el CTD correspondientes al crucero Pánuco I (16-19 de mayo, 2000)”. Reporte Técnico, Instituto Mexicano del Petróleo, Programa de Investigación sobre Medio Ambiente y Seguridad (PIMAS).
 - González-Orduño, A. M. (2002) “Análisis de datos oceanográficos registrados por el CTD correspondientes al crucero Pánuco II (19-23 de febrero, 2002)”. Reporte Técnico, Instituto Mexicano del Petróleo, Programa de Investigación sobre Medio Ambiente y Seguridad (PIMAS).
 - González-Orduño, A. M. (2003) “Análisis de datos oceanográficos (CTD) durante la época de lluvias (Septiembre, 2002), correspondiente al crucero Pánuco III”. Reporte Técnico, Instituto Mexicano del Petróleo, Programa de Investigación sobre Medio Ambiente y Seguridad (PIMAS).
 - GOOS, Global Ocean Observing System (1996) “A Strategic Plan for the Assessment and Prediction of the Health of the Ocean: A Module of the Global Ocean Observing System” [en línea] Intergovernmental Oceanographic Commission [12 de agosto 2004] disponible en http://www.ioc-goos.org/documents/reports/GOOS_017_HOTO_str_pl.pdf.
 - Gordon, D.C. and P.D. Acizer (1974) “Estimation of Petroleum Hydrocarbons in Seawater by Fluorescence Spectroscopy: Improved Sampling and Analytical Methods.
 - Guilbault, G. G. (1990) “Practical Fluorescence” Marcel Dekker, United States. 245 p.
 - Heidel, S. G. (1956) “The progressive lag of sediment concentration with flood waves” **Transaction-American Geophysical Union** 37, 56-66.
 - Hellou, J. (1996) “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Marine Mammals, Finfish, and Molluscs” p. 229-250. in Nelson, Bayer W.; Heinz G. H. and Redman Norwood, “Environmental Contaminants in Wildlife”. Setac Special Publications Serial Lewis Publishers. USA
 - Hewlett Packard (1994) “Water Analysis: organic micropollutants”. Hewlett Packard. Germany. 278 p.
 - Hiltabrand, R.B. (1978) “Estimation of Aromatic Hydrocarbons in Seawater at Proposed Deepwater Port (DWP) Sites in the Gulf of Mexico” **Marine Pollution Bulletin**. 1(9):19-21.

BIBLIOGRAFÍA

- Holmes C. W. (1982) "Geochemical indices of fine sediment transport, northwest Gulf of Mexico" **Journal of Sedimentary Research** 52(1):307-321.
- Hornig, A.W. (1974) "Identification, Estimation, and Monitoring of Petroleum in Marine Waters by Luminescence Methods" **Marine Pollution Monitoring (Petroleum)** Proceedings of a Symposium and Workshop held at NBS, Gaithersburg, Maryland. May 13-17. p. 135-144.
- Hudson, P. F. (2003) "Event Sequence and Sediment Exhaustion in the Lower Pánuco Basin, Mexico" **Catena**, 52:57-76.
- Hutcheson, M. S.; D. Pedersen; N.D. Anastas; J. Fitzgerald and D. Silverman (1996) "Beyond TPH: Health-Based Evaluation of Petroleum Hydrocarbons Exposure" **Regulatory Toxicology and Pharmacology** 24:85-101.
- IMP Instituto Mexicano del Petróleo (1997) "Bioacumulación y Seguimiento de Contaminantes en la Cuenca Baja del Río Pánuco y sus Principales Influentes (Canales de Chijol Varadero)" Subdirección de Protección Ambiental, Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Reporte de Actividades. Servicio DOC-8059.
- IMP-QA-610 (1997) "Determinación de Hidrocarburos Aromáticos por Espectroscopia de Fluorescencia." Metodología Interna.
- IMP-QA-619 (1997) "Determinación de Hidrocarburos Totales del Petróleo en Agua por FT-IR." Metodología Interna.
- IMP-QA-620 (1997) "Determinación de Hidrocarburos Totales del Petróleo en Suelo y Sedimento por FT-IR." Metodología Interna.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (1996) "Cuaderno Estadístico Municipal: Tampico: Estado de Tamaulipas". 131 p.
- IOC/UNESCO (1984) "Manual for Monitoring Oil and Dissolved/Dispersed Petroleum Hydrocarbons in Marine Waters and on Beaches", Manuals and Guides No. 13. UNESCO, Paris, France. 30 pp.
- Irwin, R.J., M. VanMouwerik, L. Stevens; M.D. Seese, and W. Basham (1997) "Environmental Contaminants Encyclopaedia". National Park Service, Water Resources Division. Fort Collins, Colorado. Distributed within the Federal Government as an Electronic Document (Projected public availability on the internet or NTIS: 1998).

BIBLIOGRAFÍA

- Jonhson D.W.; J.B. Callis and G.D. Christian (1977) "Rapid Scanning Fluorescence Spectroscopy" ***Analytical Chemistry*** 49(8):747-757
- Katz, M. F.; T. Sakuma and H. Tosine (1980) "Chromatographic and Spectral Analysis of Polycyclic Aromatics Hydrocarbons in the Air and Water Environments" in Afghan, B. K. and Mackay, D. (Eds) "Hydrocarbons and Halogenated Hydrocarbons in the Aquatic Environmental". Plenum Press, USA, 588 p.
- Kennish, M.J. (1997) "Estuarine and Marine Pollution". CRC Press. USA. 524 p.
- Kocmur, S. F. (1988) "Discusión de la Precisión en la Determinación de Petróleo en agua por espectrofluorometría" ***Contribución Científica del Instituto Antártico Argentino*** 361:1-24.
- Kocmur, S.F. (1986) "Análisis de la Determinación de Petróleo en Agua de Mar Mediante Espectrofluorometría" ***Contribución científica del instituto Antártico Argentino*** 325:1-11.
- Konhauser, K. O.; M. A. Powell, W. S. Fyfe, F. J. Longstaffe, S. Tripathy (1997) "Trace element geochemistry of river sediment, Orissa State, India" ***Journal of Hydrology*** 193, 258-269.
- Kornilios, S.; P.G. Drakopoulos and C. Dounas (1998) "Pelagic Tar, Dissolved/Dispersed Petroleum Hydrocarbons and Plastic Distribution in the Cretan Sea, Greece" ***Marine Pollution Bulletin*** 36(12):989-993.
- Kostecki, P.T. and E. J. Calabrese (1991) "Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater: Analysis Fate Environmental and Public Health Effects Remediation" Vol. I, Lewis Publishers. USA, 354 p.
- Larriva-Sahd, J. (1982) "El Medio Geográfico y la Contaminación en el Estado de Tamaulipas" Tesis de Licenciatura (Lic. en Geografía). Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 82 p.
- Laws, E.A, (1993) "Aquatic Pollution" Second Edition. John Wiley and Sons, Inc, USA. 611p.
- Libes S. M. "An introduction to marine biogeochemistry" New York, J. Wiley. 734 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Lira, J.; A. Morales and F. Zamora (1997) "Study of Sediment Distribution in the Area of the Pánuco River Plume by Means of Remote Sensing" **Int. J. Remote Sensing** 18(1):171-182.
- Lizárraga-Partida, M.L. (1996) Microbiología del Petróleo en el Sur del Golfo de México" p. 2265-278. *In*: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, y D. Zárate-Lomelí (Eds). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico y Tendencias, **EPOMEX** Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche, México. 666 p.
- López-Acuña, D.; D. González de León; A. Moreno-Sánchez (1987) "La Salud Ambiental en México". Fundación Universo Veintiuno, México, 244 p.
- Louati, A., B. Elleuch, M. Kallel, A. Saliot, J. Dagaut and J. Oudot (2001) "Hydrocarbon Contamination of Coastal Sediments from the Sfax Area (Tunisia), Mediterranean Sea" **Marine Pollution Bulletin**. 42(6):445-452.
- Maher, W. A. (1983) "Use of Fluorescence Spectroscopy for Monitoring Petroleum Hydrocarbon Contamination in Estuarine and Ocean Waters" **Bull Environ. Contam. Toxicol.** 30:413-419.
- McKay, J.F. and D.R. Latham (1972) "Fluorescence Spectrometry in the Characterization of High-Boiling Petroleum Distillates" **Analytical Chemistry** 44(13):2132-2137.
- Mendoza-Ramírez (2002) "Determinación de Hidrocarburos del Petróleo en Sedimentos y Agua, en la Comunidad la Rivera, Municipio de Tampico Alto, Veracruz". Tesis de Licenciatura (Biólogo) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. 86 p.
- Metwally, M.E.S., S. Al-Muzaini, P. G. Jacob, M. Bahloul, Y. Urushiwa, S. Sato and A. Matsmura (1997) "Petroleum Hydrocarbons and Related Heavy Metals in the Near-Shore Marine Sediments of Kuwait" **Environmental International** 23(1):115-121.
- Miramar-Solana, R. L. (1987) "Estudio de los Posibles Efectos que sobre la Productividad Primaria Ejercen las Actividades del Puerto Industrial de Altamira, Tamaulipas 1985". Tesis de Licenciatura (Biólogo). Facultad de Ciencias, UNAM. 90 p.
- Morrison R. T. (1973) "Organic Chemistry: answers to problems" Allyn and Bacon, Boston, USA. 208 p.
- Muñiz P.; E. Danulat; B. Yannicelli; J. García-Alonso; G: Medina and M. C. Bicego (2004) "Assessment of contamination by heavy metals and petroleum hydrocarbons in

- sediments of Montevideo Harbour (Uruguay)” **Environment International** 28(8):1019-1028.
- Nadim, F.; G.E. Hoag; S. Liu; R.J. Carley and P. Zack (2000) “Detection and remediation of soil and aquifer systems contaminated with petroleum products: an overview” **Journal of Petroleum Science and Engineering**. 26:169-178.
 - Neff, J. M. (1979) “Polycyclic Aromatics Hydrocarbons in the Aquatic Environmental” Applied Science Publishers LTD, London, 262 p.
 - Ngabe, B.; T.F. Bidleman and G. I. Scott (2000) “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Storm runoff from urban and Coastal South Carolina” **The Science of the Total Environment**. 255:1-9.
 - Olah, G. A. and A. Molnár (1995) “Hydrocarbon Chemistry” John Wiley and Sons, Inc. USA. 632 p.
 - Ortiz-Gallarza, S. M; A. Gil-Zurita; R. García-Hernández; S. Vergara-Méndez y M. L. García-Leal (2000) “Estudio Prototipo de Caracterización del Impacto que Produce el Difusor de una Descarga Industrial sobre el Medio Marino” **Ingeniería. Investigación y Tecnología**. 1(4):141-156.
 - Ortiz-Lozano, D. L. (1998) “Estado Actual a de la Investigación Científica en la Zona Costera de Tamaulipas: Un Enfoque hacia la Detección de Zonas Prioritarias de Conservación”. Tesis de Licenciatura (Biólogo) Facultad de Ciencias, UNAM. México. 130 p.
 - Ortiz-Lozano, L.; V. Solís-Weiss; A. Granada-Barba (2000) “Scientific research in the Tamaulipas Coastal Zone, Mexico: implications for its coastal management” **Ocean and Coastal Management**. 43:927-936.
 - Overstreet, R. and J.A. Galt (1995) “Physical Processes Affecting the Movement and Spreading of Oils in Inland Waters” [en línea] NOAA/Hazardous Materials Response and Assessment Division Seattle, Washington [6 de junio 2003]. Disponible en: <http://response.restoration.noaa.gov/oilaid/inland.pdf>.
 - Padilla-Reza, M. A. (1989) "Determinación de los Hidrocarburos en Sedimentos Recientes del Río Calzadas, en la Región del Bajo Río Coatzacoalcos, Veracruz, México". Tesis de Licenciatura (Biólogo), Facultad de Ciencias. UNAM. 52 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Patra D. and A. K. Mishra (2001) "Concentration dependent Red Shift: Qualitative and Quantitative Investigation of Motor Oils by Synchronous Fluorescence Scan" **Talanta** 53:783-790.
- PDDM, Plan Director de Desarrollo Metropolitano (1975) "Tampico Madero", México, 214 p.
- Pereira W. E.; F. D. Hostettler and J. B. Rapp (1992) "Bioaccumulation of Hydrocarbons Derived from Terrestrial and Antropogénica Sources in the Asian Clam, *Potamocorbula amurensis*, in San Francisco Bay Estuary" **Marine Pollution Bulletin** 24(2):103-109.
- Pérez-Soto, C. L. (2001) "Análisis Geoestadístico de la Difusión de Aguas de Desecho en Altamira, Tamaulipas". Tesis de Maestría (Maestría en Investigación de Operaciones) Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado, UNAM. 171 p.
- Pica-Granados, Y. (1994) "Diagnosis Ambiental del Impacto de Actividades Petroleras en el Puerto de Salina Cruz, Oax.". Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias. UNAM. 102 p.
- Pica-Granados, Y.; M.G. Ponce-Vélez; M. A. Barrón-Echaury (1991) "Golfo de México y Mar Caribe" en G.E. De-La-Lanza-Espino "Oceanografía de Mares Mexicanos" (comp.) AGT Editor, S.A., México.
- Ponce-Vélez, M. G. (1995) "Evaluación de los Niveles de Metales e Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares en la Zona Costera del Golfo de México". Tesis de Maestría (Maestría en Ciencias) Facultad de Ciencias, UNAM, 157 p.
- Poter T. L. and E. K. Simmons (1988) "Analysis of Petroleum Hydrocarbons in Environmental Media" Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group Series Vol. II. Amherst Scientific Publishers. United States of America. 59 p.
- Primo-Yutera (1996) "Química Orgánica Básica y Aplicada" Tomo I, Editorial Reverte, S.A., España.
- Readman J.W., G. Fillmann, I. Tolosa, J. Bartocci, J.-P. Villeneuve, C. Catinni, L.D. Mee (2002) "Petroleum and PAH contamination of the Black Sea" **Marine Pollution Bulletin**. 44:48-62.
- Reddy C.M. and J.G. Quinn (2001) "The North Cape oil spill: hydrocarbons in Rhode Island coastal waters and Point Judith Pond". **Marine Pollution Bulletin** 52:445-461.

BIBLIOGRAFÍA

- Reddy, C.M. and J.G. Quinn (1999) "GC-MS Analysis of Total Petroleum Hydrocarbons and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Seawater Samples After the North Cape Oil Spill". **Marine Pollution Bulletin** 38(2):126-135.
- Rozas L.; T. J. Minello and C. B. Henry (2000) "An Assessment of Potencial Oil spill Damage to salt Marsh Habitats and Fishery Resources in Galveston Bay, Texas. **Marine Pollution Bulletin** 40(12):1148-1160.
- Rubio-Lua, A. G. (1983) "Determinación de los Desechos Industriales del Puerto de Altamira, Tamaulipas, por Medio de Bioensayos con Organismos Marinos de la Zona" Tesis de Licenciatura (MVZ). Facultad de Medicina, Veterinaria y Zootecnia. UNAM. 100 p.
- Sakai R.; H. C. Siegmann; H. Sato and S. Voorhees (2002) "Particulate Matter and Particle-Attached Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Indoor and Outdoor Air of Tokyo Measured with Personal Monitors" **Environmental Research Section A** 89:66-71.
- Salazar-Vallejo, S. (1991) "Contaminación Marina" Centro de Quintana Roo. Fondo de Publicaciones y Ediciones del Gobierno de Quintana Roo. 193 p.
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1980) "Monografía de la Cuenca Baja del Río Pánuco". Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Agricultura y Operaciones, Dirección General de Economía Agrícola. 78 p.
- SARH, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1987) "Memoria de la Comisión de Estudios de la Cuenca del río Pánuco. 1959-1986", 463 p.
- SEDUE, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (1983) Impacto Ambiental en el Área Metropolitana de la Desembocadura del Río Pánuco. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental.
- Secretaría de Marina (1979) "Estudio Geográfico de la Región de Tampico, Tamps." Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía, México. D. F. 209 p.
- Secretaria de Marina (1980) "Observaciones Hidrológicas Frente al Litoral de Tamaulipas en el Golfo de México". Dirección General de Oceanografía. Informe Técnico. México, D. F. 20 p.

BIBLIOGRAFÍA

- Secretaria de Marina (1982 a) "Evaluación de la Toxicidad de las Descargas Municipales e Industriales en el Río Pánuco". Primera Parte. Dirección General de Oceanografía. México, D.F. 47 p.
- Secretaria de Marina (1982 b) "Comportamiento de la Circulación Litoral en el Puerto y Proximidades de Tampico, Tamaulipas durante el Periodo de Julio de 1981". Dirección General de Oceanografía. México, D. F. 69 p.
- Secretaria de Marina (1982 c) "Estudio del Impacto Ambiental del Petróleo y sus Derivado en el Puerto y Proximidades, Tampico Tamaulipas". Dirección General de Oceanografía. México, D. F. 43 p.
- Secretaría de Marina (1998 a) "Estudio de las Condiciones Oceanográficas del Litoral Tamaulipeco". Dirección General de Oceanografía Naval. Estación de Investigación Oceanográfica de Tampico. Informe Técnico. Diciembre de 1998.
- Secretaría de Marina (1998 a) "Estudio de las Condiciones Oceanográficas del Litoral tamaulipeco". Dirección General de Oceanografía Naval. Estación de Investigación Oceanográfica Tampico. Informe Técnico. Diciembre 1998.
- Secretaría de Marina (1998 b) "Estudio de las Modificaciones Oceanográficas y Ambientales Producidas por el Río Pánuco". Dirección General de Oceanografía Naval. Estación de Investigación Oceanográfica de Tampico. Informe Técnico. Noviembre de 1998.
- Secretaría de Marina (1998 c) "Impacto Ambiental en la Zona Costera del Sur de Tamaulipas por las Influencias del Estuario del Río Pánuco y otras Fuentes". Dirección General de Oceanografía Naval. Estación de Investigación Oceanográfica de Tampico. Informe Técnico. Octubre de 1998.
- Secretaría de Pesca (1983) "Estudio de Factibilidad de un Puerto Pesquero en la Zona Conurbada del Bajo Pánuco, Tamaulipas, México." Tomo I, 413 p.
- SEMARNAT y CNA (2002) "Calidad del agua del Río Pánuco Conforme a Parámetros Físicos, Químicos y Biológicos, 1990-2001" Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México, [En línea] <http://semarnat.gob.mx>. Consulta 18 de enero de 2004.
- Shen J.; R.J. Engen and N.K. Saadeh (1985) "Identification of Spiller Crude Oils From Similar Origins" *The Arabian Journal for Science and Engineering* 10(1):63-78.

BIBLIOGRAFÍA

- Shriadah M. M. A. (1998) Impacts of an Oil Spill on the Marine Environmental of the United Arab Emirates Along the Gulf of Oman. **Marine Pollution Bulletin** 36(11):876-879.
- Shriadah, M.M. (1998) "Impacts of an Oil Spill on the Marine Environment of the United Arab Emirates Along the Gulf of Oman" **Marine Pollution Bulletin** 36(11):876-879
- Singer M. E. and W. R. Finnerty (1984) "Microbial Metabolism of straight-chain and branched alkanes. In Petroleum Microbiology. Ed. R. Atlas, pp-1-60. McMillan Publishing Co. New York
- Solís, V. W.; P.A. Hernández and F.M. Solís (2000) "Muestreo del Bentos" p. 353-398 en A. Granada-Barba; V. Solís-Weiss y R. Bernal-Ramírez (Eds) Métodos de Muestreo en la Investigación Oceanográfica. Posgrado del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM, México.
- Stasiuk L.D. and L.R. Snowdon (1997) "Fluorescence micro-spectrometry of synthetic and Natural Hydrocarbon Fluid Inclusions: Crude Oil chemistry, density and application to Petroleum Migration" **Applied Geochemistry**. 12:229-241.
- Streitwieser, A y C. H. Heathcoch (1981) "Química Orgánica" Editorial Interamericana, México.
- Succar, S.D.; A.E. Roca and J.A. Catoggio (1987) "Detección, Identificación y Evaluación (Por CGL y por CLAP) de los Primeros Términos de la Familia de Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares en Subproductos Industriales Usados como Materia Prima, Debido a su Alto Contenido de Benceno" **Rev. Latinoam. Ing. Quím. Quím. Apl.** 17:31-40.
- Terrats-Chao, A. L. (1986) "Contaminación por Hidrocarburos del Petróleo en el Río Coatzacoalcos y Áreas Adyacentes: Sedimentos y Organismos" Tesis de Licenciatura (Biólogo). Facultad de Ciencias, UNAM. 60 p.
- Toledo A. (1995) "Geopolítica y Desarrollo en el Istmo de Tehuantepec" Centro de Ecología y Desarrollo. 265 p.
- Toledo-Ocampo, A., (1996) Caracterización Ambiental del Golfo de México, p,1-24. In: A. V. Botello, J. L. Rojas-Galaviz, J. A. Benítez, D. Zárate-Lomelí (Eds). Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambienta: Diagnóstico y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. EPOMEX Serie Científica, 5. 666 p.

BIBLIOGRAFÍA

- UNESCO (1976) "Guide to Operational Procedures for the IGOSS Pilot Project on Marine Pollution (Petroleum). Monitoring Manual and Guides No. 7.
- UNH/GRDC (2003) "Panuco Basin" [en línea] Global Runoff Data Centre/University of New Hampshire [Fecha de consulta: 3 de julio de 2003] Disponible en <http://www.grdc.sr.unh.edu/html/Polygons/P4358300.html>
- USEPA, U.S. Environmental Protection Agency (1995) "Physical Processes Affecting the Movement and Spreading of Oils in Inland Waters" Environmental Protection Agency, <http://response.restoration.noaaa.gov/oilaid/inland.pdf>.
- Van-Orden, M. (1971) "Compendio de Química Orgánica" Editorial Interamericana, México. 347 p.
- Vázquez-Botello, A.; G. Ponce-Vélez y G. Díaz-González, (1993) "Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH's) en Áreas Costeras del Golfo de México". *Hidrobiológica*. 3(1-2): 1-15.
- Ventajas, L. M. (1986) "Distribución de la Concentración de Hidrocarburos Polinucleados a lo largo del Mar de Weddell" *Inst. Ant. Arg.* 320:1-13.
- Villegas-Jiménez, A.; J.V. Macías-Zamora y J.A. Villaescusa-Celaya (1996) "Aliphatic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Superficial Sediments of Bahía de Todos los Santos, B. C., México" *Hidrobiológica* 6(1-2):25:32.
- Vizcaíno-Murray, F. (1975) "La Contaminación en México" Fondo de Cultura Económica, México. 514 p.
- Vo-Dinh T. (1978) "Multicomponent Analysis by Synchronous Luminescence Spectrometry" *Analytical Chemistry* 50(3):396-401.
- Vorhees, D.J.; W.H. Weisman and J.B. Gustafson (1999) "Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites: Implementing the Working Group Approach" Vol. 5 en Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series. USA.
- Wang X. L.; S. Tao; R. W. Dawson and F.L.Xu (2002) "Characterizing and Comparing Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Tianjin Wastewater-Irrigated Area" *Environmental Research* 90:201-206

BIBLIOGRAFÍA

- Wattayakon, G.; B. King; E. Wolanski and P. Suthanaruk (1998) "Seasonal dispersion of petroleum contaminants in the Gulf of Thailand" **Continental Shelf Research** 18:641-659.
- Weber, R.R. and M.C. Bicego (1991) "Survey of Petroleum aromatic Hydrocarbons in the São sebastião Channel, SP, Brazil, November 1985 to August 1986" **Bolm. Inst. Oceanogr., S Paulo** 39(2):117-121.
- Weber, R.R.; E. Zanardi and M.C. Bicego (1998) Distribuição e ocorrência dos Hidrocarbonetos Biogênicos e Petróleo, na Água do Mar Superficial e nos Sedimentos de Superfície da Região da Plataforma Interna do Canal de São Sebastião, SP, Brasil" **Relat.téc. Inst. Oceanogr.** (43):1-14.
- Weisman, W. (1998) "Analysis of Petroleum Hydrocarbons in Environmental Media" [en línea] Total Petroleum Hydrocarbons Criteria Working Group Series Vol. I. Amherst Scientific Publishers. United States of America. 98 p. [26 de Mayo de 2003]. Disponible en <http://www.aehs.com/publications/catalog/contents/Volume1.pdf>
- Wetzel, D. L. and E. S. Van Vleet (2003) "Persistence of petroleum hydrocarbon contamination in sediments of the canals in Venice, Italy: 1995 and 1998" **Marine Pollution Bulletin.** 46(8):1015-1023.
- Wetzel, R. G. (1982) "Limnología" Editorial Omega. Barcelona, España, 104 p.
- Yamane, A.; K. Sakakibara; M. Hosomi and A. Murakami (1997) "Microbiological Degradation of Petroleum Hydrocarbons in Estuarine Sediment of Tama River in Tokyo Urban Area" **Wat. Sci. Tech.** 35(8):69-76.
- Zanardi, E.; M. C. Bicego and R. R. Weber (1999) "Dissolved/dispersed Petroleum Aromatic Hydrocarbons in the Sao Sebastiao Chanel, Sao Paulo, Brazil" **Marine Pollution Bulletin** 38(5):410-413.
- Zarate-Lomelí, D.; T.S. Vázquez; J.L. Rojas-Galavíz; A. Yáñez-Arancibia y E. Rivera-Arriaga (1999) "Terms of Reference towards an integrated management policy in the coastal zone of the Gulf of México and the Caribbean" **Ocean and Coastal Management** 42:345-368.

ANEXO

Resultados para hidrocarburos Pánuco I

ESTACIÓN	HTP AGUA µg/L	HA AGUA µg/L	HTP SEDIMENTO mg/kg	HA SEDIMENTO mg/kg
E1	109.90	0.79	10.76	0.025
E7	53.80	0.26	13.55	0.004
E13	111.00	0.81	17.40	0.028
E17	34.30	0.08	20.08	0.001
E29	44.40	1.17	39.73	0.862
E33	32.10	NA	20.21	0.126
E45	89.40	51.07	144.30	5.120
E53	51.70	0.60	12.42	0.012
E54	33.30	0.50	19.26	0.017
E66	63.30	1.22	20.81	0.298
E70	37.70	1.10	15.40	0.044
E87	32.60	0.93	11.36	0.039
E91	47.70	1.02	23.38	0.081
E95	62.10	0.40	12.75	0.016
E108	30.20	0.33	8.10	0.005
E109	51.00	17.51	58.03	1.420
E110	35.30	2.21	51.89	0.322
Promedio	54.11	5.00	29.38	0.50
Destvest	47.70	0.87	19.26	0.04
Mediana	26.05	12.98	32.88	1.25
Máxima	111.00	51.07	144.30	5.12
Mínimo	30.20	0.08	8.10	0.00

Resultados para hidrocarburos Pánuco II

ESTACIÓN	HTP AGUA µg/L	HA AGUA µg/L	HTP SEDIMENTO mg/kg	HA SEDIMENTO mg/kg
E1	143.70	0.21	62.30	0.29
E9	53.00	0.19	51.38	0.16
E11	52.40	0.13	56.00	0.23
E13	83.20	0.19	58.47	0.28
E15	65.70	0.22	72.08	0.35
E17	65.30	0.18	52.01	0.11
E27	26.30	0.16	28.05	0.09
E29	72.90	0.17	116.60	0.78
E31	117.10	0.18	58.96	0.17
E33	52.90	0.16	55.75	0.17
E35	56.00	0.21	37.79	0.03
E45	70.20	0.13	396.95	35.66
E47	65.60	0.17	60.90	0.30
E49	68.50	0.09	34.16	0.07
E51	NA	NA	NA	NA
E53	NA	NA	NA	NA
E64	95.60	0.12	30.32	0.28
E66	69.10	0.14	42.00	0.30
E68	64.20	0.16	43.24	0.26
E70	87.40	0.22	25.65	0.19
E72	115.00	0.15	15.98	0.10
E89	101.70	0.12	42.42	0.26
E91	85.00	0.14	31.99	0.28
E93	66.50	0.15	14.84	0.04
E95	87.10	0.13	17.83	0.09
E108	56.20	0.12	78.84	0.75
E109	75.20	0.16	27.24	0.04
E110	57.80	0.21	688.75	2.56
E111	41.30	0.17	25.08	0.09
Promedio	73.89	0.16	82.43	1.63
Destvest	68.50	0.16	43.24	0.23
Mediana	24.98	0.03	140.49	6.82
Máxima	143.70	0.22	688.75	35.66
Mínimo	26.30	0.09	14.84	0.03

Resultados para hidrocarburos Pánuco III

ESTACIÓN	HTP AGUA µg/L	HA AGUA µg/L	HTP SEDIMENTO mg/kg	HA SEDIMENTO mg/kg
E1	125.59	0.08	24.10	0.26
E9	64.62	0.16	28.72	0.16
E11	38.57	0.09	27.37	0.59
E13	326.36	0.12	40.18	1.11
E15	235.13	0.11	26.00	0.34
E17	182.09	0.14	26.18	0.10
E27	34.63	0.28	30.11	0.08
E29	31.69	0.11	28.61	0.27
E31	104.4	0.06	66.37	2.41
E33	382.23	0.13	27.65	0.26
E35	53.32	0.09	29.69	0.35
E45	70.07	0.1	158.67	9.45
E47	10.01	0.12	47.38	1.45
E49	38.84	0.04	42.04	0.39
E51	335.97	0.04	31.51	0.34
E53	7.61	0.08	27.37	0.08
E64	77.91	0.08	30.30	0.18
E66	15.93	0.13	49.63	0.00
E68	44.32	0.11	21.88	1.39
E70	11.25	0.18	22.90	0.14
E72	20.97	0.07	106.56	8.72
E85	51.87	0.08	19.66	0.12
E87	3.47	0.05	18.60	0.02
E89	23.08	0.13	32.20	0.13
E91	7.93	0.11	40.73	0.27
E93	91.35	0.11	39.57	0.27
E95	107.31	0.09	23.92	0.09
E108	146.73	0.14	21.74	0.03
E109	158.36	0.12	68.33	0.35
E110	230.26	0.09	18.98	0.18
E111	30.69	0.11	24.87	0.02
Promedio	98.79	0.11	38.77	0.95
Destvest	53.32	0.11	28.72	0.26
Mediana	104.55	0.05	28.68	2.23
Máxima	382.23	0.28	158.67	9.45
Mínimo	3.47	0.04	18.60	0.00

Resultados físicos y químicos Pánuco I

ESTACIÓN	Temp. (°C)	Salinidad UPS	Oxígeno (µg/l)	Mat. Org. (%)	Niquel agua µg/l	Niquel Sedimento mg/kg	Vanadio agua µg/l	Vanadio sedimento mg/kg	Prof. (m)	LONG. W	LAT. N
E1	27.2	36.24	5.80	0.465	3.74	27	0.78	73.	50.1	-97.4955	22.1144
E7	26	36.20	5.40	0.550	NA	30	NA	102	28.8	-97.6672	22.1018
E13	26.38	36.23	4.79	0.440	0.51	26	0.98	80	40.3	-97.5987	22.1337
E17	27.25	36.24	6.03	0.790	0.77	44	1.27	94	59.3	-97.4697	22.1404
E29	26.11	36.13	5.08	1.400	0.52	38	1.22	122	36.3	-97.6660	22.2020
E33	26.99	36.24	4.34	0.580	0.63	29	0.97	94	53.2	-97.5000	22.2070
E45	25.5	36.21	3.57	1.030	1.18	32	0.22	115	20.0	-97.7334	22.2688
E53	27.16	36.23	4.35	0.560	0.51	39	0.32	94	68.6	-97.4677	22.2742
E54	27.15	36.22	4.60	NA	2.10	NA	0.38	NA	70.0	-97.4677	22.3054
E66	25.84	36.22	4.96	0.500	0.64	27	0.64	86	34.0	-97.7003	22.3358
E70	25.9	36.24	4.77	0.760	1.99	38	0.3	118	51.0	-97.5723	22.3390
E87	25.94	36.20	4.70	0.360	1.11	23	0.28	73	30.0	-97.7357	22.4035
E91	25.53	36.25	3.68	0.760	0.38	41	0.44	113	47.0	-97.5997	22.4006
E95	26.35	36.24	5.21	0.510	0.70	41	0.11	70	67.0	-97.4701	22.4039
E108	25.67	35.85	5.14	0.200	0.53	19	0.64	115	15.2	-97.8018	22.3325
E109	24.18	35.51	4.94	0.790	0.59	36	1.14	110	15.4	-97.7592	22.2716
E110	25.19	36.25	5.94	0.330	0.57	30	0.32	138	16.5	-97.7411	22.2007
Promedio	26.14	36.16	4.90	0.63	1.03	32.50	0.63	99.81	41.34		
Mediana	26.00	36.23	4.94	0.56	0.64	31.00	0.54	98.00	40.30		
Desves	0.84	0.19	0.69	0.29	0.89	7.27	0.39	20.06	18.85		
Máximo	27.25	36.25	6.03	1.40	3.74	44.00	1.27	138.00	70.00		
Mínimo	24.18	35.51	3.57	0.20	0.38	19.00	0.11	70.00	15.20		

Resultados físicos y químicos Pánuco II

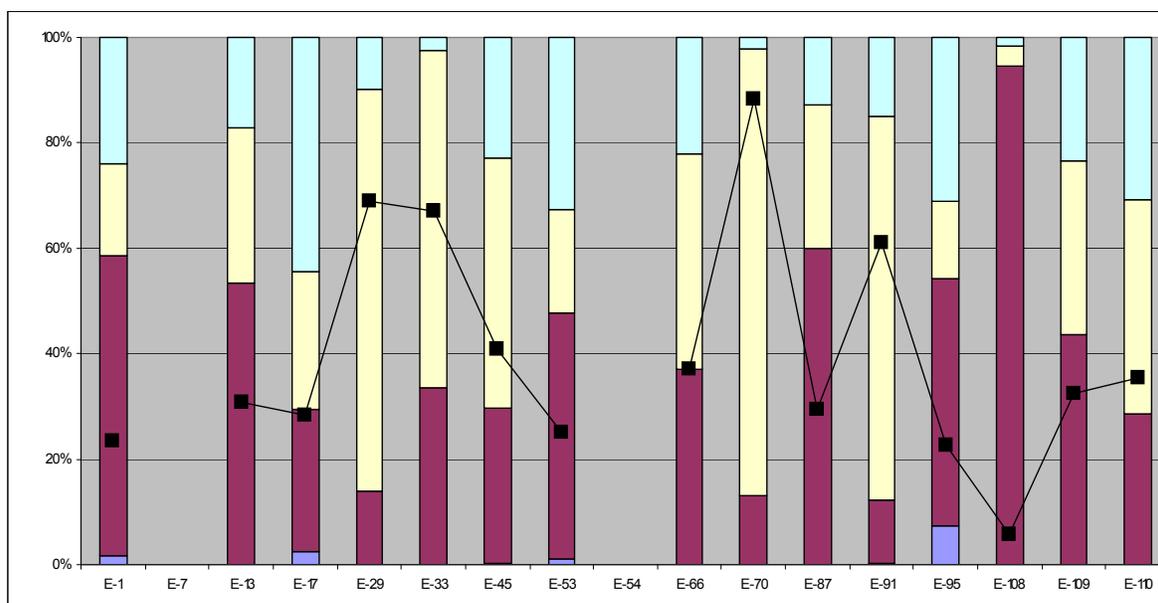
ESTACIÓN	Temp. (°C)	Salinidad	Oxígeno (mg/l)	Mat Org. Sed. (%).	Mat Org. Agua	Níquel Agua µg/l	Níquel Sed. mg/kg	Vanadio Agua µg/l	Vanadio Sedimento mg/kg	Profundidad (m)	LONG. W	LAT. N
E1	19.51	34.04	5.88	0.51	19.89	0.8	14	0.16	71	56.7	-97.4696	22.1043
E9	19.12	33.98	5.77	NA	6.86	0.45	9	ND	48	18	-97.7354	22.1662
E11	19.34	33.96	5.80	0.41	4.02	0.32	NA	0.16	NA	30	-97.6679	22.1326
E13	19.20	34.16	5.58	0.43	9.55	0.49	16	ND	60	40	-97.6000	22.1355
E15	19.35	34.14	5.85	NA	NA	0.61	15	0.25	66	48	-97.5333	22.1333
E17	19.39	34.13	5.53	0.60	21.66	0.04	16	0.11	82	60.5	-97.4696	22.1348
E27	19.44	33.28	5.61	0.24	5.15	0.07	12	ND	61	18.7	-97.7312	22.2003
E29	19.21	34.04	5.58	0.87	2.73	0.28	22	ND	94	36	-97.6658	22.1999
E31	19.22	34.11	5.85	0.46	2.6	0.55	12	0.15	63	43	-97.6011	22.2010
E33	19.00	33.75	6.36	0.57	2.56	0.28	18	0.33	78	53	-97.5343	22.2005
E35	19.27	34.14	5.71	0.71	5.17	0.71	19	0.01	98	67	-97.4658	22.1998
E45	19.13	33.54	5.89	0.95	3.84	0.86	15	0.07	96	19	-97.7337	22.2663
E47	18.95	33.66	5.58	0.54	5.78	3.38	16	0.16	71	38.5	-97.6676	22.2675
E49	18.88	33.75	5.36	0.59	NA	ND	20	ND	84	46	-97.6005	22.2661
E51	18.87	33.75	5.83	0.65	5.44	0.36	20	ND	96	55	-97.5355	22.2669
E53	18.92	33.91	5.98	0.54	6	0.36	18	ND	85	70	-97.4670	22.2688
E64	19.30	33.67	6.61	0.31	3.24	0.46	13	0.19	57	24	-97.7663	22.3334
E66	19.90	33.63	5.97	0.43	2.74	0.4	16	0.05	67	35	-97.7036	22.3325
E68	19.38	33.70	5.74	0.57	2.85	0.38	18	ND	85	42.9	-97.6349	22.3347
E70	19.53	33.73	5.93	0.75	2.7	0.34	22	0.05	92	52	-97.5664	22.3341
E72	19.69	33.66	5.77	0.85	4.58	0.17	20	0.32	93	64	-97.4999	22.3340
E89	18.79	33.89	5.35	0.54	4.17	0.39	20	ND	81	39.5	-97.6684	22.3999
E91	19.06	33.94	5.81	0.52	4.31	0.62	23	ND	97	47.5	-97.5939	22.4005
E93	19.27	33.67	5.53	0.71	0.15	0.47	11	ND	54	62	-97.5337	22.4003
E95	19.45	33.62	5.07	0.39	4.75	0.36	22	0.49	99	66	-97.4681	22.4012
E108	19.77	33.54	5.83	NA	2.53	0.36	5	ND	32	15.7	-97.8006	22.3324
E109	19.47	33.45	5.80	1.01	NA	0.28	23	0.57	103	15	-97.7612	22.2658
E110	19.68	33.06	5.46	0.30	4.52	0.44	12	ND	66	12.1	-97.7701	22.1836
E111	19.14	33.97	5.38	0.15	6.19	0.45	13	ND	118	15	-97.7494	22.1336
Promedio	19.28	33.79	5.74	0.56	5.54	0.52	16.43	0.20	78.46	41.04		
Mediana	19.27	33.75	5.77	0.54	4.42	0.40	16.00	0.16	81.50	42.90		
Desves	0.28	0.27	0.30	0.21	4.85	0.59	4.53	0.16	19.52	18.07		
Máximo	19.90	34.16	6.61	1.01	21.66	3.38	23.00	0.57	118.00	70.00		
Mínimo	18.79	33.06	5.07	0.15	0.15	0.04	5.00	0.01	32.00	12.10		

Resultados físicos y químicos Pánuco III

ESTACIÓN	Temperatura (°C)	Salinidad	Oxígeno mg/L	Mat Org. Agua	Mat Org. Sed (%)	Vanadio Sedimento (mg/kg)	Níquel Sedimento (mg/kg)	Profundidad (m)	Long. W	Lat. N
E1	29.04	36.05	5.64	1.63	0.55	62	14	57.8	-97.4633	22.1010
E9	29.28	34.63	4.92	1.73	0.46	77	13	19	-97.7340	22.1338
E11	29.79	36.23	4.28	1.32	0.42	61	11	29	-97.6684	22.1333
E13	29.57	35.83	4.53	3.98	0.5	68	16	39	-97.6007	22.1332
E15	29.28	36.05	4.27	NA	NA	61	11	48	-97.5331	22.1329
E17	29.16	35.70	4.97	3.35	0.46	57	12	59	-97.4675	22.1326
E27	29.77	35.58	4.67	3.88	0.47	68	13	19	-97.7309	22.2002
E29	29.43	35.93	4.64	2.41	1.07	100	18	35	-97.6665	22.2000
E31	29.52	36.01	5.02	3.71	0.36	48	13	43	-97.5996	22.2008
E33	29.05	35.69	5.08	2.8	NA	NA	NA	54	-97.5329	22.2014
E35	29.14	35.85	4.91	2.82	0.56	75	14	64	-97.4657	22.2000
E45	29.80	36.21	4.07	2.16	1.26	100	12	20	-97.7345	22.2668
E47	29.83	36.16	4.25	3.35	NA	75	18	37	-97.6692	22.2660
E49	30.01	36.14	4.27	1.84	0.72	83	20	45	-97.6002	22.2672
E51	29.59	35.90	4.30	1.99	0.67	85	17	54	-97.5336	22.2666
E53	28.68	36.07	4.59	2.64	0.67	90	15	69	-97.4667	22.2673
E64	29.32	36.14	4.83	1.65	0.42	53	8	24	-97.7663	22.3335
E66	29.84	36.31	4.91	1.85	0.55	64	15	34	-97.6998	22.3338
E68	29.68	35.78	4.88	3.88	1.37	75	17	42	-97.6334	22.3347
E70	29.22	35.95	4.94	1.24	NA	94	22	51	-97.5666	22.3349
E72	28.72	36.06	4.94	2.3	0.17	107	20	61	-97.4984	22.3345
E85	29.31	36.18	4.61	3.9	NA	38	8	20	-97.8009	22.4006
E87	29.54	36.20	4.6	1.1	0.33	55	11	29	-97.7340	22.4000
E89	29.80	36.18	4.33	0.53	0.57	85	17	38	-97.6676	22.3990
E91	29.56	36.01	4.75	1.21	0.66	90	21	47	-97.6008	22.3998
E93	29.11	35.99	4.85	2.16	0.87	102	20	59	-97.5346	22.4001
E95	28.82	35.99	4.77	1.56	0.43	62	11	67	-97.4670	22.4008
E108	29.46	36.10	4.82	2.03	0.18	61	6	14	-97.8044	22.3347
E109	29.59	36.07	4.77	2.08	1.02	98	18	15	-97.7667	22.2667
E110	29.48	35.70	4.85	3.54	0.23	65	10	13	-97.7656	22.1974
E111	29.39	35.19	4.63	2.15	0.27	85	11	15	-97.7500	22.1334
Promedio	29.41	35.93	4.71	2.36	0.59	74.80	14.40	39.38		
Mediana	29.46	36.01	4.77	2.16	0.53	75.00	14.00	39.00		
Desves	0.34	0.33	0.32	0.96	0.31	17.87	4.17	17.50		
Máximo	30.01	36.31	5.64	3.98	1.37	107.00	22.00	69.00		
Mínimo	28.68	34.63	4.07	0.53	0.17	38.00	6.00	13.00		

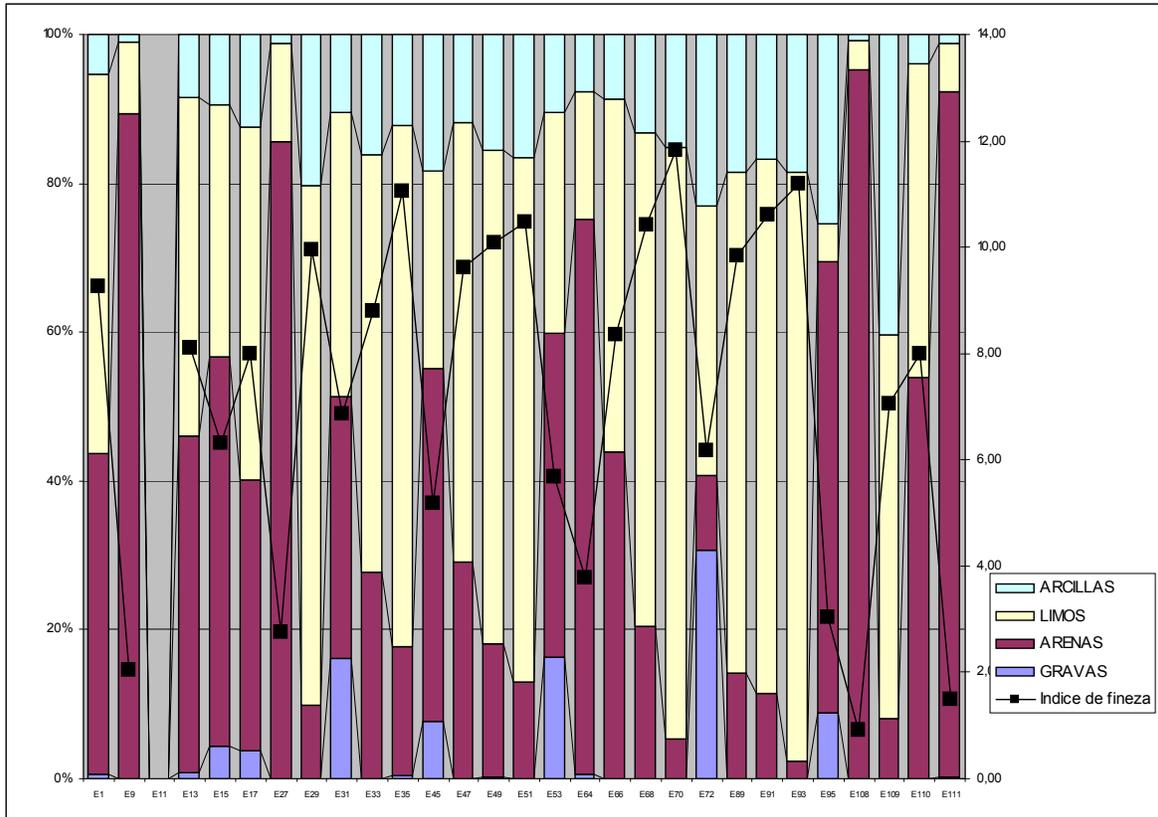
Composición Textural Panuco I

ESTACIÓN	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	LIMOS (%)	ARCILLAS (%)	ÍNDICE DE FINEZA
E-1	1.6	57.0	17.3	24.1	4.21
E-7	NA	NA	NA	NA	NA
E-13	0.0	53.3	29.4	17.3	5.52
E-17	2.5	27.0	26.2	44.3	5.09
E-29	0.0	13.8	76.4	9.7	12.41
E-33	0.0	33.6	63.9	2.5	12.06
E-45	0.2	29.4	47.6	22.8	7.37
E-53	1.2	46.6	19.4	32.8	4.52
E-54	NA	NA	NA	NA	NA
E-66	0.1	37.0	40.8	22.1	6.68
E-70	0.1	13.0	84.6	2.3	15.91
E-87	0.0	59.9	27.4	12.7	5.31
E-91	0.3	12.0	72.8	14.9	10.99
E-95	7.4	46.7	14.7	31.1	4.08
E-108	0.0	94.4	4.0	1.6	1.05
E-109	0.0	43.6	33.1	23.4	5.83
E-110	0.0	28.7	40.4	30.9	6.38



Composición Textural Panuco II

ESTACIÓN	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	LIMOS (%)	ARCILLAS (%)	ÍNDICE DE FINEZA
E1	0.7	43.1	50.9	5.3	9.26
E9	0.0	89.4	9.7	0.9	2.04
E11					
E13	0.7	45.3	45.6	8.4	8.09
E15	4.3	52.4	34.0	9.4	6.30
E17	3.8	36.5	47.3	12.4	7.98
E27	0.0	85.6	13.2	1.2	2.75
E29	0.0	9.8	69.9	20.3	9.95
E31	16.1	35.4	38.1	10.4	6.86
E33	0.0	27.7	56.2	16.1	8.80
E35	0.4	17.3	70.1	12.2	11.06
E45	7.7	47.4	26.6	18.3	5.19
E47	0.0	29.1	59.0	11.9	9.61
E49	0.1	18.0	66.3	15.6	10.09
E51	0.1	12.9	70.5	16.5	10.48
E53	16.4	43.4	29.9	10.4	5.69
E64	0.5	74.7	17.0	7.8	3.78
E66	0.0	43.9	47.5	8.6	8.34
E68	0.0	20.5	66.3	13.1	10.42
E70	0.1	5.3	79.6	15.1	11.81
E72	30.7	10.0	36.2	23.1	6.17
E89	0.0	14.2	67.2	18.6	9.85
E91	0.0	11.3	71.8	16.8	10.61
E93	0.0	2.5	79.0	18.6	11.19
E95	8.8	60.6	5.1	25.4	3.03
E108	0.0	95.3	3.9	0.8	0.92
E109	0.0	8.0	51.7	40.3	7.04
E110	0.0	53.8	42.2	3.9	7.98
E111	0.2	92.0	6.6	1.2	1.48



Composición Textural Panuco III

ESTACIÓN	GRAVAS (%)	ARENAS (%)	LIMOS (%)	ARCILLAS (%)	ÍNDICE DE FINEZA
E1	9.9	52.1	25.3	12.6	5.05
E9	0.6	59.9	31.9	7.6	6.06
E11	1.6	54.0	32.4	11.9	6.01
E13	0.6	36.4	50.2	12.7	8.34
E15	11.5	55.2	16.6	16.7	3.99
E17	3.6	53.4	32.1	10.9	5.99
E27	0.1	63.2	24.6	12.1	4.95
E29	0.0	6.9	59.6	33.4	7.97
E31	1.4	49.1	42.8	6.7	7.82
E33	46.7	22.7	20.8	9.7	4.40
E35	3.7	45.2	25.2	26.0	5.02
E45	3.9	46.5	35.0	14.6	6.26
E47	0.0	26.8	51.8	21.4	7.89
E49	0.2	24.2	46.9	28.8	7.03
E51	0.3	16.3	54.3	29.2	7.70
E53	2.8	38.4	26.1	32.7	5.10
E64	0.3	75.5	10.3	13.9	3.12
E66	0.1	32.3	43.8	23.9	6.86
E68	0.7	37.7	36.7	24.9	6.17
E70	0.3	35.4	28.5	35.8	5.28
E72	5.5	28.6	32.9	33.0	5.69
E85	0.4	90.5	7.3	1.8	1.69
E87	1.4	61.8	25.8	11.0	5.11
E89	0.0	32.4	40.9	26.7	6.54
E91	0.5	8.3	59.1	32.1	7.99
E93	0.0	4.7	58.9	36.3	7.77
E95	7.8	58.3	21.1	12.8	4.48
E108	0.0	90.5	8.0	1.5	1.80
E109	0.0	5.9	59.6	34.5	7.91
E110	0.0	68.8	27.0	4.2	5.34
E111	0.0	91.7	6.8	1.5	1.57

