



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

EVALUACIÓN DE LA TOXICIDAD DE SEDIMENTOS DE
CUERPOS ACUÁTICOS RECEPTORES DE PEMEX-
REFINACIÓN EN SALINA CRUZ, OAXACA.

TESIS

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Ecología)

Presenta

María Cristina González Lozano

La Paz, Baja California Sur, julio 2007

COMITÉ TUTORIAL

Dra. Lia Celina Méndez Rodríguez, Directora de Tesis

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. Alfonso Vázquez Botello

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM

Dr. Alejandro M. Maeda Martínez

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. César Augusto Salinas Zavala

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. Diego Guillermo López Veneroni

Instituto Mexicano del Petróleo

COMITÉ REVISOR DE TESIS

Dra. Lia Celina Méndez Rodríguez, Directora de Tesis

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. Alfonso Vázquez Botello

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM

Dr. Alejandro M. Maeda Martínez

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. César Augusto Salinas Zavala

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. Diego Guillermo López Veneroni

Instituto Mexicano del Petróleo

JURADO DE EXAMEN DE GRADO

Dra. Lia Celina Méndez Rodríguez, Directora de Tesis

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. Alfonso Vázquez Botello

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM

Dr. Alejandro M. Maeda Martínez

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. César Augusto Salinas Zavala

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dr. Diego Guillermo López Veneroni

Instituto Mexicano del Petróleo

Dr. Gopal Murugan

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

Dra. Tania Zenteno Savín (Suplente)

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC

ACTA DE LIBERACION DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 10:00 horas del día 24 del Mes de Mayo del 2007, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Evaluación de la toxicidad de sedimentos de cuerpos acuáticos receptores de Pemex-Refinación en Salina Cruz, Oax."

Presentada por el alumno:

María Cristina González Lozano

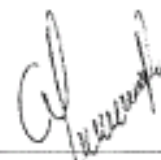
Aspirante al Grado de DOCTOR EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACION DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACION EN Ecología

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA



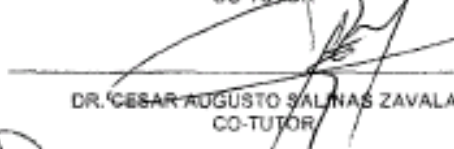
DRA. LIA CELINA MÉNDEZ RODRÍGUEZ
DIRECTORA DE TESIS



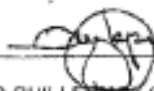
DR. ALFONSO VAZQUEZ BOTELLO
CO-TUTOR



DR. ALEJANDRO M. MAEDA MARTINEZ
CO-TUTOR



DR. CESAR AUGUSTO SALINAS ZAVALA
CO-TUTOR



DR. DIEGO GUILLERMO LOPEZ VENERONI
CO-TUTOR



DRA. THELMA ROSA CASTELLANOS CERVANTES,
DIRECTORA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

RESUMEN

Con el propósito de conocer la toxicidad de los sedimentos recientes se analizaron 43 muestras de sedimento superficial en seis sitios: zona litoral, Puerto-Antepuerto, Arroyo Zanjón, Estero La Ventosa, presa “Benito Juárez” y el Río Tehuantepec durante junio de 2002, en la región de Salina Cruz, Oaxaca, México, principal centro de abastecimiento de petróleo y productos refinados del litoral del Pacífico Mexicano. Se caracterizaron los principales contaminantes indicativos de la actividad petrolera como son los hidrocarburos aromáticos totales (HAT), material orgánico extraíble (MOE), metales pesados y metaloides (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Hg, Pb, V y Zn) así como la granulometría de los sedimentos. La toxicidad fue evaluada en extractos acuosos usando los organismos: *Vibrio fischeri*, dos especies de *Artemia*, *franciscana* y *Artemia* sp. (Oaxaca) y *Mysidopsis bahia* en los cuerpos acuáticos receptores costeros y estuarinos así como las especies *Daphnia magna* y *Vibrio fischeri* en los cuerpos acuáticos de agua dulce.

Se identificaron dos zonas claramente definidas de acuerdo al análisis de HAT, MOE así como de los metales; el área del puerto y antepuerto con concentraciones de hidrocarburos que superaron los valores para sedimentos no contaminados de la UNESCO, así como el límite de calidad inferior que asegura la ausencia de efectos sobre la biota de acuerdo a las guías de calidad de sedimentos (Long et al., 1995; Long y MacDonald, 1998). Por otra parte, el cadmio superó el criterio de ERL (nivel de efectos de rango bajo) y obtuvo de acuerdo al índice de geo-acumulación la clasificación de moderadamente a fuertemente contaminado en cinco sitios del área estudiada y en seis estaciones del litoral. Los metales plomo, zinc y cadmio presentaron en cinco estaciones del litoral y en el área del Puerto-Antepuerto un factor de enriquecimiento superior a la unidad; esto indica un aporte antropogénico de estos metales en esos sitios.

Los resultados de los bioensayos con *Artemia franciscana* y *Artemia* sp. indicaron que los elutriados de los sedimentos del Puerto-Antepuerto fueron más tóxicos que los del Estero La Ventosa y zona costera. Los ensayos con *Microtox* (*V. fischeri*) no mostraron una respuesta con la fase sólida de los sedimentos, solamente se observó un efecto tóxico bajo del elutriado a los 15-min. Los bioensayos con el elutriado utilizando a las especies *A. franciscana* y *Artemia* sp. (Oaxaca) fueron más sensibles para responder a la toxicidad de los sedimentos. La toxicidad más alta se presentó en dos estaciones del Puerto-Antepuerto y la estación 1 en el Estero La Ventosa para la especie *Artemia* sp. (Oaxaca), por lo que esta especie fue más sensible que *A. franciscana*; en estos sitios se evidencia un impacto de descargas industriales y domésticas.

Los bioensayos utilizando la especie *Daphnia magna* sobre los elutriados de los sedimentos de sitios con sedimentos de cuerpos receptores de agua dulce: Arroyo Zanjón, presa “Benito Juárez” y Río Tehuantepec mostraron una respuesta toxicológica en todos los casos, por lo que no hubo diferencias estadísticamente significativas entre las respuestas de esta especie entre los tres sitios.

Al comparar los resultados obtenidos entre las diferentes especies, se encontró que existe una alta sensibilidad de *Vibrio fischeri* en relación a la respuesta de *Daphnia magna* a los extractos acuosos de sedimentos en tres de los cuatro sitios evaluados (Arroyo Zanjón, presa “Benito Juárez” y Río Tehuantepec), observándose correlaciones significativas entre la toxicidad evaluada y las concentraciones de los contaminantes. En el cuerpo acuático estuarino, se observó un comportamiento inverso en las estaciones menos salinas (sensibilidad mayor para *D. magna*) y en los sitios más salinos, *V. fischeri* resultó ser más sensible que *Artemia franciscana*. En los seis sitios estudiados la problemática ambiental se ha asociado principalmente a actividades industriales y municipales; derrames esporádicos de residuos procedentes de las operaciones de la refinera y de la terminal marítima; vertimiento inadecuado de las aguas residuales municipales. Este estudio permitió reiterar la importancia que tienen los bioensayos de toxicidad para identificar las causas de la contaminación del sedimento en evaluaciones ambientales, particularmente relacionadas con la industria petrolera.

Los resultados aquí presentados constituyen el primer antecedente para el área de estudio acerca de la evaluación ecotoxicológica de la Fase de Partículas Suspendidas (FPS) de los sedimentos a través de una batería de bioensayos.



Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez
Directora

Palabras clave: toxicidad, metales pesados e hidrocarburos, bioensayos, sedimentos, Salina Cruz, Oaxaca.

ABSTRACT

In order to know the toxicity of recent sediments: forty three surface sediment samples of six sites of littoral zone, port-harbor, Zanjón stream, La Ventosa estuary, “Benito Juárez” dam and the Tehuantepec river during June 2002 in the coastal region of Salina Cruz, Oaxaca, México, a major center of oil and refined products distribution of the Mexican Pacific coast, in order to characterize the main pollutant substances indicating oil related activities, such as total aromatic hydrocarbons (TAH), extractable organic matter (EOM), heavy metals (As, Cd, Cu, Cr, Ni, Hg, Pb, V y Zn) and granulometric characteristics. Toxicity was evaluated in aqueous extracts using: *Vibrio fisheri*, two species from *Artemia*, *franciscana* y *Artemia* sp. (Oaxaca) and *Mysidopsis bahia* continental water bodies.

Two defined zones were identified clearly according to TAH, EOM and metals; the port-harbor and outer port area exceeded TAH values for non contaminated sediments from UNESCO and the lower quality limit that assures no effects on the biota according to sediments quality guidelines (Long et al., 1995; Long y MacDonald, 1998). On the other hand, the cadmium exceeded the values of ERL (effects range low) associated with adverse biological effects and their geoaccumulation index corresponds from moderate to strong contamination in five sites in the study area and six sites from littoral. The metals lead, zinc and cadmium obtained for five sites from littoral and port-harbor an enrichment factor superior than unity, suggesting that these elements are anthropogenic origin.

The results of the bioassay tests with *Artemia franciscana* y *Artemia* sp. indicated that elutriates of sediments collected from port and harbor were more toxic than those from the Ventosa estuary and coastal zone. Microtox test (*V. fisheri*) did not show a similar response with the solid phase of the sediments, only a low toxic effect was observed with elutriates during 15-min. Elutriate bioassays using *A. franciscana* and *Artemia* sp. (Oaxaca) were sensitive enough to differentiate the toxicity among these sediments. The toxicity was higher in station PH-1 for *Artemia* sp. (Oaxaca), which has a profound and direct impact on the port and harbor for the station Ventosa Estuary-1 where the industrial and domestic activities are concentrated, and indicates a higher toxicity for the same species.

The bioassay tests with *Daphnia magna* in elutriates of sediments collected from continental bodies: Zanjón stream, “Benito Juárez” dam and Tehuantepec river showed a toxicological response in all the cases, therefore were no significant differences statistically between these species and the three sites.

Results showed a higher sensitivity for *Vibrio fisheri* than for *Daphnia magna* for aqueous sediment extracts in three of the four tested sites (Zanjón stream, “Benito Juárez” dam and Tehuantepec River), with significant correlations between toxicity and contaminant concentrations. In the estuary an inverse relationship was observed at the less saline stations (a higher sensitivity for *D. magna*) while in the more saline sites *V.*

fischeri was more sensitive than *Artemia franciscana*. Environmental problems have been associated to industrial and municipal activities in the four sites including sporadic spills from the refinery and marine terminal and inadequate discharge of municipal waters. This study reinforces the importance of toxicity bioassays for identifying contamination causes in environmental evaluations, in particular with those related to the oil industry.

The results showed here constitute the first background for the study area about the ecotoxicological assessment from suspended particulate phase (SPP) of sediments through a test battery.

Keywords: toxicity, heavy metals and hydrocarbons, bioassays, sediments, Salina Cruz, Oaxaca.

DEDICATORIA

A la memoria de mi Padre

A mi mamá, hermanos

Con todo mi cariño a José Luis y Oscar

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento al CIBNOR y al IMP por la colaboración a través del convenio IMP-3474 para llevar a cabo un programa de formación a nivel doctoral para el personal del IMP.

A los miembros del comité tutorial por sus observaciones al manuscrito así como sus aportaciones.

El agradecimiento especial a la Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez, quien con su paciencia y dedicación dio seguimiento a este trabajo, por sus acertadas observaciones y comentarios así como por su gran apoyo.

Al Dr. Alfonso Vázquez Botello por ser parte de mi comité así como el apoyo y asesoría brindados y por su confianza.

A los Dres. Alejandro Maeda y Gopal Murugan por sus comentarios y asesoría en la elaboración del artículo así como por su apoyo en la donación de las cepas de *Artemia*.

Al Dr. Diego López Veneroni por sus detalladas observaciones que fueron de gran ayuda para la conclusión del documento final.

A todos mis compañeros del IMP que me ayudaron de alguna u otra forma en la realización de este documento.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Marco de referencia	1
1.2 Actividades de dragado	2
1.3 Contaminantes en sedimentos	3
1.4 Importancia del análisis de la toxicidad	5
1.5 Importancia económica del área de estudio	9
1.6 Antecedentes	10
1.7 Generalidades del área de estudio	13
1.8 Objetivos	18
1.9 Metas	19
1.10 Justificación	19
2. MATERIAL Y MÉTODOS	20
2.1 Muestreo	20
2.2 Trabajo de Laboratorio	21
2.3 Hidrocarburos aromáticos totales y material orgánico extraíble.	21
2.4 Metales	21
2.5 Análisis de granulometría y materia orgánica	21
2.6 Evaluación de la toxicidad	22
3. RESULTADOS	37
3.1 Granulometría y materia orgánica	37
3.2 Contaminantes	46
3.2.1 Hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble	46
3.2.2 Metales	51
3.3 Evaluación de la toxicidad	87
3.3.1 Bioensayos con <i>Vibrio fischeri</i> (Microtox; <i>Photobacterium phosphoreum</i>) ..	87
3.3.3 Bioensayos con nauplios de <i>Artemia franciscana</i> y <i>Artemia</i> sp.	93
3.3.4 Bioensayos con neonatos de <i>Daphnia magna</i>	98
4. DISCUSIÓN	114
5. CONCLUSIONES	124
5.1 RECOMENDACIONES	126
6. LITERATURA CITADA	127
7. ANEXOS	140
Anexo 1	140
Anexo 2	150
Anexo 3	162

Figura 1 Áreas de muestreo en Salina Cruz, Oaxaca.....	17
Figura 2 Clasificación textural (arenas, limos y arcillas) de los sedimentos superficiales de la zona litoral de la región de Salina Cruz, Oax., durante mayo-junio y agosto-septiembre de 2002.	39
Figura 3 Clasificación textural (arenas, limos y arcillas) de los sedimentos superficiales del puerto y antepuerto de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).....	40
Figura 4 Clasificación textural de los sedimentos superficiales del Arroyo Zanjón de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).	41
Figura 5 Clasificación textural de los sedimentos superficiales del Estero Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).	42
Figura 6 Clasificación textural de los sedimentos superficiales de la presa “Benito Juárez” de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).....	43
Figura 7 Clasificación textural de los sedimentos superficiales del Río Tehuantepec de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).	44
Figura 8 Porcentaje de sedimentos finos de las zonas de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).....	45
Figura 9 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos de los hidrocarburos aromáticos totales en sedimento de los sistemas estudiados en Salina Cruz, Oax (junio 2002)	48
Figura 10 Distribución de los hidrocarburos aromáticos totales en sedimento del litoral de Salina Cruz, Oax. Concentraciones en mg/kg.....	48
Figura 11 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del MOE en sedimento de los sistemas estudiados en Salina Cruz, Oax (junio 2002).	49
Figura 12 Distribución del material orgánico extraíble en sedimento del litoral de.....	49
Figura 13 Distribución los hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	50
Figura 14 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del arsénico en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	52
Figura 15 Distribución de las concentraciones del arsénico por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.....	53
Figura 16 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del cadmio en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	54
Figura 17 Distribución de las concentraciones del cadmio por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.....	55
Figura 18 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del cobre en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	57
Figura 19 Distribución de las concentraciones del cobre por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.....	58

Figura 20 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del níquel en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	59
Figura 21 Distribución de las concentraciones del níquel por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	60
Figura 22 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del vanadio en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	62
Figura 23 Distribución de las concentraciones del vanadio por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	63
Figura 24 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del cromo en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	64
Figura 25 Distribución de las concentraciones del cromo por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	65
Figura 26 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del mercurio en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	66
Figura 27 Distribución de las concentraciones del mercurio por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	67
Figura 28 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del plomo en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	69
Figura 29 Distribución de las concentraciones del plomo por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	70
Figura 30 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del zinc en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	71
Figura 31 Distribución de las concentraciones del zinc por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	72
Figura 32 Índice de Geoacumulación del cadmio en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.	77
Figura 33 Promedio del Porcentaje de Efecto en sedimentos del Puerto-Antepuerto y litoral de la región de Salina Cruz, Oax.	88
Figura 34 . Promedio del Porcentaje de Efecto de sedimentos del Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax.	89
Figura 35 Promedio del Porcentaje de Efecto de sedimentos de la Presa Benito Juárez y Río Tehuantepec de la región de Salina Cruz, Oax.	90
Figura 36 Porcentaje de mortalidad de <i>M. bahia</i> en el litoral de Salina Cruz, Oax.	91
Figura 37 Porcentaje de mortalidad de <i>M. bahia</i> en el Puerto-Antepuerto y Estero La Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax.	92
Figura 38 Porcentaje de mortalidad de <i>A. franciscana</i> y <i>Artemia</i> sp., en el Puerto-Antepuerto de la región de Salina Cruz, Oax.	94
Figura 39 Porcentaje de mortalidad de <i>A. franciscana</i> y <i>Artemia</i> sp., en el litoral de la región de Salina Cruz, Oax.	95

Figura 40 Porcentaje de mortalidad de <i>A. franciscana</i> y <i>Artemia</i> sp., en el Estero La Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax.	96
Figura 41 Porcentaje de mortalidad de <i>Daphnia magna</i> en el Arroyo Zanjón y Presa Benito Juárez de la región de Salina Cruz, Oax.	100
Figura 42 Porcentaje de mortalidad de <i>Daphnia magna</i> en el Río Tehuantepec de la región de Salina Cruz, Oax.	101
Figura 43 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre <i>Vibrio fischrei</i> y <i>Daphnia magna</i> en el Arroyo Zanjón en la región de Salina Cruz, Oax.	104
Figura 44 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre <i>Vibrio fischeri</i> , <i>Artemia franciscana</i> y <i>Daphnia magna</i> en el Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.	104
Figura 45 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre <i>Vibrio fischeri</i> y <i>Daphnia magna</i> en la presa “Benito Juárez” en la región de Salina Cruz, Oax. ...	105
Figura 46 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre <i>Vibrio fischeri</i> y <i>Daphnia magna</i> en el Río Tehuantepec en la región de Salina Cruz, Oax.	105
Figura 47 Análisis de cúmulos en el área del litoral e incluyendo el Puerto-Antepuerto en la región de Salina Cruz, Oax.	108
Figura 48 Resultados de los grupos formados de acuerdo al análisis de cúmulos en la región de Salina Cruz, Oax.	109
Figura 49 Análisis de cúmulos en el área del Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.	110
Figura 50 Resultados de los grupos formados de acuerdo al análisis de cúmulos en el Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.	111
Figura 51 Análisis de cúmulos en el área del Río Tehuantepec y Presa “Benito Juárez”	112
Figura 52 Resultados de los grupos formados de acuerdo al análisis de cúmulos en el Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.	113

Tabla I Sitios de muestreo, número de estaciones y características para cada cuerpo acuático receptor del área de Salina Cruz, Oax.....	15
Tabla II Condiciones de cultivo de <i>Mysidopsis bahia</i> (tomado de Weber, 1993)	25
Tabla III Condiciones para la prueba de toxicidad aguda.....	27
Tabla IV Condiciones para la prueba con el tóxico de referencia con la especie <i>Artemia</i>	30
Tabla V Condiciones para el mantenimiento de <i>Daphnia magna</i>	31
Tabla VI Condiciones para la prueba de evaluación de la sensibilidad de <i>Daphnia magna</i>	33
Tabla VII Condiciones para la prueba definitiva con <i>Daphnia magna</i>	34
Tabla VIII Intervalos de la clasificación del Índice de Geoacumulación (Müller, 1979).	35
Tabla IX Resumen Estadístico de hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble en sedimentos superficiales de Salina Cruz, Oax.	47
Tabla X Índice de geoacumulación calculada de acuerdo a la ecuación (1).....	75
Tabla XI Índice de Geoacumulación para cada metal en sedimentos superficiales del litoral y Puerto Antepuerto de Salina Cruz, Oax.	75
Tabla XII Índice de Geoacumulación para cada metal sedimentos superficiales en el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa en Salina Cruz, Oax	76
Tabla XIII Índice de Geoacumulación para cada metal en sedimentos superficiales.....	76
Tabla XIV Criterios de efecto de rango bajo (ERL) y efecto de rango medio (ERM) para metales en sedimentos (Long <i>et al.</i> , 1995).....	79
Tabla XV Metales que superaron los criterios ERL y ERM en el litoral y Puerto-Antepuerto de Salina Cruz, Oax.	79
Tabla XVI Metales que superaron los criterios ERL y ERM en el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa de Salina Cruz, Oax.....	80
Tabla XVII Metales que superaron los criterios ERL y ERM en la Presa “Benito Juárez” y el Río Tehuantepec en Salina Cruz, Oax.	80
Tabla XVIII Criterios de TEL y PEL (Long y MacDonald, 1998 y Smith <i>et al.</i> , 1966).82	
Tabla XIX Metales que superaron los criterios TEL y PEL en el litoral y Puerto Antepuerto de Salina Cruz, Oax.	82
Tabla XX Metales que superaron los criterios TEL y PEL en el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa en Salina Cruz, Oax.....	83
Tabla XXI Metales que superaron los criterios TEL y PEL en la Presa y el Río Tehuantepec en Salina Cruz, Oax.....	83
Tabla XXII Correlaciones significativas de los parámetros evaluados en los sedimentos superficiales en los diferentes sitios de Salina Cruz, Oax. ($P<0.01$).	86
Tabla XXIII Valores de CL ₅₀ (obtenidos por el método Probit) con <i>Artemia franciscana</i>	97
Tabla XXIV Valores de CL ₅₀ (obtenidos por el método Probit) con <i>Artemia sp.</i> (Oaxaca).....	97
Tabla XXV Valores de CL ₅₀ (obtenidos por el método Probit) con <i>Daphnia magna</i> . (Arroyo Zanjón).	102

Tabla XXVI Valores de CL ₅₀ (obtenidos por el método Probit) con <i>Daphnia magna</i> . (Presa Benito Juárez).	102
Tabla XXVII Valores de CL ₅₀ (obtenidos por el método Probit) con <i>Daphnia magna</i> . (Río Tehuantepec).....	102
Tabla XXVIII Correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0.01$) entre contaminantes orgánicos, metales, materia orgánica y la toxicidad de <i>V. fischeri</i> , <i>Artemia franciscana</i> y <i>Artemia</i> sp. (Oaxaca), en el Litoral y Puerto-Antepuerto. 106	106
Tabla XXIX Correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0.01$) entre contaminantes orgánicos, metales, materia orgánica y la toxicidad de <i>V. fischeri</i> y <i>D. magna</i>	106

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Marco de referencia

El presente estudio aborda la problemática de la contaminación de los sedimentos en el área de Salina Cruz, Oaxaca como un sitio influenciado por actividades petroleras por la presencia de la refinería Dovalí Jaime y la Terminal Marítima, de PEMEX-Refinación.

Actualmente, el puerto de Salina Cruz presenta una localización geográfica única y estratégica sobre el resto de las instalaciones portuarias en las costas del Pacífico mexicano; ofrece una salida segura y oportuna a los productos petroquímicos y refinados de la refinería Antonio Dovalí Jaime, que cuenta también con una infraestructura completa para proporcionar mayor eficiencia en el almacenamiento de estos productos, capaz de solventar las demandas nacionales y de exportación, con lo cual se reducen considerablemente los costos en transporte y suministro.

Al norte del Estero La Ventosa, se instaló en 1979 la refinería “Antonio Dovalí Jaime” de Petróleos Mexicanos (Rivière D’Arc y Prévot-Schapira, 1984) que se comunica al arroyo El Zanjón. Los ductos de la planta de tratamiento de aguas residuales de esta refinería desembocan en la bahía La Ventosa (Rivero-Beltrán y Benítez-Torres 1988), que forma parte del Golfo de Tehuantepec que es una de las áreas más productivas del Pacífico mexicano (Méndez-González, 1988; Toledo, 1994-1995; Tapia-García, 1997). A partir de 1975, esta obra originó importantes movimientos migratorios en el istmo, acentuándose en el campo y en las ciudades aledañas a Salina Cruz, en un radio de 150 Km. (Rivière D’Arc y Prévot-Schapira, 1984).

En términos generales, las actividades de construcción y operación de la refinería tienen un impacto positivo en la región, debido a que incrementan las fuentes de trabajo y propician el aumento de los asentamientos humanos. También el proceso de desarrollo de los rompeolas representa un sustrato para diversos crustáceos, moluscos y algas que propiciará el incremento de la actividad productiva primaria en la pesca. Aunque a la vez se indica un impacto negativo, ya que la operación y el manejo de productos dentro de

cualquier industria implican riesgos como son las fugas y derrames accidentales en la conducción, carga y distribución de sus productos.

Salina Cruz se cataloga entre las ciudades con más de 50,000 habitantes, mientras que Tehuantepec se ubica entre las de más de 15,000 habitantes. En cuanto a áreas turísticas se cuenta con el puerto y la playa. En la producción agrícola en la región del istmo abundan el arroz, sorgo, mango, copra, cacahuete, maíz, ajonjolí y caña de azúcar (Gobierno del Estado de Oaxaca, 1980).

Por otra parte, el área correspondiente a la Terminal Marítima de Salina Cruz es un sitio con una gran actividad portuaria, siendo una ruta de navegación constante para el transporte de productos petrolíferos importantes en el país. Por lo tanto la profundidad del canal de navegación debe de estar en condiciones aceptables para el constante paso de buques-tanque. Debido a esto, la acumulación de sedimento por las condiciones climáticas que prevalecen en la región impiden las operaciones normales del sitio, de ahí que se de la necesidad de llevar a cabo dragados de mantenimiento cada tres o cinco años, dependiendo de la intensidad de acumulación sedimentaria (IMP, 1998).

1.2 Actividades de dragado

Las operaciones de dragado se llevan a cabo con el propósito de crear y mantener canales, rutas de navegación, cuencas de viraje, atracaderos y marinas. Estas actividades, si bien son necesarias, pueden provocar diversos efectos en el ambiente, modificando los patrones locales de circulación y transporte así como cambios en las condiciones ambientales del agua y sedimentos. Estos efectos pueden ser temporales o definitivos dependiendo de la intensidad de las acciones realizadas. Los trabajos de dragado persiguen como finalidad principal mantener e incrementar las profundidades en las aguas navegables y de ser posible, en forma simultánea, utilizar el material extraído para beneficiar las zonas aledañas a las áreas dragadas aumentando los niveles topográficos

En gran parte de la línea costera en lugares de alta densidad de población, el sedimento dragado se ve contaminado con materiales orgánicos provenientes de desechos domésticos e industriales no imputables a los usuarios del puerto, debido a que se

permiten descargas directas a ríos o al mar. Esto se podría evitar atacando los problemas de origen, mediante plantas de tratamiento de aguas residuales, así como la prohibición de uso de pesticidas y fertilizantes que utilizan compuestos no biodegradables (SEDESOL, 1993).

Para continuar con estas actividades es importante implementar medidas de mitigación tales como una adecuada programación y procedimiento de dragado, así como la definición de sitios de tiro que permitan la inmovilización de los sedimentos evitando que estén disponibles al ambiente. Estas acciones permitirán en lo posible continuar con los dragados sin menoscabo de las características particulares de los ecosistemas y el uso que históricamente se ha dado a los mismos.

Los esfuerzos de protección ambiental en muchas jurisdicciones reconocen ahora a los sedimentos como una porción crítica del ecosistema acuático y requieren de su evaluación en las actividades de dragado así como para su potencial de remediación (Beg *et al.* 2001).

Se han realizado diversos estudios base para contar con un marco de referencia ambiental en las Terminales Marítimas de Pajaritos, Ver., Cd. Madero, Tamps., así como en las Terminales de Guaymas, Son. y Lerma, Camp., llevando a cabo estudios ambientales antes, durante y después de las actividades de dragado (IMP, 1997a; IMP, 1997b; IMP, 1998a; IMP, 1998b; IMP, 1998c).

1.3 Contaminantes en sedimentos

La presencia de sedimentos contaminados en ambientes acuáticos, ya sea en cuerpos de agua continental o marinas, es un hecho que ha sido constatado a nivel mundial sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XX (Landaeta, 1995). La existencia de éstos es debida tanto a los vertidos incontrolados desde industrias como a la utilización de productos químicos tales como los pesticidas que van a incorporarse a los sedimentos una vez que son transportados desde zonas agrícola por las aguas. En otros casos, éstos son debidos a los vertidos “controlados” tales como emisores submarinos que vierten aguas residuales principalmente domésticas aunque, en aquellas zonas donde no exista

separación de tratamiento y “conducción”, en estas instalaciones se mezclan las aguas residuales industriales con las domésticas aumentando la carga contaminante y el nivel de toxicidad.

Aunque parte de los principales focos de contaminación han ido reduciéndose a medida que ha aumentado el control sobre las fuentes contaminantes y se han mejorado los niveles de tratamiento de las aguas, los sedimentos que se encuentran en los ambientes que han recibido estas descargas siguen estando contaminados (Landaeta, 1995). En esta característica de acumuladores de contaminantes aún después de haber cesado el foco de contaminación, el principal problema identificado es que pueden ir liberándolos al medio mediante diferentes procesos durante mucho tiempo, como pueden ser los PCBs y DDT a la vez que se controlan los focos de estos contaminantes. Sin embargo, los niveles de estos dos compuestos encontrados en los tejidos de peces, siguieron aumentando durante los años 80 en la zona de los Grandes Lagos de Estados Unidos, desde que se detuvo el uso de dichos compuestos. Este hecho llevó a hipotetizar que la principal fuente de contaminación pasaba a ser parte de los sedimentos, de tal forma que, las sustancias tóxicas atrapadas en éstos, seguían afectando a los ecosistemas y, eventualmente, a los humanos (Jiménez, 2001).

Los procesos por los que la carga contaminante de estos sedimentos puede transmitirse a los organismos vivos son conocidos como bioconcentración y bioacumulación y, como resultado de ambos, la biomagnificación a través de la propagación de los contaminantes en la cadena trófica. Este efecto de biomagnificación es el que la concentración de un determinado contaminante va aumentando a medida que se incrementa el eslabón en la cadena trófica es especialmente importante a la hora de determinar la calidad del sedimento ya que concentraciones de un determinado elemento aparentemente bajas y sin efecto tóxico en el sedimento pueden tener efectos adversos en los niveles altos de la cadena trófica (USEPA, 2000).

Algunos contaminantes aparentemente no tienen efecto directo sobre los organismos vivos, pero alteran las características físicas y químicas del medio donde viven, por lo tanto afectan la habilidad de las especies para sobrevivir. Otros tipos de contaminantes

producen cambios directamente sobre los organismos, dependiendo dichos cambios del tiempo de exposición, tipo de tóxico y del organismo en cuestión (Moriarty, 1990).

La contaminación producida por metales es muy importante. Éstos se pueden clasificar según su concentración en la biosfera en: metales abundantes como son: sodio, potasio, magnesio y calcio; y metales no abundantes como son: bario, vanadio, cobre, plomo, estaño, plata, oro, níquel y mercurio. No todos los metales representan riesgo para el ambiente; ya que algunos no son tóxicos, mientras que otros, aun cuando lo sean, son muy escasos o sus compuestos son muy insolubles. En términos de contaminación ambiental, los metales traza generalmente son más importantes que los metales abundantes, ya que los seres vivos han desarrollado sistemas para enfrentarse a los metales abundantes y de hecho algunos de ellos son vitales para los organismos (Baudo *et al.*, 1990).

1.4 Importancia del análisis de la toxicidad

El aporte continuo o intermitente de los contaminantes derivados de la industria petrolera hacia los cuerpos de agua, ya sea por derrames accidentales o descargas intencionales, puede afectar a la flora y fauna nativa, y poner en riesgo el equilibrio ecológico de tales sistemas. De manera tradicional, las investigaciones y evaluaciones del daño ecológico en los sistemas acuáticos y de la calidad ambiental de los mismos se ha realizado con la medición física, química y de contaminantes presentes en ellos, los cuales no proveen de la información suficiente sobre el efecto de productos tóxicos y/o mezclas de estos sobre las comunidades biológicas de un medio acuático. Por lo tanto, es importante incorporar estudios empleando indicadores biológicos, ya que los organismos reflejan las condiciones en las que pueden sobrevivir y desarrollar adecuadamente sus funciones, mediante respuestas bioquímicas, fisiológicas, morfológicas y etológicas entre otras (Sheenan *et al.*, 1984), siendo estas respuestas más reveladoras de los efectos tóxicos que un análisis químico separado (Gutiérrez *et al.*, 1990).

En México, la evaluación toxicológica de los efectos inducidos por las actividades petroleras sobre el ambiente ha sido pobremente realizada, a pesar de existir un extenso conocimiento sobre los niveles de contaminantes relacionados con la industria petrolera

en sus fuentes y en agua y sedimentos de diversos sistemas acuáticos afectados por las actividades de este giro. En diversos estudios ambientales ha quedado manifestada la escasez de información de base sobre la toxicidad de las emisiones petroleras y sus efectos adversos en los sistemas receptores y como consecuencia la necesidad de generar tal información para los ambientes costeros y marinos tropicales característicos del país (Vázquez-Botello *et al.*, 1992).

Para la industria del petróleo, es importante contar con una herramienta como la ecotoxicología (ésta, es la rama de la Toxicología concerniente al estudio de los efectos de los agentes tóxicos, causados por contaminantes naturales o sintéticos a los constituyentes del ecosistema, en un contexto integral. (Truhaut, 1977). Según Hoffman *et al.*(1995) es la ciencia que predice los efectos tóxicos potenciales de los agentes en el ecosistema natural y en especies que no son normalmente blanco de dichos tóxicos), que provea de información esencial sobre los cambios en la estructura y función de los ecosistemas causados por los contaminantes que genera, comparar su toxicidad y efectos biológicos y si es posible, realizar predicciones sobre efectos ambientales de sus residuos, así como la medición de riesgos que le permitan tomar acciones para la protección de los ambientes impactados y la regulación de sus emisiones (Buikema *et al.*, 1992). La ecotoxicología es la rama de la toxicología concerniente al estudio de los efectos de los agentes tóxicos, causados por contaminantes naturales o sintéticos a los constituyentes del ecosistema, en un contexto integral. (Truhaut, 1977). Según Hoffman *et al.* (1995) es la ciencia que predice los efectos tóxicos potenciales de los agentes en el ecosistema natural y en especies que no son normalmente blanco de dichos tóxicos.

Los bioensayos han presentado un desarrollo constante tanto en cantidad como en calidad desde 1970. Para finales de 1990, representan una herramienta ecotoxicológica de gran utilidad que permite diagnosticar en buena manera los problemas ambientales y que han sido generados por actividad antropogénica (Blaise, 1991).

Los bioensayos en laboratorio se realizan para determinar la toxicidad aguda de compuestos químicos sobre organismos acuáticos que se presentan en los diferentes niveles tróficos de la cadena alimenticia. Estas pruebas permiten tener una estimación de la toxicidad química en los ecosistemas naturales o en aquellos modificados por el

hombre. Para este tipo de pruebas se han utilizando diversos tipos de organismos como indicadores tales como bacterias, algas, zooplancton, invertebrados bénticos y peces (Couture *et al.*, 1989).

Existe también el empleo de bioensayos con bacterias que ofrecen una oportunidad para cubrir las necesidades metodológicas de pruebas de toxicidad rápidas (Brouwer *et al.*, 1990). Las razones para utilizar a las bacterias en pruebas de toxicidad pueden enmarcarse en los aspectos siguientes:

- a) Poseen esencialmente las mismas vías bioquímicas presentes en los macroorganismos.
- b) Presentan un grado significativo de organización en su membrana.
- c) Dan señal de alarma sobre el posible efecto nocivo en la totalidad de la cadena trófica y por ende del ecosistema.

Por otra parte, la utilización de invertebrados como los nemátodos de vida libre presentan características que los hacen excelentes organismos indicadores para la determinación de la presencia de contaminantes tóxicos en diversos ambientes (Burton *et al.*, 1996). Estos organismos se adaptan fácilmente al laboratorio y permiten resultados rápidos ya que tardan tres días en eclosionar, su ciclo de vida es corto y se puede obtener una respuesta de toxicidad aguda, y genotóxica crónica (inducida o sugerida), por lo tanto considerada como predictiva (Burton *et al.*, 1996).

El propósito de las pruebas de toxicidad es obtener información útil para lograr la protección de los organismos acuáticos de una especie determinada o de todas las comunidades que integran la biota de un ecosistema, de los peligros ocasionados por las sustancias peligrosas arrojadas al ambiente por el hombre. En el caso de los estudios de toxicidad aguda, la respuesta que se mide es la muerte de los individuos en estudio. La mayoría de los estudios de toxicidad aguda en organismos acuáticos reportan los resultados calculando la CL_{50} , que es la concentración que resulta letal para el 50% de los organismos expuestos durante un período especificado.

Con el fin de estimar el efecto de sustancias químicas combinadas contaminantes y no contaminantes dentro de los sistemas en evaluación, se realizaron pruebas de toxicidad

aguda en sedimentos, mediante bioensayos estandarizados en laboratorio y normalizados por la normatividad nacional en la materia.

Una de las categorías de la estimación del efecto tóxico de un xenobiótico, son las pruebas de toxicidad fisiológica las cuales son principalmente representadas por microorganismos como lo es el sistema Microtox[®], el cual está basado en la medición de la luz que emite naturalmente la bacteria *Vibrio fischeri*, como producto de su metabolismo, y que refleja la condición fisiológica de la misma. De esta manera, los resultados obtenidos en forma particular para cada sistema a través del uso de la bacteria bioluminiscente nos da una primera aproximación del efecto tóxico de la fase de partículas suspendidas. El sedimento es el sitio donde se presentan reacciones químicas como reducción de sulfatos, precipitación mineral y disolución, que puede cambiar las relaciones iónicas, la composición natural de los compuestos en el agua intersticial puede ser entonces diferente a las capas inmediatas superiores al sedimento. Por otro lado, el movimiento de compuestos adsorbidos en el material particulado ingresan al agua de poro y en consecuencia puede haber mayor concentración de compuestos en este líquido comparado con los presentes en la columna de agua (Rand, *et al.*, 1995).

Uso de nauplios de *Artemia* para estudios de toxicidad. Los nauplios de *Artemia* han sido objeto de estudio en pruebas de toxicidad desde 1956 en una amplia gama de compuestos químicos tales como: insecticidas, petroquímicos y aceites dispersantes, metales pesados, micotoxinas, microorganismos y metabolitos de hongos, así como productos carcinogénicos (Vanhaecke *et al.*, 1980). La investigación sobre toxicología con especies de *Artemia* comenzó a desarrollarse en 1975, en la Universidad de Ghent, Bélgica, siendo ésta dirigida a evaluar la utilidad y factibilidad de diferentes métodos publicados sobre pruebas de toxicidad con nauplios de *Artemia*. Vanhaecke *et al.* (1980) señalan algunas características que hacen de esta especie un candidato adecuado para uso en pruebas de toxicidad: es de amplia distribución, es una especie que se puede emplear para evaluar la toxicidad de una amplia gama de compuestos químicos, y se pueden realizar pruebas en cualquier lugar, en el momento deseado, sin necesidad de mantener lotes de organismos. El método para su eclosión es sencillo y no requiere de una infraestructura compleja. Los estadios tempranos de larvas de *Artemia* que pueden

sobrevivir por algunos días sin alimentación, son adecuados para pruebas de toxicidad aguda, y se puede conocer el linaje de los organismos de prueba.

La especie *Artemia franciscana* ha sido objeto de tomarla en consideración para la elaboración de una norma mexicana (NMX-AA-110-1995-SCFI), la que se utiliza como método de prueba para la evaluación de la calidad de agua. Esta norma puede aplicarse para determinar la toxicidad aguda de aguas residuales industriales, municipales y agrícolas, lixiviados, sustancias puras o combinadas y extractos acuosos con salinidades mayores a 10 g/L.

1.5 Importancia económica del área de estudio

Los estados de Oaxaca y Chiapas ocupan conjuntamente el cuarto lugar en la producción de camarón a escala nacional, la cual se sostiene principalmente por cuatro a cinco especies (destacando *Farfantepenaeus vannamei* y *F. californiensis*), que aportan alrededor del 33% del volumen de la producción pesquera total de ambos estados (Tapia-García y Gutiérrez-Díaz, 1998). La mayor producción de camarón en Chiapas se desarrolla en lagunas y estuarios (70%), y el volumen de captura ha sobrepasado en los últimos años la producción de Oaxaca; ésta última está constituida principalmente de camarón de altamar y, recientemente, se ha incrementado la producción de lagunas y estuarios. La producción total de camarón está disminuyendo, por lo que se han creado conflictos entre pescadores ribereños y de altamar. La mojarra es la segunda pesquería más importante en Oaxaca y Chiapas, con la mayor producción de origen dulceacuícola, -especies de la familia Cichlidae-; le siguen en orden de importancia la lisa y el tiburón. Otra pesquería importante en la región, y principalmente en Oaxaca, fue la tortuga, que alcanzó el primer lugar a escala nacional, hasta que se aplicó la veda total y permanente desde 1990. Otras pesquerías de menor desarrollo regional son el huachinango, robalo, barrilete, y pargo, entre otras. En la última década, la población dedicada a la pesca en la región ha crecido más del 100%; sin embargo, la producción no se ha visto incrementada en el mismo nivel, por lo tanto, se requieren iniciativas que protejan los recursos que muestran síntomas de agotamiento (Tapia-García y Gutiérrez-Díaz, 1998; Reyna-Cabrera y Ramos-Cruz, 1998). En el golfo de Tehuantepec, la fauna de acompañamiento

del camarón estuvo estructurada por más de 170 especies de peces durante 1996, de las cuales el 16% fueron muy abundantes, 24% abundantes y 60% escasas. Las capturas mostraron que el 13% de las especies tienen alta frecuencia, 14% frecuencia intermedia y 73% baja frecuencia. La producción de esta comunidad de peces indica que el 31% de las especies no son económicamente importantes, y el 69% restante son escasa o potencialmente utilizable (Tapia-García y Gutiérrez-Díaz, 1998).

1.6 Antecedentes

En diciembre de 1993 a raíz del primer estudio que se realizó sobre los efectos ambientales del dragado y zona de tiro de material para el mantenimiento de la dársena y canal de navegación de la Terminal Marítima de Pajaritos (IMP, 1994a; González-Macías, *et al.*, 1994), el Departamento de Estudios Ecológicos del IMP participó de manera conjunta con Pemex-Refinación en el seguimiento y definición ante Sedesol, (posteriormente SEMARNAP), de los lineamientos para los diagnósticos y evaluaciones ambientales relacionadas con estas actividades. Para esto, se realizaron estudios de creación de marcos de referencia ambientales para los dragados de mantenimiento en terminales marítimas de Pemex-Refinación y en los que se incluyeron las Terminales Marítimas de Pajaritos, Ver., y Ciudad Madero, Tamps.

Posteriormente, en julio de 1996, se reunieron la Gerencia de Pemex-Refinación, la dirección de Impacto Ambiental del INE y Estudios Ecológicos del IMP para reiniciar los estudios del efecto del dragado en Terminales Marítimas de Pemex-Refinación en las Terminales Marítimas de Lerma Camp., Guaymas, Son. y Salina Cruz, Oax. En 1997, el Subcomité de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental, dentro del Programa de Normas Oficiales Mexicanas, inició la elaboración de la norma “Condiciones y Requisitos de Protección Ambiental para llevar a cabo las Actividades de Dragado de Mantenimiento”. No obstante, dicha norma quedó inconclusa aun cuando se siguen realizando actividades de dragados.

En la década de los setenta, a raíz de la puesta en marcha de Pemex-Refinación en el puerto de Salina Cruz, Oax., grupos de investigación, centros de enseñanza y PEMEX

realizaron estudios de las condiciones naturales de la región creando así marcos de referencia para el diagnóstico ambiental del sistema (Secretaría de Marina, 1978).

A principios de los años setenta, una comisión científica encabezada por la Secretaría de Marina efectuó un estudio geográfico de la región de Salina Cruz, cuyos datos fueron publicados en 1974. La comisión encargó a la Universidad Autónoma de Baja California una evaluación de la situación ambiental del puerto que abarcó la dársena, el antepuerto y el mar abierto. Con este motivo se realizaron muestreos hidrográficos a fin de determinar parámetros fisicoquímicos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, pH y nutrientes), conteo de microorganismos y cuantificación de los niveles de metales pesados (Secretaría de Marina, 1978).

Gran parte de los trabajos encaminados a evaluar los efectos de la industria petrolera fueron encargados por esta paraestatal al Instituto Mexicano del Petróleo, y en 1995 solicitó a esta institución y a la UAM-I realizar un programa de estudios que actualizara e integrara la información generada por ambas sobre aspectos ambientales en Bahía La Ventosa, sitios que la industria considera prioritarios dentro de sus políticas y acciones ambientales en la región (IMP, 2000).

Posteriormente, entre 1996 y 1999, el IMP, junto con la Universidad Autónoma Metropolitana, llevaron a cabo una evaluación fisicoquímica y biológica del área de influencia costera de la ciudad de Salina Cruz, bahía La Ventosa, plataforma continental y las Lagunas Superior e Inferior así como una caracterización ambiental del Estero La Ventosa (IMP, 1996). La problemática sobre los reclamos locales en el área del Estero La Ventosa como resultado de un derrame de hidrocarburos ocurrido en ese sitio, hizo necesario la integración de un equipo de trabajo constituido por el Instituto Mexicano del Petróleo, la UAM-I y el Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP) de Salina Cruz, Oax.

Las actividades petroleras en la zona de Salina Cruz han producido desastres ecológicos de diversas magnitudes. Por ejemplo, en mayo de 1999 se presentó un derrame de aguas aceitosas en la Terminal Marítima de Salina Cruz que llegó al mar, y en agosto de 1999 un derrame durante la carga del buque tanque “Maya” vertió al mar 110 barriles de combustóleo (IMP, 1999a y b). El rompimiento de una toma clandestina en el poliducto

Minatitlán-Salina Cruz generó un derrame de petróleo que contaminó a la Laguna Superior (IMP, 2000). Estos accidentes han producido constantes reclamaciones de pescadores locales del área de Salina Cruz, por lo que PEMEX-Refinación y las autoridades ambientales (PROFEPA) han enfocado sus esfuerzos en materia ambiental para dar respuesta a estos incidentes.

Debido a que las investigaciones efectuadas en décadas anteriores en el golfo de Tehuantepec han sido aisladas y desarrolladas con distintas metodologías, estimando parámetros muy diversos y en diferentes sitios, la comparación espacio-temporal es difícil. Por lo tanto, PEMEX y el IMP decidieron desarrollar el proyecto "Estudio Ambiental Integral de la Región de Salina Cruz, Oax., México", cuyo objetivo principal era el definir la responsabilidad de las diferentes entidades en los efectos causados al ambiente por el uso de los recursos naturales de la región de Salina Cruz. El proyecto inició en mayo de 1997 y ha permitido apoyar en el análisis de resultados de contaminantes evaluados en los derrames ocurridos en la región; en dicho proyecto se definieron valores de fondo de las concentraciones de hidrocarburos aromáticos, material orgánico extraíble y metales pesados en agua y sedimento de las aguas marinas y costeras de la región de Salina Cruz, con información que se ha generado a lo largo de quince años de estudios (1982-1997).

Por otro lado, frente a Salina Cruz se analizaron muestras de agua, sedimentos y organismos (*Crassostrea iridescens* y *Penaeus stylirostris*) para determinar la presencia de hidrocarburos del petróleo, metales pesados (Pb, Ni, Cr, V) y bacterias coliformes con identificación de colonias de *Salmonella* sp. Los resultados del análisis de hidrocarburos mostraron elevadas concentraciones de compuestos poliaromáticos como pirenos, fluorantenos y benzo-pirenos. Las concentraciones de los metales pesados en la columna de agua fueron < 50 ppm, en los sedimentos < 100 ppb y en los organismos marinos de consumo humano, se ubicaron por debajo de los límites permisibles establecidos por la FAO (2.5 ppb). Los resultados microbiológicos reflejan una grave contaminación ocasionada por descargas de aguas residuales urbanas de alto riesgo para la salud pública, con conteos que exceden las normas sanitarias indicadas para aguas con contacto primario y de productos pesqueros. También se identificaron colonias

bacterianas de *Salmonella* sp, *S. typhi* y *S. paratyphi* que se consideran patógenas (Pica-Granados *et al.*, 1994 y Vázquez-Botello *et al.*, 1998). También se analizaron los hidrocarburos aromáticos policíclicos en sedimento del puerto y zona costera de Salina Cruz, encontrando niveles altos en la zona interior de la dársena cuyo principal causa son las descargas directas sin ningún tratamiento y por acción de las corrientes y mareas tienden a dispersarse mar adentro en donde los de peso molecular pasan a formar parte de los organismos que estén en íntimo contacto con los sedimentos, lo cual pone en riesgo los recursos pesqueros de la región (Vázquez-Botello *et al.*, 1998).

1.7 Generalidades del área de estudio

Una de las áreas geográficas de mayor relevancia para el estado oaxaqueño lo constituye sin duda alguna el istmo de Tehuantepec, tanto por su carácter sociocultural, como por su dinamismo económico y su sólida estructura urbana, sobre la que el país ha ensayado modalidades de desarrollo económico de interés nacional. Es una región estratégica para el comercio mundial. A principios de siglo XX se construyó el ferrocarril transístmico que permitió cierto auge. En 1975, la industria petroquímica en el puerto de Salina Cruz, trajo un repunte en el desarrollo socioeconómico, con la modernización del puerto y el establecimiento del poliducto transístmico, que une a la refinería de Salina Cruz con las zonas petrolíferas de la subregión veracruzana. Asimismo, este desarrollo atrajo a otras industrias hacia la zona costera (Ortiz-Wadgymar, 1971; González-Ramírez, 1973; Fuentes-Aguilar, 1983).

El puerto de Salina Cruz y bahías adyacentes se encuentran situadas en la parte norte del Golfo de Tehuantepec, en el Océano Pacífico, entre los 15°54'30" y 15°58'00" de latitud Norte y 95°17'00" y 94°23'45" de longitud Oeste, comprendidas entre punta Conejo y punta La Ventosa, que abarcan un área aproximada de 24 km², en donde se encuentran las siguientes bahías: Bahía La Ventosa: en esta bahía, situada al Noroeste del puerto, se realizan actividades recreativas y se desarrolla la pesca de tipo artesanal; en ella desemboca el Estero La Ventosa, el cual es somero e inundable durante la época de lluvias y durante el estiaje permanece aislado del mar debido al cúmulo de arena gruesa.

La Bahía de Salina Cruz, alberga al puerto de Salina Cruz y a su línea de costa desprotegida, conocida como “Playa Abierta”, se ha dividido en dos zonas: el antepuerto, que es el acceso formado por dos escolleras y la dársena o puerto, separada por un canal denominado entrepuerto, constituido por los muelles de cabotaje y petrolero, al este y oeste, respectivamente.

La Bahía de Salina Marqués se localiza al Suroeste del poblado de Salina Cruz, su importancia radica en que en ella se llevan a cabo actividades de carga de hidrocarburos a través de 3 monoboyas para el comercio nacional e internacional. En general las playas que se encuentran dentro del área son arenosas, delimitadas cada una por formaciones rocosas continentales, conocidas como punta Guelaguichi, Punta Conejo y Punta Ventosa (PEMEX, 1992).

Las corrientes las del Golfo de Tehuantepec son muy irregulares y fluctúan con los cambios de los vientos dominantes. En general, las direcciones en las que se desplazan están comprendidas entre el SE y el ESE en los meses de invierno y entre el NW y el WNW en el resto del año. La corriente parece tener una anchura de más de 673 Km., con una contracorriente paralela a la línea de costa. Durante los *nortes*, la corriente se establece hacia el N y E a lo largo de la línea de la costa en la parte occidental del golfo de Tehuantepec, y hacia el N y W junto a la línea de costa en la parte oriental. Algunas veces las corrientes se desplazan en dirección opuesta. La violencia del *norte* impulsa el agua superficial hacia el S y fuera del golfo, al disminuir el nivel de las aguas en la parte más interna de éste, se establecen *corrientes de relleno* a lo largo de ambas márgenes de la línea de costa hacia el N para restablecer el nivel (Secretaría de Marina, 1980).

Para efectuar la caracterización ambiental integral de la región de Salina Cruz, Oax., se seleccionaron cinco zonas: a) puerto y antepuerto de Salina Cruz, b) Arroyo Zanjón, c) Estero La Ventosa, d) litoral de Salina Cruz (La Ventosa, Guelaguichi y Chipehua), e) presa Benito Juárez y río Tehuantepec, en cada una de las cuales fue diseñada una red de muestreo que permitiera conocer y describir las condiciones ambientales de los sistemas. El número de estaciones en cada área y características se presenta en la Tabla I.

Tabla I Sitios de muestreo, número de estaciones y características para cada cuerpo acuático receptor del área de Salina Cruz, Oax.

Cuerpos Receptores	Número de estaciones	Características
1. Puerto y Antepuerto (PA)	3 puntos en el puerto 4 puntos en el antepuerto	En estos sitios se realizan diversas actividades de construcción, reparación y mantenimiento de embarcaciones, así como tareas de abastecimiento de combustible, hidrocarburos, productos refinados. Las estaciones de muestreo se determinaron de acuerdo a los sitios en donde se realizan las actividades de dragado de mantenimiento
2. Arroyo Zanjón (AZ)	6 puntos de muestreo	El Arroyo Zanjón se encuentra, casi en todo su recorrido, dentro del terreno de la refinería; en él se consideraron seis puntos para el muestreo, los cuales cruzan longitudinalmente el sistema; el primero y el último (1 y 6) por fuera de las instalaciones, en la cabecera del arroyo y en su conexión con el Estero La Ventosa (respectivamente); se situaron sucesivamente los otros cuatro dentro de la refinería para obtener información a lo largo de todo su curso.
3. Estero La Ventosa (EV)	5 puntos de muestreo	El Estero La Ventosa, también conocido localmente como laguna La Ventosa o Mayor, se localiza entre Salina Cruz (7 Km. al Sureste) y la refinería, tiene una longitud aproximada de 1.5 Km. y es perpendicular a la línea de costa. En sitio se han presentado derrames esporádicos de residuos procedentes de las operaciones de la refinería y de la terminal marítima; descargas inadecuadas de las aguas residuales municipales así como escorrentías que transportan sustancias derivadas de las actividades agropecuarias, industriales y domésticas. Tiene una comunicación intermitente con el océano Pacífico; durante el periodo lluvioso se abre la boca de comunicación, o cuando suceden cambios conspicuos de las mareas.

4. Litoral de Salina Cruz (LIT)	12 puntos en bahía La Ventosa 2 puntos en bahía Guelaguichi 2 puntos en bahía Chipehua	En la bahía La Ventosa, donde desemboca el Río Tehuantepec, la pendiente es suave, alcanzándose los 20 m de profundidad a 4 Km. de la costa. La influencia del material transportado por el río a esta bahía, se ve reducido por el hecho de que la circulación general es hacia el este. La refinería descarga sus efluentes tratados, por medio de un emisor, a lo largo de 2 Km., hacía el centro de la bahía La Ventosa en dirección sureste a una profundidad de 15 m sobre el lecho marino. Las estaciones se distribuyeron a lo largo de toda la zona litoral.
5. Presa Benito Juárez (PBJ)	4 puntos en la presa Benito Juárez	
6. Río Tehuantepec (RT)	5 puntos en el Río Tehuantepec	El nombre de Tehuantepec lo recibe a su salida de la presa Necaxa. Aguas abajo alimenta a la presa "Benito Juárez" y 20 Km. río abajo a la presa derivadora "Las Pilas", que a su vez alimenta al canal principal de riego de la región y a la planta de bombeo que suministra agua a la refinería "Antonio Dovalí Jaime". Actualmente existen problemas asociados a la actividad urbana, debido a que durante su trayecto el río pasa por los poblados de Tehuantepec y San Blas, donde es utilizado para descargas de aguas negras, tiraderos de basura a cielo abierto y otros desechos domésticos que probablemente producen daños ecológicos y a la salud humana, tomando en cuenta que el agua del río abastece a gran parte de los poblados de la región. A su paso, por el área cercana a Salina Cruz, el río pasa a unos dos Km. de la refinería para desembocar finalmente en la bahía La Ventosa.
Global	43 estaciones	

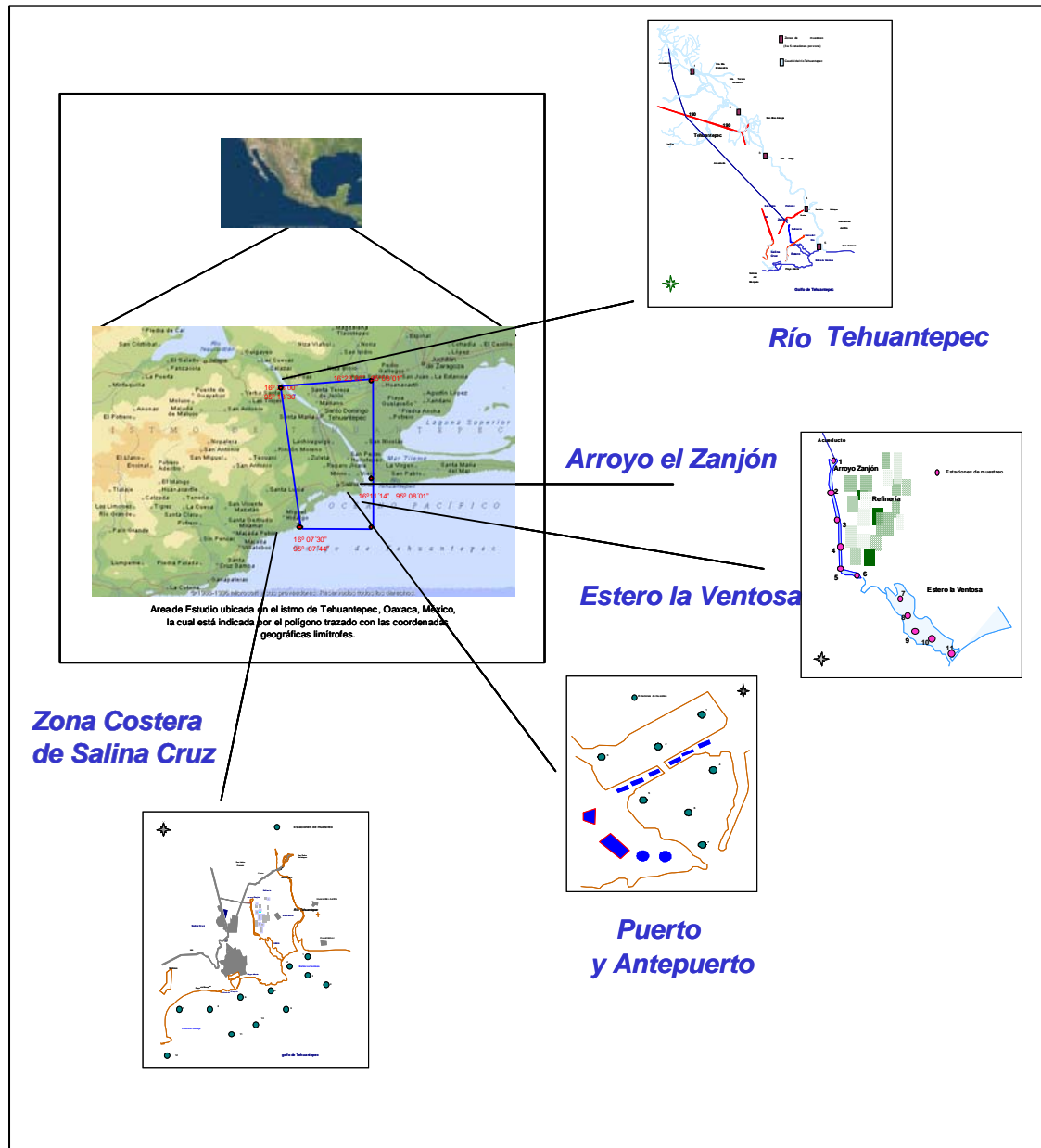


Figura 1 Áreas de muestreo en Salina Cruz, Oaxaca.

1.8 Objetivos

General

Valorar la toxicidad de sedimentos en cuerpos receptores influenciados por actividades de PEMEX-Refinación, en el área de Salina Cruz, Oax., utilizando diferentes especies de acuerdo al tipo de sedimento (marino, estuarino y de agua dulce) y hacer una comparación con otros sitios con características similares.

Particulares

- 1.- Analizar la información generada de toxicidad aguda en sedimentos de cuerpos receptores influenciados por las actividades de Pemex-Refinación, y actualización del área de Salina Cruz durante el 2002 a través de un modelo biológico en el que se incluyan organismos de la cadena trófica.
- 2.- Comparar los resultados entre cada una de la pruebas de toxicidad con *Photobacterium phosphoreum*, actualmente *Vibrio fischeri*: Microtox (NMX-AA-112-195-SCFI), (Brouwer *et al.*, 1990), *Artemia franciscana* (NMX-AA-110-1995-SCFI) y *Mysidopsis bahia* (Gaetz *et al.*, 1986 y USEPA, 1999) para sedimentos marinos y costeros, y con *Daphnia magna* (NMX-AA-087-1995-SCFI) en sedimentos dulceacuícolas y definir cuál de estos organismos es el más sensible para evaluar toxicidad en sedimentos en la fase de partículas suspendidas (FPS).
- 3.- Dar inicio a la generación de información base para proponer niveles de toxicidad en sedimentos que puedan normar la calidad de los mismos para las actividades de dragado.

1.9 Metas

1. Se generará información básica y sistemática sobre toxicidad en sedimentos de los sitios en donde hay influencia de actividades de Pemex-Refinación.
2. Se contará con información básica sobre la toxicidad en sedimentos de los sitios en donde hay influencia de actividades de petroleras, utilizando tres pruebas o bioensayos, en los que se incluyen organismos que desempeñan un papel importante en la cadena alimenticia, ya que sirven como consumidores secundarios como peces.
3. Se contará con la caracterización de los sedimentos tanto a nivel de contaminantes como del análisis granulométrico lo que permitirá correlacionar la presencia de éstos con los niveles de toxicidad.

1.10 Justificación

La legislación ambiental mexicana ha hecho especial énfasis en establecer normas que regulen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos como lo marca la NOM-001-ECOL-1996. Sin embargo, la calidad de los sedimentos no ha sido tomada en cuenta, ni existen niveles que marquen cuando un lecho de un río, estuario o zona costera es considerado contaminado.

El Instituto Nacional de Ecología (INE) desde 1993 inició los lineamientos para los diagnósticos y evaluaciones ambientales relacionadas con las actividades de dragado. Posteriormente, en 1997 se retomó este primer intento y se hizo un documento como anteproyecto de norma en el que participaron diferentes instituciones para la discusión y dar aportaciones para su publicación. Sin embargo, debido a que no se tenían integrados los argumentos técnicos para definir los parámetros y los niveles de contaminantes que permitieran la compatibilidad de estas actividades con el ambiente, las discusiones fueron suspendidas, quedando sin solución toda una serie de intenciones para normar sobre el ambiente sedimentario de los sistemas acuáticos.

Con base en lo anterior es urgente establecer niveles de toxicidad en sedimentos que permitan hacer comparaciones de los sitios con influencia industrial y en particular para este caso, de la industria petrolera, ya que solo se cuenta con valores de otros países y es necesario definir los niveles para las condiciones particulares de México.

El interés con respecto a los efectos tóxicos de las actividades de la industria petrolera en el ambiente marino y/o costero se enfoca en el potencial de daño de los niveles de contaminantes provenientes de derrames naturales o antropogénicos identificados en la zona, para determinar si el potencial de un efecto es real, de larga duración o significativamente dañino al humano y a la integridad del ecosistema.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Muestreo

Se colectaron un total de 43 muestras de sedimento superficial del área de Salina Cruz en dos campañas de muestreo. La primera campaña de muestreo se realizó entre el 27 de mayo y el 7 de junio de 2002, durante la época de transición estiaje-lluvias, y la segunda parte del muestreo del 29 de agosto al 9 de septiembre de 2002 como parte del “*Estudio de Seguimiento del Proyecto Ambiental Integral de la Región de Salina Cruz, Oaxaca, Fase 2002*”, respecto a campañas anteriores del Estudio Ambiental Integral de Salina Cruz realizadas desde 1982 en el IMP. Los sitios de muestreo fueron ubicados de acuerdo a las campañas previas, predeterminados de acuerdo a la ubicación geográfica determinada con un GPS Micrologic modelo Sportsman (Figura 1).

El muestreo de los sedimentos se efectuó mediante una draga Van-Veen con una capacidad mayor a 5 kilogramos; este tipo de draga es la adecuada para la profundidad a la que se muestreó, permitiendo el análisis del sedimento superficial (Gaughan, 1981). El sedimento fue colocado en diferentes recipientes: las de granulometría y de metales pesados se depositaron en frascos de plástico de 250 ml; las de toxicidad en recipientes de plástico de 60 ml, mientras que las muestras para la determinación de hidrocarburos y de material orgánico se colectaron en frascos de vidrio de 250 ml, utilizando una pala de madera en el llenado, para evitar interferencias, los frascos de vidrio fueron tratados

previamente con ácidos y solventes orgánicos. Las muestras se preservaron en refrigeración a 4 °C hasta su análisis.

2.2 Trabajo de Laboratorio

2.3 Hidrocarburos aromáticos totales y material orgánico extraíble.

En el laboratorio se realizó la extracción con cloroformo empleando un equipo Soxhlet durante 5 hrs.; el cloroformo se evaporó a sequedad y fue sustituido por tetracloruro de carbono para evaluar el material orgánico extraíble (MOE) (IMP, 1994b) y por hexano para los hidrocarburos aromáticos totales (HAT). Los hidrocarburos aromáticos se evaluaron por espectroscopía de fluorescencia en un equipo Perkin Elmer mod. MPF-44b (sensibilidad de 0.0001 ppm). El método se basa en las técnicas descritas por Guilbault (1973) y Lakowicz (1983), modificadas para usar como estándar, el crudo maya libre de asfaltenos, diluido en hexano (IMP-RP-QA-610) (IMP, 1994c).

2.4 Metales

Para los metales pesados se tomaron muestras de 200 g y se secaron a 105 °C, la extracción de los metales se realizó por digestión en plancha de dos o tres gramos de sedimento a 65 °C durante 48 hrs. Se empleó una mezcla tres a uno de ácido clorhídrico y ácido nítrico grado ultrex. Los residuos fueron tratados con ácido fluorhídrico para la extracción completa de los metales (modificación IMP-QA-032) (IMP, 1994b). La evaluación se realizó por espectrofotometría de absorción atómica de acuerdo a los métodos detallados para metales en sedimento (Perkin Elmer, 1976) (método EPA 3050A) con estándar utilizado PEPpure ASst. Los límites de detección para cada metal en mg/kg son como sigue:

Cd <0.05, Cr <5.0, Cu <1.0, Pb <2.0, V <1.0, Ni <1.0, Zn <0.5, Hg <0.02 y As <0.05.

2.5 Análisis de granulometría y materia orgánica

El análisis del tamaño de grano se realizó por el método de sedimentación para todas las fracciones de arena (Emery, 1938) y por el método de pipeta para las fracciones limo-

arcilla (Folk, 1974); el porcentaje de materia orgánica fue determinado usando peróxido de hidrógeno al 30 % y metafosfato de sodio como antifloculante.

2.6 Evaluación de la toxicidad

Bioensayos con *Vibrio fischeri* (Microtox; *Photobacterium phosphoreum*).

La prueba de Microtox[®], se basa en la medición de los cambios de luz que emite naturalmente una bacteria marina no patológica (*Vibrio fischeri*, NRRL B-11117), originalmente identificada como *Photobacterium phosphoreum*, y recientemente clasificada como una cepa de *V. fischeri* de acuerdo al Northern Regional Research Laboratory (Peoria, IL, Estados Unidos).

Cuando la bacteria luminiscente realiza sus funciones apropiadamente, produce luz como resultado de la respiración celular. Dicha emisión es catalizada por la enzima luciferasa oxidando el mononucleotido de flavina reducido (FMNH₂) y una cadena larga de aldehídos grasos por oxígeno molecular de acuerdo a la siguiente reacción de luminiscencia (Meigen, 1991):



Las células responsables de la expresión de la luciferasa bacteriana normalmente contienen suficientes FMNH₂ y oxígeno intracelulares para la bioluminiscencia. Estos parámetros también reflejan las condiciones de las células. Debido a que la bioluminiscencia se une directamente a la respiración celular, cualquier inhibición de la actividad de ésta como resultado de un efecto tóxico, produce un decremento de la tasa de respiración y en consecuencia un decremento en la emisión lumínica. Conforme la muestra es más tóxica, se incrementa el porcentaje de pérdida de luz de la suspensión bacteriana.

La expresión de la toxicidad de una muestra medida por las pruebas de toxicidad es la EC₅₀: Concentración efectiva de una muestra que causa el 50% de decremento de la luz emitida por el organismo de prueba bajo condiciones experimentales controladas (comúnmente a los 15 min. de exposición a 15°C). Adicionalmente, los resultados de prueba de Microtox, particularmente los de la prueba de screening (chequeo), pueden

expresarse cuantitativamente como porcentaje de efecto o cualitativamente como tóxico o no tóxico positivo o negativo y presencia o ausencia de toxicidad.

El ensayo Microtox es una prueba simple, rápida, reproducible, sensible, y práctica. Ha sido ampliamente utilizada desde hace 18 años como exploración de la toxicidad de químicos, efluentes, calidad del agua y contaminación de sedimentos, así como en las evaluaciones de riesgo ambiental. Específicamente se ha utilizado en monitoreo de la toxicidad y evaluación de efluentes de complejos industriales, aguas y lodos residuales, aguas de ríos y lagos, lavados proveniente de agricultura y agua de lluvia, lixiviados, y extractos acuosos de suelos y sedimentos, agua freática, fluidos y lodos de perforación, extractos químicos, químicos puros y en mezclas (Quereshi, 1998).

Ensayo de toxicidad aguda

Los ensayos de toxicidad aguda son estudios en los cuales se observan respuestas tóxicas de los organismos de prueba expuestos a una concentración generalmente alta durante un corto período de tiempo. Aunque en la literatura se utilizan EC_{50} (5) y EC_{50} (15), internacionalmente se encuentra normado para 15 min., aunque la NMX-AA-112-1995-SCFI considera el tiempo de 5 min. como estándar.

El objetivo de realizar este tipo de pruebas es definir la concentración a la cual el material de prueba o la muestra es capaz de producir efectos deletéreos sobre la población de organismos expuestos, predecir la toxicidad de mezclas químicas (mecanismos de interacción), evaluar el efecto de los factores que modifican la toxicidad de una muestra o compuesto (efectos de mitigación), definir las concentraciones de efectos no letales, monitorear los efectos sobre el comportamiento y determinar los niveles de prueba para ensayos crónicos o de bioconcentración

Para el análisis de la toxicidad, se realizó un bioensayo con la bacteria luminiscente *Photobacterium phosphoreum* (Microtox[®]. Corp., 1992) (Brouwer *et al.*, 1990), siguiendo el protocolo de la norma (NMX-AA-112-195-SCFI. 1985), para determinar el efecto tóxico agudo de las sustancias presentes en sedimentos. El bioensayo Microtox, consistió en la exposición directa de la bacteria al sedimento, buscando como respuesta

la alteración inmediata a nivel fisiológico, manifestada por una reducción en su bioluminiscencia.

Bioensayos con nauplios de *Mysidopsis bahia*.

Mysidopsis bahia es una especie utilizada extensivamente en bioensayos de toxicidad aguda y crónica ya que presenta elevada sensibilidad a contaminantes ambientales, es fácil de mantener en cultivo y su ciclo de vida es relativamente corto (Nimmo y Hamaker, 1982). Este misidáceo ha sido seleccionado por un gran número de investigadores por sus características antes mencionadas en comparación con otras especies marinas. La evaluación de la toxicidad de lodos de perforación o sus componentes se realiza principalmente con especies de ambientes marinos, siendo *Mysidopsis bahia* una de ellas. Esta especie ha sido muy estudiada en la parte noroeste del Golfo de México, en los Estados Unidos por la United States Environmental Protection Agency (USEPA) lo que la ha convertido en una especie de referencia toxicológica importante (Nimmo y Hamaker, 1982).

Cultivo de la especie de prueba *Mysidopsis bahia*.

Los organismos se cultivaron en el Laboratorio de Toxicología Acuática del IMP, provenientes de la empresa Chesapeake Cultures Inc., Virginia, Estados Unidos. El cultivo se realizó en un sistema de recirculación continua, el cual tiene una combinación de filtros mecánicos, biológicos y químicos, con lo cual se mantienen homogéneas las características fisicoquímicas del agua marina. El agua marina se prepara artificialmente (marca Cristal Sea, libre de fosfatos), preparada en el laboratorio con una salinidad de 20 ± 1 ‰. Las condiciones de cultivo se describen en la Tabla II.

Tabla II Condiciones de cultivo de *Mysidopsis bahia* (tomado de Weber, 1993)

Parámetros	Características
Sistema de cultivo	Recirculación
Medio de cultivo	Agua marina artificial (Cristal sea)
Salinidad	20 ‰ ± 1
Temperatura	26 ± 2 °C
Alimentación	Nauplios de <i>Artemia franciscana</i> (50 nauplios/ <i>Mysidopsis</i> /día)
pH	8.3-8.4
Oxígeno Disuelto	5 mg/L
Fotoperíodo (Luz: Oscuridad)	14:10 hrs.
Intensidad de luz (Luxes)	1200
Velocidad flujo	5 Litro/min.
Recipientes de cultivo	Acuarios de 40 y 90 Litros
Amonio	< 0.5 mg/Litro
Densidad/litro	10 organismos

Tóxico de referencia

Se realizó una prueba de sensibilidad con *Mysidopsis bahia* utilizando como tóxico de referencia dodecil sulfato de sodio (DSS) de la marca Sigma con 95 % de pureza, ya que se emplea como detergente y por ello, se encuentra comúnmente en sistemas acuáticos. Una de sus propiedades es que reduce la tensión superficial, debido a la formación de espuma. Para determinar las concentraciones que se emplearon con la especie se hizo referencia a los valores reportados por algunos autores como Parrish y Macauley *et al.*, 1986 obtuvieron un valor de CL₅₀ para el tóxico de 4.3 a 9.2 mg/L. De acuerdo a estos valores se realizaron las siguientes concentraciones: 1, 5, 9, 13, 17 y un control. Para cada prueba se realizó una réplica. La prueba se llevó a cabo una vez al mes, durante el período de la experimentación. Para realizar la prueba, se preparó una solución concentrada de 1 g/L de DSS. Para las pruebas realizadas, se obtuvo un valor promedio de CL₅₀ 96 h de 6.61 ± 1.70 mg/L, con un coeficiente de variación del 12.89 %.

Preparación de la muestra

Con el objeto de que las condiciones del experimento sean semejantes a las del ambiente de donde se recolectaron las muestras de sedimento, éste debe de mezclarse con agua marina sintética y separar la fase de partículas suspendidas. El primer paso es la obtención de la fase de partículas suspendidas (FPS) de la muestra, es decir la fase acuosa y biodisponible, se realizó a partir de una relación volumétrica 1:9 (muestra+agua marina), ambos se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 1 L, 40 gramos de sedimento en 900 mL de agua marina artificial con salinidad y temperatura de 20 ‰ y 25 °C. Antes de preparar la fase se mezcla el sedimento con el agua con un agitador magnético durante 30 minutos, para asegurar un buen mezclado, posteriormente se deja reposar durante una hora y se toma la fase de partículas suspendidas por decantación. La muestra así obtenida, representa el 100 %, posteriormente se hacen diluciones para obtener: 100 %, 75 %, 50 %, 25 % y 10 %.

Prueba de toxicidad aguda CL₅₀ a 96 horas.

Una vez obtenida la FPS mencionada con anterioridad, se realizaron pruebas de toxicidad aguda, empleando para ello las concentraciones en el párrafo anterior y como control agua marina artificial, con dos controles cada concentración y un testigo por cada una de ellas (Tabla III).

Tabla III Condiciones para la prueba de toxicidad aguda.

Parámetros	Características
Tipo de prueba	Estática sin renovación de la solución de prueba
Duración	96 horas
Intensidad de luz	1200 luxes
Medio de prueba	Agua marina artificial (Cristal sea)
Fotoperíodo	14:10 Luz/Oscuridad
Recipientes de prueba	1500 mL
Volumen total, agua marina + muestra	1000 mL
Edad de los organismos	Juveniles de 4 a 6 días
Salinidad	De 20-22 ‰
Temperatura	25 ± 1 °C
Alimentación	Nauplios de <i>Artemia franciscana</i> (50 nauplios/ <i>Mysidopsis</i> /día)
pH	8.3-8.4
Oxígeno Disuelto	5 mg/L
No. de réplicas por concentración	2
No. Organismos/réplica	20
No. Concentración de la prueba	5 y 1 control
Respuesta evaluada	Inmovilidad a 96 horas
Criterio de aceptabilidad de la prueba	Supervivencia > 60 = al 90% en los testigos

Para cada prueba se emplearon un total de 240 organismos, los cuales se obtuvieron de los lotes de cultivo, mediante una red de malla fina. Se colectaron adultos y juveniles y se separaron en cristalizadores empleando una pipeta pasteur de plástico recortada. Al obtener a los juveniles, los adultos se incorporaron de nuevo al acuario de cultivo. Los juveniles se colocaron dentro de la concentración correspondiente dando con esto inicio a la prueba.

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos (pH, OD, T° y S ‰) se realizó cada 24 horas (0, 24, 48 72 y 96 h.). Para mantener la temperatura constante (26 ± 2 °C) se colocaron los cristalizadores en baño maría y a cada cristalizador de prueba se le proporcionó aireación mediante compresor de aire de uso en acuarios. Cada 24 horas se registró el número de organismos vivos, esto con la finalidad de no perder el número real de organismos expuestos ya que se pueden morir y descomponerse y/o mudar y

confundir su exoesqueleto con un organismo muerto. En el caso de los controles se utilizó agua marina artificial, sin ningún tóxico. La máxima mortalidad aceptada para el control de cada prueba fue del 10 %, en caso de exceder este valor la prueba se repitió.

Bioensayos con nauplios de *Artemia franciscana* y *Artemia* sp.

El utilizar algunas especies como *Artemia* la que presenta características que hacen factible su utilización en experimentos toxicológicos, permite abrir un campo de interés para la normativa ambiental. Un rasgo importante de este organismo es su estado fisiológico de quistes detenidos en diapausa, que permiten ser eclosionados bajo condiciones controladas y llevar a cabo en cualquier momento una prueba de toxicidad con organismos de la misma edad; además el costo de estos experimentos es bajo, en comparación con los que se llevan a cabo con otras especies, en donde se requiere de una infraestructura más compleja (Zapata-Peñasco, 1999). Otra característica es que se cuenta con el conocimiento muy amplio sobre la biología, ecología, genética, morfología, bioquímica, toxicología y técnicas de cultivo de *Artemia*. Tales características permiten que esta especie se proponga para evaluar la toxicidad de sustancias vertidas en ambientes salobres o en su defecto, sustancias con salinidades definidas (Vanhaecke *et al.*, 1980). Los quistes de ambas especies fueron proporcionadas por el Laboratorio de Carcinología del CIBNOR.

Eclosión de quistes de *Artemia*

Veinticuatro horas antes de iniciar la prueba, se pusieron a eclosionar los nauplios de *Artemia*, los quistes se colocan en agua marina sintética y se mantuvieron a 25 ± 1 °C para permitir la eclosión de éstos. Es necesario mantener constante la intensidad de luz en el área donde se encuentren los quistes, de tal manera que para asegurar la eclosión de los quistes es necesario realizar los siguientes pasos:

- 1.- Se mezclan 50 mL de hipoclorito de sodio en un vaso de pp. de 259 mL más 50 mL de agua marina sintética.
- 2.- Se pone en agitación la mezcla en un agitador magnético

3.- Se adiciona 3 gramos de hidróxido de sodio, se espera hasta que se disuelve totalmente.

4.- Se añade 0.25 gramos de quistes de *Artemia* y se agita continuamente hasta que tomen un color rojizo.

5.- Los quistes se enjuagan con agua corriente en una malla.

6.- Se pasan a un matraz de bola y se añade agua marina sintética.

Los niveles de oxígeno deben ser próximos a la saturación, y sobre todo, que los quistes estén siempre en suspensión. Esto se logra manteniendo una aireación constante en el recipiente que contenga los quistes. Los valores de pH se deben mantener en 8 ± 0.2 unidades.

Después de 24 horas se toma un mililitro de la muestra y se pone en una placa para llevar a cabo el conteo de los organismos y de esta manera tener una idea de la población de eclosión. Esperar 24 horas para la obtención de nauplios y llevar a cabo la prueba de sensibilidad de la especie, utilizando un tóxico de referencia.

Un tóxico de referencia es una sustancia química orgánica o inorgánica, que es empleada en pruebas de toxicidad para proveer los resultados que pueden ser comparados dentro del laboratorio y entre laboratorios; estos resultados permiten tener un control de la precisión de las pruebas de toxicidad. Una segunda función es la de proveer de una medida general de reproducibilidad de un método de prueba toxicológica dentro de un laboratorio. Los resultados individuales son comparados con un historial de pruebas desarrolladas para identificar cuales caen dentro de un intervalo aceptable de variación. Los datos que estén por fuera de los límites establecidos son considerados fuentes potenciales de variación. Dicha variación puede ser atribuible a factores tales como las diferencias entre agua de dilución, cambios en la calidad de agua, parámetros que no son definidos de manera precisa como aireación, iluminación, temperatura; las condiciones físicas o de salud de los organismos de prueba, diferencias entre los lotes o camadas, diferencias genéticas a la tolerancia de tóxicos, y la consistencia operacional del personal que realice los bioensayos (Zapata-Peñasco, 1999).

La toxicidad aguda del tóxico de referencia se evaluó con nauplios de *Artemia franciscana* y *Artemia* sp., con el fin de determinar la sensibilidad de la cepa con el tóxico (laurel sulfato de sodio), (Tabla IV).

Tabla IV Condiciones para la prueba con el tóxico de referencia con la especie *Artemia*

Tipo de Prueba	Estática, sin renovación de la solución de prueba.
Duración	48 horas
Intensidad luminosa	600-1000 luxes
Temperatura	25.5 °C
pH	8.1
Aireación	No
Suministro de alimento	No
Recipientes de prueba	Tubos de 10 mL
Volumen de la prueba	10 mL/tubo
Concentraciones (mg/mL)	6
Número de réplicas/concentración	3
Agua de dilución	Agua de mar artificial "Instant Ocean"
Salinidad	30 g/L
Número de organismos por réplica	10
Edad de los organismos	Nauplios en estadio II-III
Respuesta evaluada	Mortalidad o inmovilidad

Se prepararon seis concentraciones del tóxico de referencia: 64, 32, 16, 8, 4 y 2 mg/L.

Preparación de los sedimentos para pruebas de toxicidad.

Se prepararon alícuotas para obtener una proporción volumétrica de sedimento-agua marina sintética 1:9. Antes de preparar la fase se mezcla el sedimento con el agua con un agitador magnético durante 20 minutos para asegurar un buen mezclado, posteriormente se deja reposar durante 20 minutos y se toma la fase de partículas suspendidas obtenida por el método de decantación.

- 1.- Se colocó en un vaso de precipitados de 250 mL 10 gramos de sedimento y se añadió 90 mL de agua marina sintética.
- 2.- Se colocó en un agitador magnético durante 20 minutos.
- 3.- Se dejó en reposo durante 20 minutos.
- 4.- Se decantó el sobrenadante correspondiente a la fase de partículas suspendidas y se llevaron a cabo las siguientes diluciones: 100 %, 75 %, 50 %, 25 % y 10 %.

Bioensayos con nauplios de *Daphnia magna*

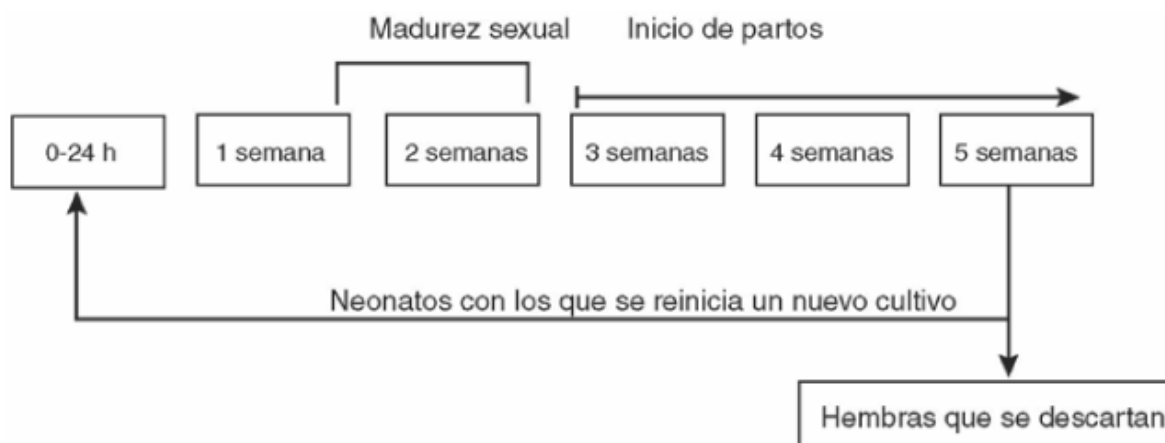
El propósito del cultivo de *Daphnia magna* fue el de disponer de lotes de organismos de experimentación oportunos y suficientes que proporcionaran una respuesta uniforme y adecuada cuando los organismos fueran sometidos a la acción de agentes tóxicos, en este caso a un tóxico de referencia y a las muestras de sedimentos de la Presa Benito Juárez y el Río Tehuantepec, Salina Cruz, Oax. Las condiciones de mantenimiento para la especie se muestran en la Tabla V.

Tabla V Condiciones para el mantenimiento de *Daphnia magna*

Tipo de Prueba	Estática, sin renovación de la solución de prueba.
Intensidad luminosa	600-1000 luxes
Fotoperíodo	14 h luz/8 h oscuridad
Aireación en los recipientes	No
Número de organismos por recipiente	10 ó 15
Agua de cultivo	Agua potable adicionada con 1.0 µg/L de selenito de sodio
Temperatura	20.0 °C ± 2 °C
Alimentación	Cada tercer día
Recipientes utilizados	Frascos de 1 L

Limpieza y mantenimiento

Para el mantenimiento del cultivo se sugiere aplicar un ciclo de renovación definido a criterio del analista. El ciclo permite mantener un cultivo de organismos en etapas óptimas de reproducción. Algunos autores (CETESB/L5.018, 1991) recomiendan mantener lotes de individuos separados por edad, desde 0-1 semana hasta cuatro o cinco semanas como se muestra en el siguiente diagrama:



Cultivo de organismos-ciclo de renovación.

Diariamente o cada tercer día, dependiendo del desarrollo del cultivo, deben retirarse los neonatos, los cuales pueden ser destinados al desarrollo de pruebas o eliminados.

Pruebas de sensibilidad.

Para determinar si la sensibilidad del cultivo es adecuada, previa a iniciar las pruebas rutinarias, es necesario evaluar la respuesta de los organismos ante la exposición al tóxico de referencia. El tóxico de referencia que se debe emplear en esta prueba es el dodecil sulfato de sodio (SDS), en las siguientes concentraciones: 2, 4, 8, 16 y 32 mg/L, y un testigo control (agua reconstituida), empleando 10 neonatos con edad menor a 24 horas. La CL_{50} (concentración en la cual se produce la muerte del 50% de la población de neonatos) de referencia para este tóxico es de $14,5 \text{ mg/L} \pm 4,5 \text{ mg/L}$. La CL_{50} no debe ser mayor o menor que dicho intervalo (NMX-AA-087-1995-SCFI).

Para llevar a cabo las pruebas de sensibilidad, se preparó una solución patrón del tóxico de referencia. Se disolvió 0.1 g de dodecil sulfato de sodio con agua destilada y se aforó a 100 mL. A partir de esta solución se prepararon las concentraciones requeridas y marcadas en la norma.

Una vez que se realizaron las diluciones correspondientes, se vaciaron en los recipientes apropiados, se agregaron los neonatos en cada uno, con la ayuda de una pipeta Pasteur con la punta recortada. En las Tablas VI y VII se mencionan las condiciones en las que se realizaron las pruebas. Para esta prueba, se corrieron un total de tres ensayos.

Tabla VI Condiciones para la prueba de evaluación de la sensibilidad de *Daphnia magna*

Parámetros	Condiciones
Tipo de prueba	Estática sin renovación
Duración	48 h
Luminosidad	600 luxes
Fotoperíodo (luz:oscuridad)	16 h luz / 8 h oscuridad
Volumen de los recipientes de prueba	150 ml
Volumen total (agua reconstituida más Muestra)	100 ml
Edad de los organismos	Menos de 24 h
Número de réplicas por concentración	3
Número de organismos por réplica	10
Aireación de los recipientes de prueba	No
Agua de dilución	Reconstituida dura
Temperatura	20°C ± 2°C
Alimentación	No
Respuesta evaluada	Inmovilidad a 24 h y 48 h
Criterio de aceptación de la prueba	Supervivencia mayor o igual al 90 % en los Testigos

Tabla VII Condiciones para la prueba definitiva con *Daphnia magna*.

Parámetros	Condiciones
Tipo de prueba	Estática sin renovación de la prueba
Duración	48 h
Luminosidad	600 luxes
Fotoperíodo	16 h luz / 8 h oscuridad
Volumen de los recipientes de prueba	150 ml
Volumen total (agua reconstituida más Muestra)	100 ml
Edad de los organismos	Menos de 24 h
Número de réplicas por concentración	3
Número de organismos por réplica	10
Aireación de los recipientes de prueba	No
Agua de dilución	Reconstituida dura
Temperatura	20°C ± 2°C
Alimentación	No
Respuesta evaluada	Inmovilidad a 24 h y 48 h
Criterio de aceptación de la prueba	Supervivencia mayor o igual al 90 % en los Testigos

Para estimar la concentración letal media (CL_{50}) del tóxico de referencia así como de los sedimentos evaluados se usó el programa Stephan (1977), el cual hace el cálculo directo de la mediana o cuartil 50% que es el principal estadístico utilizado en pruebas de toxicidad aguda, la cual suele ser representada como la concentración letal media. El escoger este valor estadístico se debe a que el mismo suele estar asociado a una menor varianza que la proporcionada por cualquier otro cuartil. Los resultados se obtuvieron empleando el método probit, por los que se reportan en dichas unidades (probit). Este, es un método paramétrico basado en una transformación probit de los datos según la ecuación: $P = \Phi(A+B)$ en donde P es la probabilidad de muerte de los organismos expuestos a la concentración X, Φ es la distribución normal estándar, mientras que A y B son parámetros desconocidos definidos por la relación “concentración mortandad”. Es decir, que esta transformación probit resulta en un ajuste que logra normalizar los datos, generando una curva sigmoideal que al ser sometida a una transformación logarítmica, logra una linearización de la misma (Rodríguez-Grau y Esclapés, 1995).

Procesamiento de los datos

Para evaluar el grado de contaminación por metales pesados se hizo a través del Índice de Geoacumulación (Müller, 1979), el cual está dado por: $I_{geo} = \log ([M]_i / (1.5([M]_r))$, donde $[M]_i$ y $[M]_r$ son las concentraciones del metal en el sedimento del área de estudio y el promedio de la corteza, respectivamente, empleando como valores en la corteza terrestre lo reportado por (Taylor, 1964; Wedepohl, 1978) para As 1.8, Cd 0.2, Cr 100, Cu 55, Hg 0.08, Ni 75, Pb 12.5, V 135, Zn 70 mg/kg. En la Tabla VIII se presentan los intervalos de la clasificación de este índice.

Tabla VIII Intervalos de la clasificación del Índice de Geoacumulación (Müller, 1979).

Intensidad de la contaminación de acuerdo al Índice de geo-acumulación (Muller, 1979).		
I_{geo}	Clase	Intensidad de la contaminación
> 5	6	Muy fuertemente contaminada
4-5	5	Fuertemente a muy fuertemente contaminada
3-4	4	Fuertemente contaminada
2-3	3	Moderadamente a Fuertemente contaminada
1-2	2	Moderadamente contaminada
0-1	1	No contaminada a Moderadamente contaminada
< 0	0	No contaminada

Posteriormente se llevó a cabo la valoración del grado de contaminación a través del factor de enriquecimiento (FE). La normalización geoquímica o granulométrica de los datos puede estar acompañada por el cálculo de factores de enriquecimiento relativos a las concentraciones de metales observadas en la corteza terrestre o a valores de referencia regionales, asumiéndose que las relaciones entre los diferentes metales y los elementos conservativos son relativamente constantes durante los procesos naturales a los que están expuestos los sedimentos.

De esta forma, algunos autores como Soto-Jiménez (1998) han utilizado una relación consistente en dividir las concentraciones del metal analizado y del elemento conservativo en la muestra de sedimento, entre la misma relación utilizando las concentraciones promedio de la corteza terrestre o valores de referencia obtenidos a

partir del material en zonas prístinas de la región. De acuerdo a esto, se determinó el FE utilizando la siguiente ecuación (Förstner y Wittman, 1979):

$$FE = \frac{[M]_i/[E]_i}{[M]_r/[E]_r}$$

donde $[M]_i$ es la concentración del metal en el sedimento del área de estudio; $[E]_i$ la concentración del elemento conservativo (Al o Fe) en el sedimento del área de estudio; $[M]_r$ el contenido promedio del metal en la corteza; y $[E]_r$ la concentración del elemento conservativo Fe en la corteza.

Para la estadística descriptiva se calcularon: media, desviación estándar, valores máximo y mínimo para cada uno de los parámetros evaluados (Sokal y Rohlf, 1985). Se llevó a cabo un análisis de cajas o émbolos así como el análisis de componentes principales. Este tipo de análisis se empleó con la finalidad de agrupar los puntos de muestreo o sitios de altas concentraciones de contaminantes, características granulométricas, así como la toxicidad en los sedimentos, utilizando el paquete estadístico Statistica 5.1 (StatSoft, 1998).

Para determinar el valor de la CL_{50} en cada prueba o bioensayo, se utilizó el Método Probit, calculando el valor mediante el software de CL_{50} . Se calcularon los valores promedio de cada serie de datos (réplicas), intervalos de confianza ($P=0.05$) de cada serie y coeficientes de variación (CV %) este último cálculo, con el fin de determinar la variabilidad resultante en los grupos de repeticiones realizadas con cada muestra.

3. RESULTADOS

3.1 Granulometría y materia orgánica

Las características granulométricas del sedimento de la zona litoral se dividen en tres zonas: bahía La Ventosa, bahía de Salina Cruz y bahía de Salina del Marqués. En la Figura 2 se presenta el comportamiento de las arenas, limos y arcillas en el litoral, en la que se observa que los limos predominaron en las estaciones de la bahía La Ventosa, el contenido más elevado se registró en las estaciones 2 y 4, seguido de la estación 6 y finalmente la 5, en tanto que las arenas predominaron en las estaciones 2 y 4 (84 y 92 %). Los sedimentos que se presentaron en esta zona fueron desde arenosos a arcillo-limosos; las estaciones 3 y 5 tuvieron la categoría de limo-arenosos de acuerdo a la clasificación de Shepard (1973).

En las estaciones frente a la bahía de Salina Cruz, las estaciones 7, 10 y 11 obtuvieron un porcentaje mayor de arenas (73, 65 y 82%), la 8 con mayor cantidad de limos (44 %), y la 9 con un (51.2 %) de arcillas. Por lo tanto, mayoría de las estraciones fueron clasificados como areno-limosas, la estación 8 como limo-arenosa.

Las estaciones ubicadas frente a la bahía de Salina del Marqués fueron predominantemente arenosas. Los puntos con el valor más elevado de arenas correspondieron a las estaciones de las bahías Guelaguichi y Chipehua y el punto 12 (>94 %).

La materia orgánica registró un mayor promedio en las bahías Guelaguichi y Chipehua (5.18 %). A excepción de la estación 2 de la zona litoral, situada cerca de la boca del Río Tehuantepec, que obtuvo un valor de 35 % de materia orgánica, la gran mayoría de los puntos de muestreo obtuvieron un porcentaje menor a 10 %

En las estaciones 1 y 2 del puerto predominaron las arenas y en la 3 los limos seguido de las arcillas y un valor alto de materia orgánica con respecto a las demás estaciones, esta característica debida a que es un sitio más confinado. En el antepuerto la estación 6 presentó el porcentaje más alto de arenas, en tanto que la 4 se caracterizó por un alto

contenido de limos y el valor más alto de materia orgánica (5.6 %) que coincide con el valor más alto de material orgánico extraíble (Figura 3).

Los sedimentos que se presentaron en el Arroyo Zanjón fueron predominantemente arenas y arenas limosas (Figura 4). Las estaciones 1 y 3, esta última cercana a la refinería obtuvieron los mayores porcentajes de arenas (97 y 95 %) respectivamente. Las estaciones 5 y 6, los limos y las arenas presentaron porcentajes similares y un valor alto de materia orgánica con respecto a las demás estaciones de esta región. Durante la época en que se muestreo, las profundidades del sitio fueron muy bajas, menores a 2 metros.

En el Estero La Ventosa, las estaciones 1, 2 y 4 se caracterizaron por un porcentaje alto de arenas, en tanto que la 3 y 5 con valores mayores de limos y valores más altos de materia orgánica con respecto al resto de las estaciones. La profundidad en este sistema no fue mayor a 2 metros. La estación 5 ubicada en la boca hacia la bahía obtuvo el mayor porcentaje de arcillas con respecto a las demás estaciones (Figura 5).

En las cuatro estaciones de la presa Benito Juárez prevalecieron las arenas, los valores más altos de materia orgánica se presentaron en los puntos 1 y 3, la profundidad de este sistema fue en general de un metro. La estación 3 obtuvo el mayor porcentaje de limos (Figura 6). El Río Tehuantepec se caracterizó por presentar porcentajes altos de arenas en las cinco estaciones, el valor más alto de materia orgánica se obtuvo en la estación 1, en general, ésta fluctuó entre 0.25 y 4.3, las profundidades en este sistema fue menor a un metro (Figura 7).

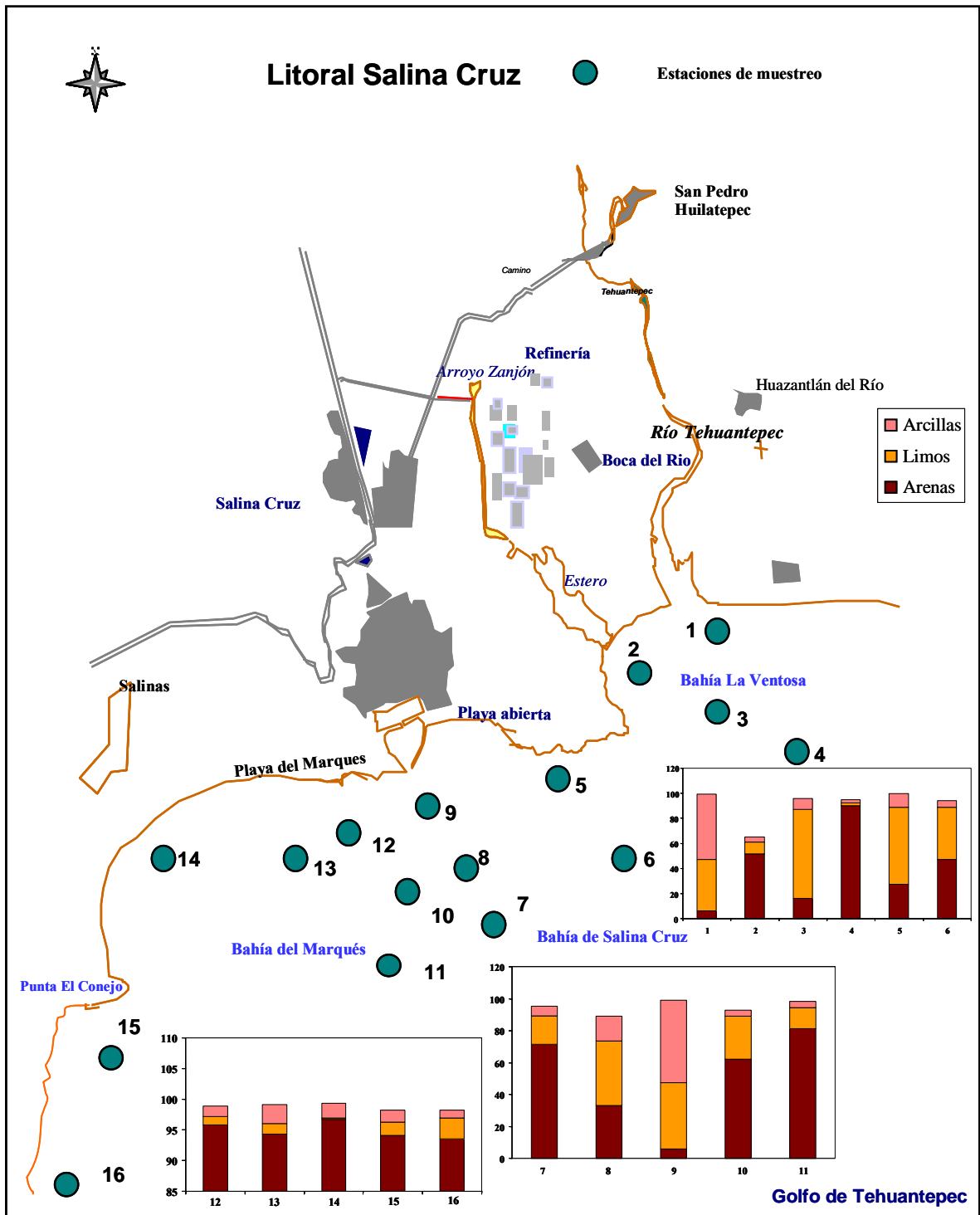


Figura 2 Clasificación textural (arenas, limos y arcillas) de los sedimentos superficiales de la zona litoral de la región de Salina Cruz, Oax., durante mayo-junio y agosto-septiembre de 2002.

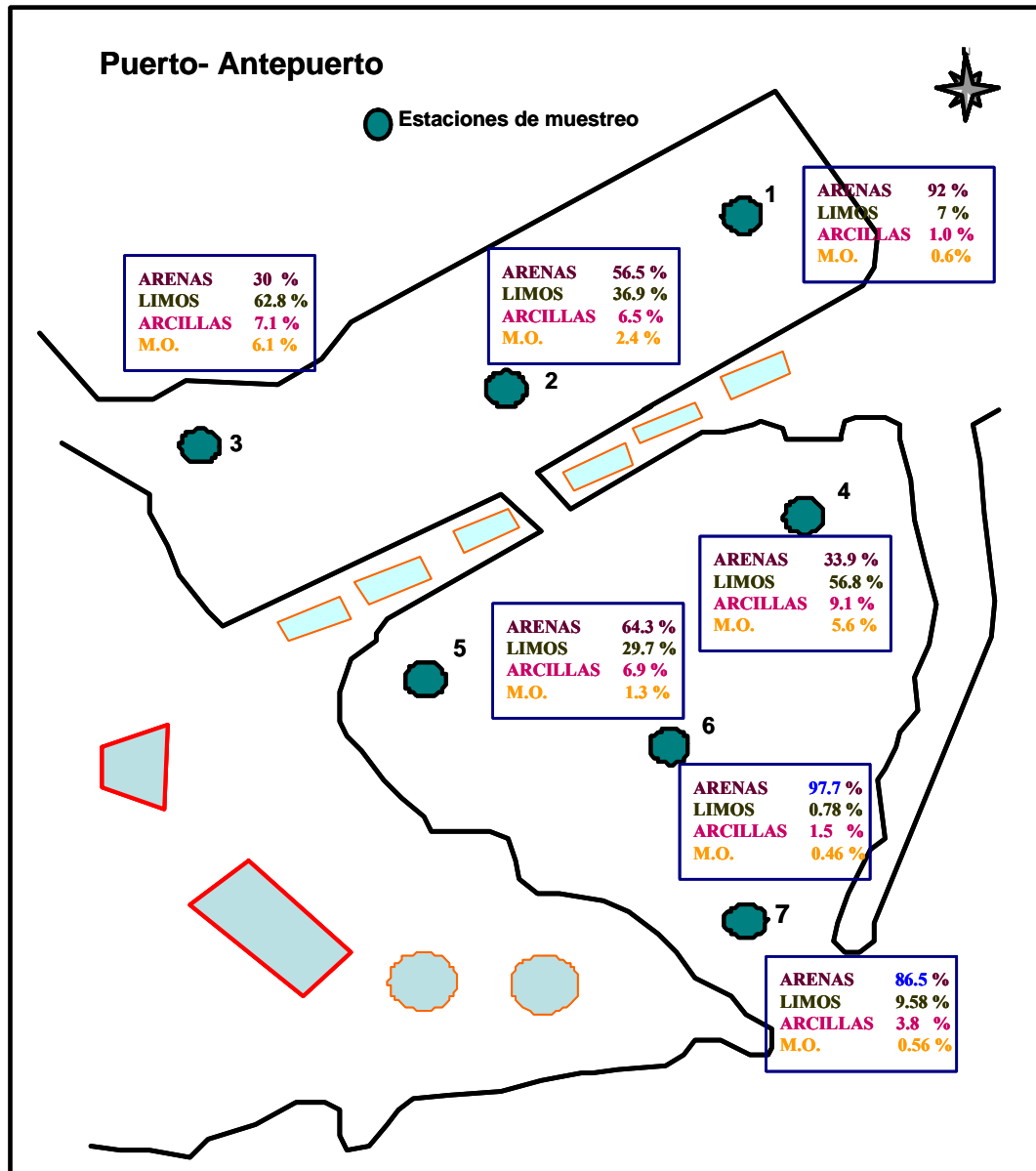


Figura 3 Clasificación textural (arenas, limos y arcillas) de los sedimentos superficiales del puerto y antepuerto de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).

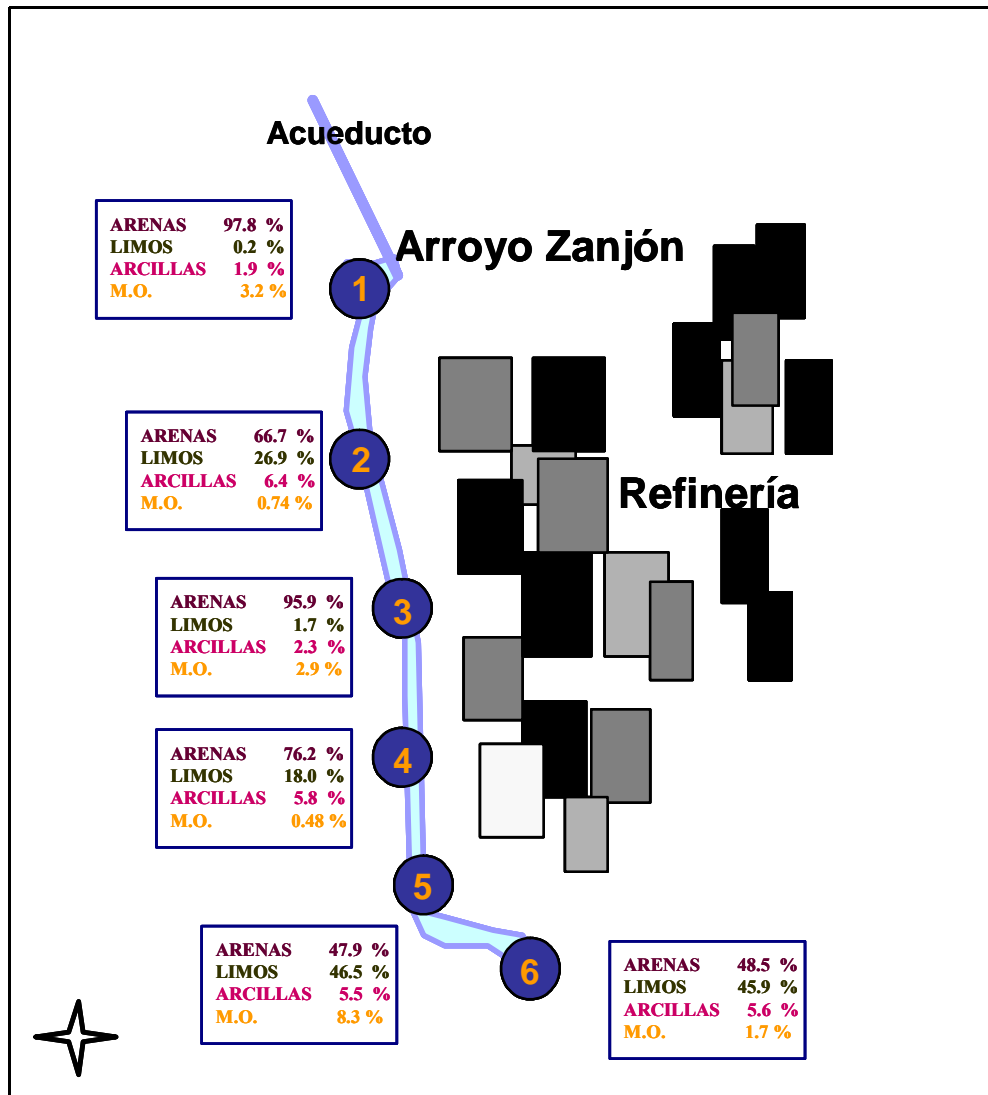


Figura 4 Clasificación textural de los sedimentos superficiales del Arroyo Zanjón de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).

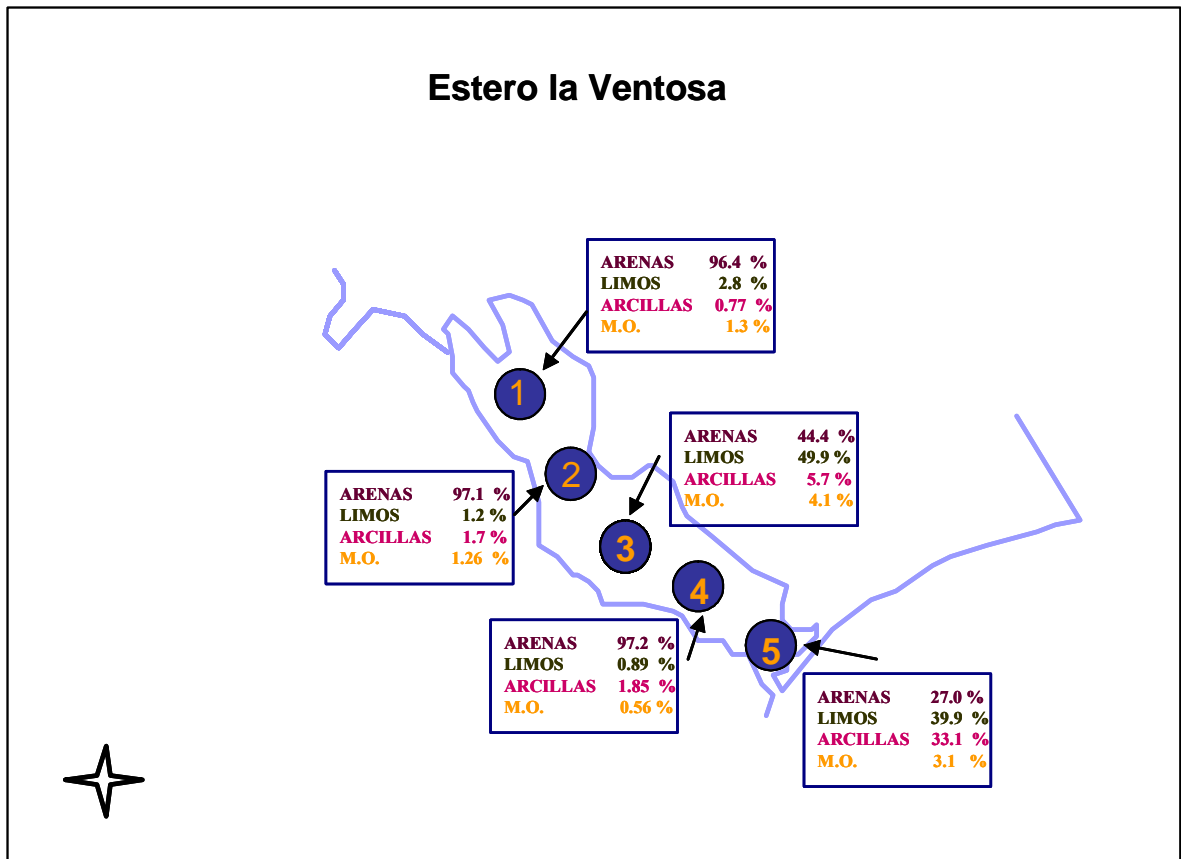


Figura 5 Clasificación textural de los sedimentos superficiales del Estero Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).

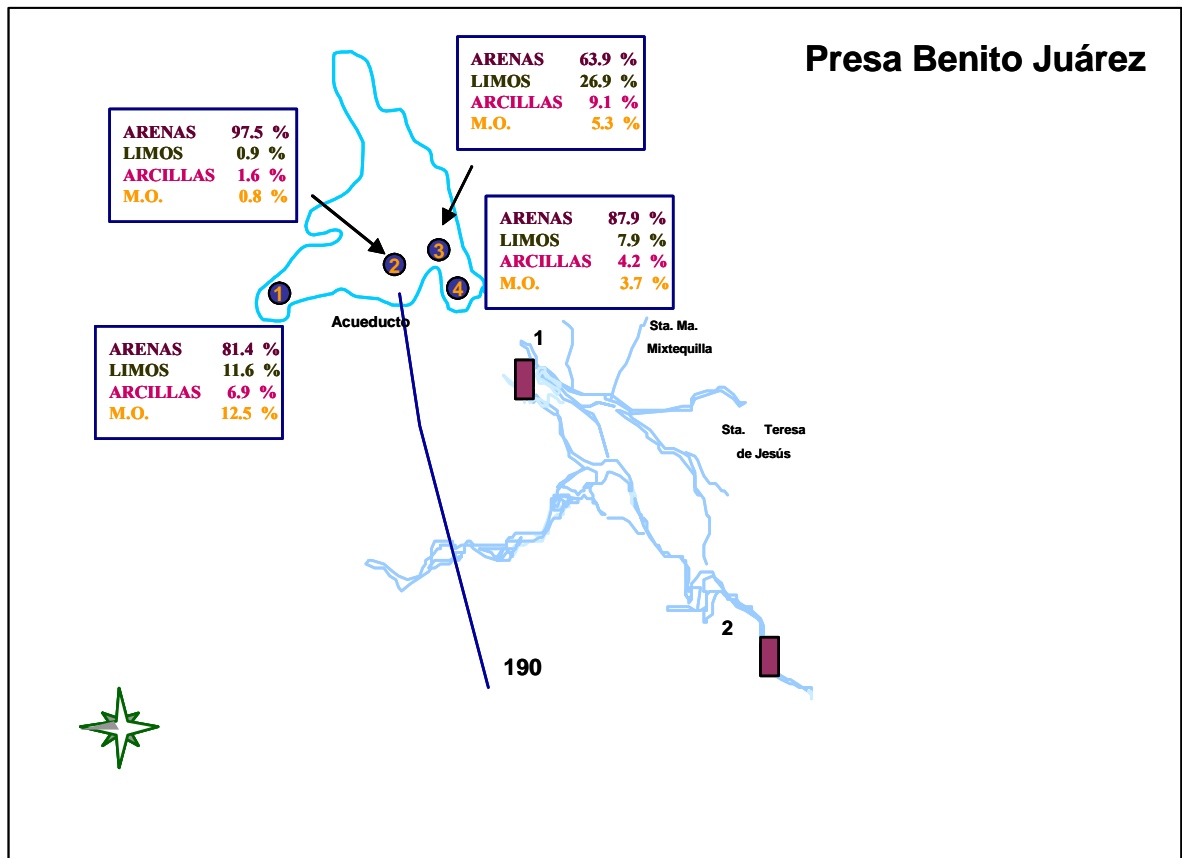


Figura 6 Clasificación textural de los sedimentos superficiales de la presa “Benito Juárez” de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).

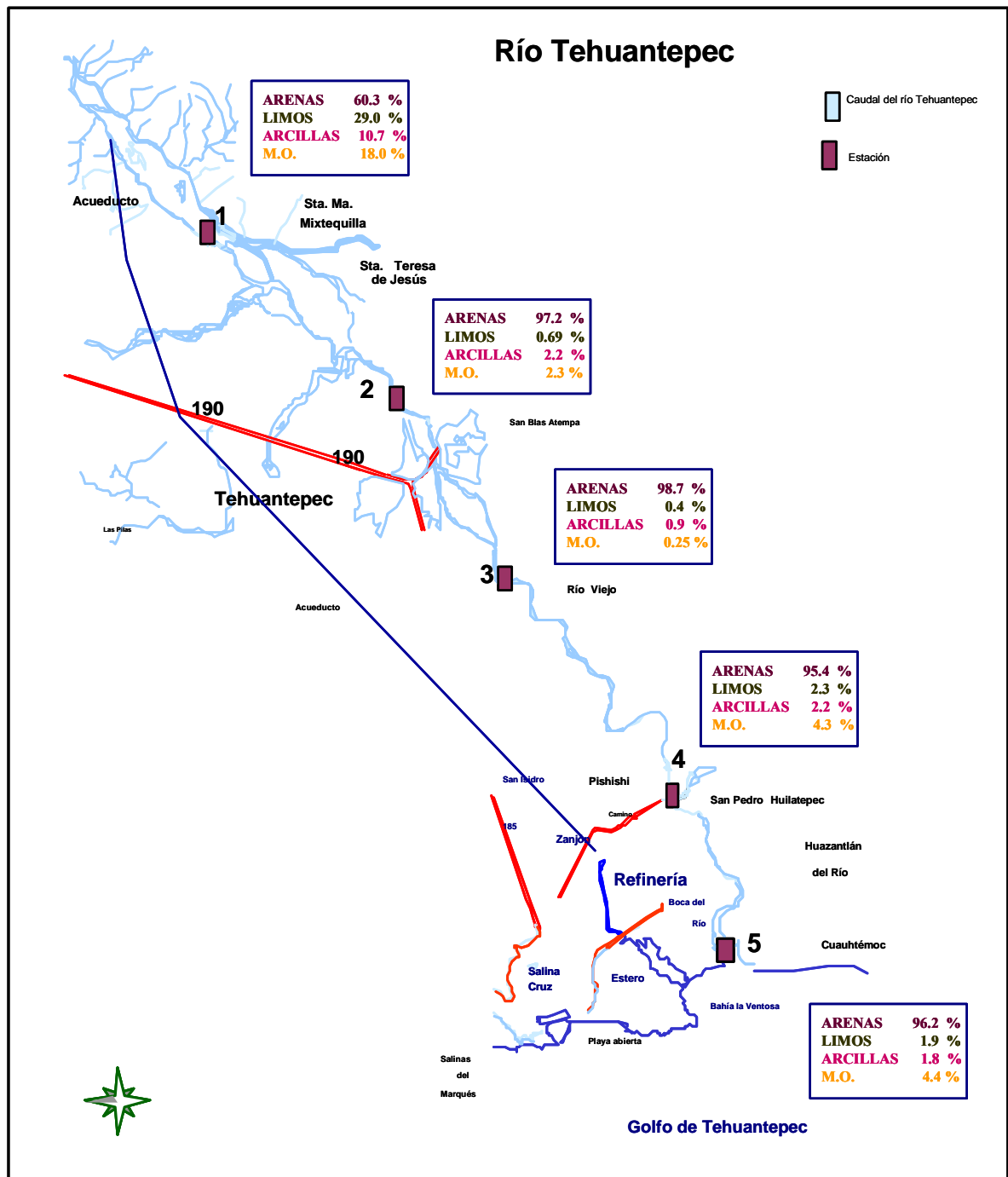


Figura 7 Clasificación textural de los sedimentos superficiales del Río Tehuantepec de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).

En la Figura 8 se presenta la distribución de los sedimentos finos en toda el área de estudio, observándose para el área del litoral que el porcentaje más alto de finos se observó en las estaciones de la Bahía La Ventosa (a excepción de la estación 2) así como en las estaciones 8 y 9 de la Bahía de Salina Cruz frente al puerto; para las estaciones de la Bahía del Marqués (12-16) se presentó el porcentaje más bajo de finos. El Puerto-Antepuerto obtuvo los porcentajes más altos de sedimento fino en las estaciones 3 y 4.

En el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa, la mayoría de las estaciones registraron un mayor porcentaje de finos y para el Río Tehuantepec, solamente la estación 1 obtuvo el porcentaje más alto de finos. Esto indica la presencia de granos gruesos reflejado en los porcentajes altos de arenas.

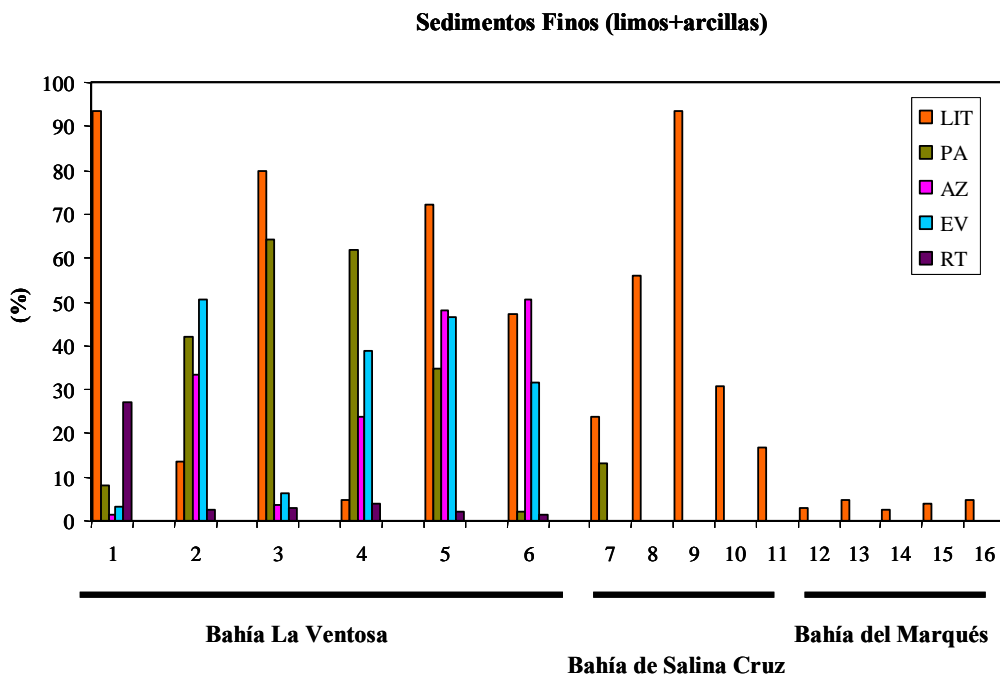


Figura 8 Porcentaje de sedimentos finos de las zonas de la región de Salina Cruz, Oax., (junio, 2002).

3.2 Contaminantes

3.2.1 Hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble

En la Tabla IX se presenta el resumen estadístico de los hidrocarburos aromáticos y en la Figura 9 de émbolos, se muestra su comportamiento de los diferentes sitios evaluados. Se observa que tanto los valores de la media, como el error estándar para el área del puerto y antepuerto así como para el Arroyo Zanjón son los más altos, registrando valores promedio mayores a 40.0 mg/kg. Para los demás sitios, los valores promedio fluctuaron entre 3.14 y 9.2 mg/kg, obtenidos en la región litoral y el Estero La Ventosa respectivamente; los valores promedio más bajos fueron para la presa Benito Juárez y el Río Tehuantepec. De acuerdo al análisis histórico de datos de hidrocarburos aromáticos totales en el área de estudio, se obtuvo un valor de fondo de 5.0 mg/kg (González-Macías *et al.*, 2006b), el cual fue superado en la estación 9 del litoral así como en todas las estaciones del puerto y antepuerto; en cinco estaciones del Arroyo Zanjón y en dos del Estero La Ventosa. En la Figura 10 y 13 se observa la distribución de los aromáticos en el litoral así como en el puerto y antepuerto, en donde se puede observar que las concentraciones más altas se localizaron en el área del Puerto-Antepuerto así como en las estaciones de la Bahía La Ventosa y las más bajas hacia las bahías Guelaguichi y Chipehua.

Las concentraciones del material orgánico extraíble (MOE) tuvieron una distribución semejante a los hidrocarburos, con valores medios y máximos más altos en el Puerto-Antepuerto y en la estación 3 de del Arroyo Zanjón, ubicada frente a la refinería (Figura 11). Debido a que el origen y su composición es muy variable es importante hacer mención que este parámetro ha sido evaluado en sitios con influencia petrolera y permite dar una idea de los aportes relacionados con hidrocarburos de tipo natural o antropogénico, de tal manera que las concentraciones varían grandemente de un sitio a otro y los valores registrados en el área del litoral así como en el Puerto-Antepuerto están dentro del intervalo de 1.54 a 10,105 mg/kg obtenidos en otros años en el área de

Salina Cruz, en el período entre 1982-2001 y de 28.65 a 30,401 mg/kg en cuerpos de agua continental como es el caso del Estero La Ventosa, Arroyo Zanjón y el Río Tehuantepec (González-Macías *et al.*, 2006b). Los sitios más contaminados son básicamente el área del Puerto-Antepuerto, las estaciones 3 y 5 del Arroyo Zanjón, lo que permite suponer que las concentraciones altas obtenidas en estos sitios son debido a la cercanía de las instalaciones de la refinería (Tabla IX).

Es importante que este parámetro (MOE) ha sido incluido en el elenco para diagnosticar la influencia petrolera, ya que permite identificar los aportes relacionados con hidrocarburos naturales o antropogénicos. En la Figura 12 y 13 se observa la distribución del material orgánico extraíble en donde se presenta un patrón semejante al de los hidrocarburos aromáticos, con las concentraciones más altas en el puerto y antepuerto y en las estaciones de la Bahía La Ventosa.

Tabla IX Resumen Estadístico de hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble en sedimentos superficiales de Salina Cruz, Oax.

Sitios	Junio-2002	
	Hidrocarburos Aromáticos (mg/kg)	Material Orgánico Extraíble (mg/kg)
	Promedio±DS (número de datos) (min-max)	
Litoral	3.14±11.42 (n=16) (0.01-45.93)	109.06±91.43 (n=16) (36.17-419.9)
Puerto- Antepuerto	67.74±50.04 (n=7) (8.22-141.85)	2922.72±2778 (n=7) (402.15-7505)
Arroyo Zanjón	39.95±38.44 (n=6) (0.09-104.81)	726.76±533.51 (n=6) (93.73-1511)
Esteros La Ventosa	9.20±10.04 (n=5) (1.56-26.62)	358.52±50.16 (n=5) (419.38-317.98)
Presa Benito Juárez	0.11±0.06 (n=4) (0.06-0.17)	132.55±46.77 (n=4) (73.36-170.11)
Río Tehuantepec	0.37±1.38 (n=5) (0.003-3.15)	154.77±170.99 (n=5) (47.64-448.07)

Hidrocarburos Aromáticos Totales (mg/kg) en sedimentos de los sitios evaluados
Salina Cruz, Oax. (junio, 2002)

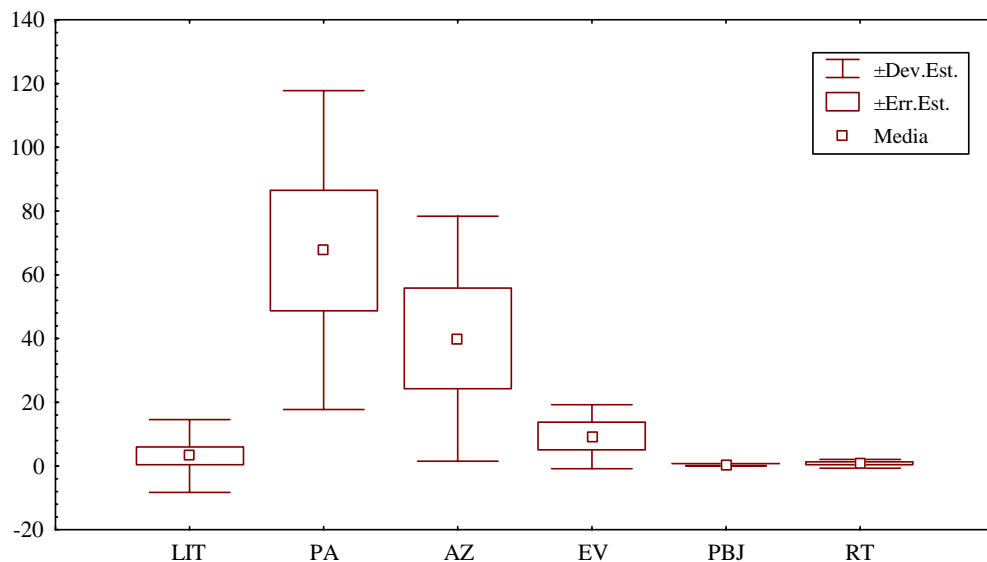


Figura 9 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos de los hidrocarburos aromáticos totales en sedimento de los sistemas estudiados en Salina Cruz, Oax (junio 2002)

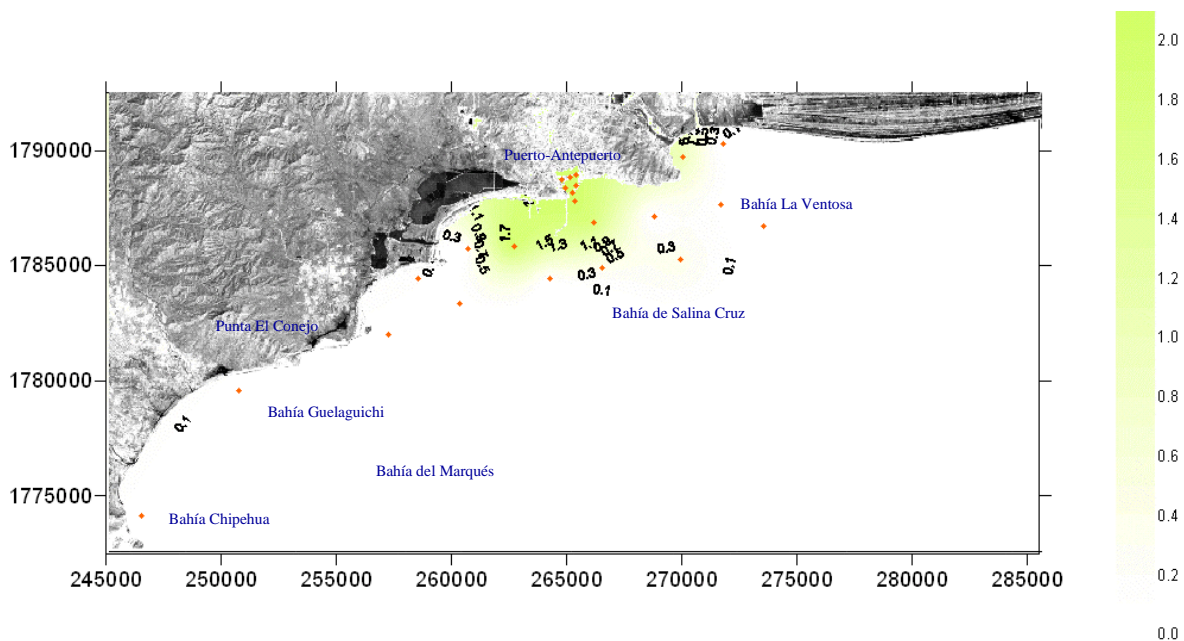


Figura 10 Distribución de los hidrocarburos aromáticos totales en sedimento del litoral de Salina Cruz, Oax. Concentraciones en mg/kg.

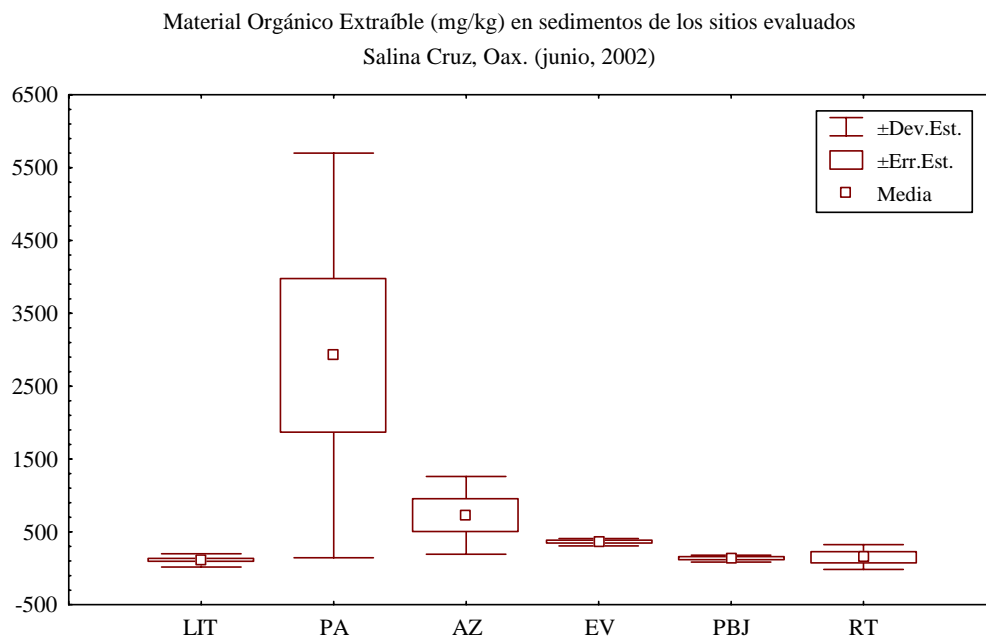


Figura 11 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del MOE en sedimento de los sistemas estudiados en Salina Cruz, Oax (junio 2002).

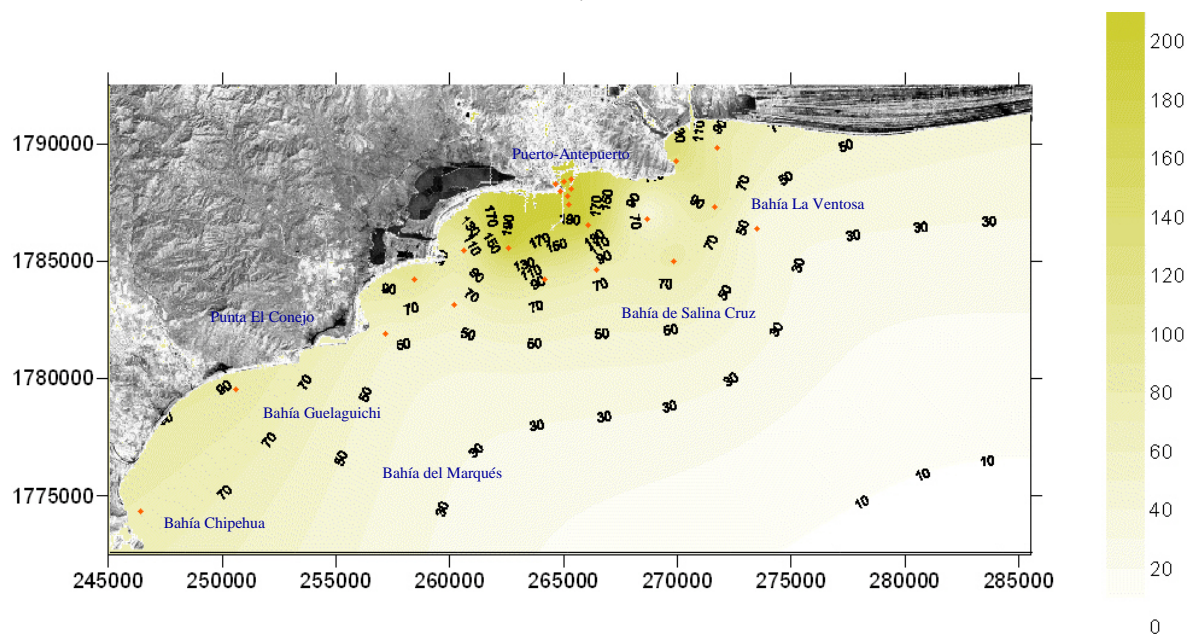


Figura 12 Distribución del material orgánico extraíble en sedimento del litoral de Salina Cruz, Oax.

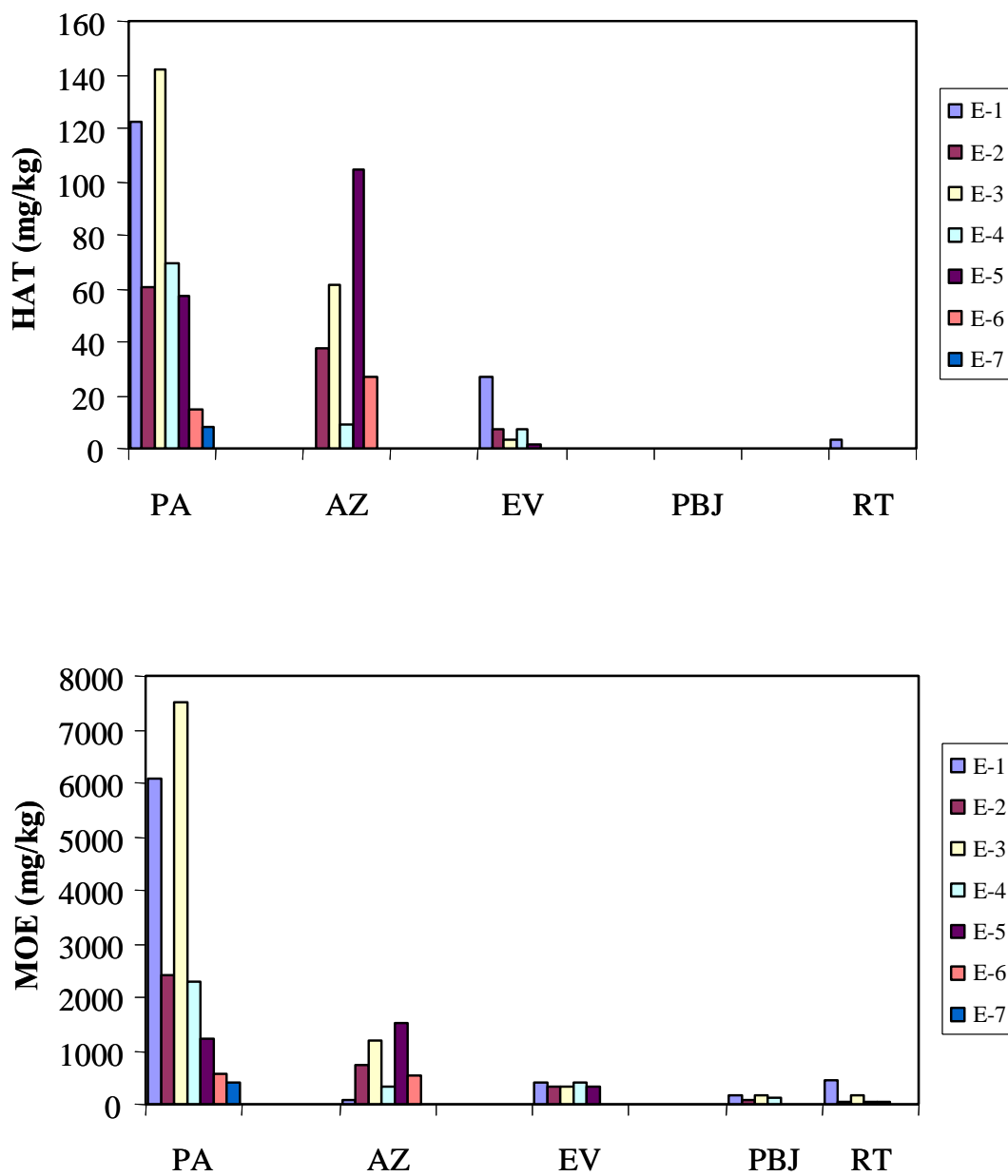


Figura 13 Distribución los hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

3.2.2 Metales

Caracterización de los metales

En la Figura 14 se presenta el comportamiento estadístico del metaloide arsénico en los seis sitios evaluados, observándose que para el AZ y la PBJ se obtuvo la concentración promedio mayor y una mayor dispersión para esta última. El EV y el RT presentaron un valor promedio semejante y menor a los anteriores sitios y con una dispersión menor de los datos para el EV. El PA obtuvo un comportamiento semejante al del RT pero con un valor promedio menor. En el litoral se observa un comportamiento homogéneo de los valores, con el valor promedio menor en relación a los demás sitios.

Los valores promedio en el PA, AZ, EV, PBJ y RT fluctuaron entre 2.86 y 9.5 mg/kg, mientras que los valores nominales obtuvieron concentraciones entre 2.86 y 15.36 mg/kg. En la zona del litoral se obtuvo un valor promedio de 1.83 mg/kg y un intervalo entre 0.77 y 3.48 mg/kg. Las concentraciones más altas se encontraron en la zona costera y las más bajas hacia mar adentro (Figura 15).

Para el caso del cadmio se presenta un comportamiento tendiente a un aumento de la concentración promedio de PA a la PBJ y en general bajas dispersiones, el RT presentó un valor promedio similar al del AZ con una mayor dispersión de los datos en comparación a los demás sitios (Figura 16).

Para este metal, los valores promedio fluctuaron entre 2.79 y 4.61 mg/kg, y los valores nominales obtuvieron concentraciones entre 2.1 y 5.25 mg/kg, en el PA, AZ, EV, PBJ y RT. La zona del litoral obtuvo un promedio de 1.13 mg/kg con valores nominales entre 0.5 y 2.25 mg/kg, los valores más altos se presentaron en las estaciones de la Bahía de Salina Cruz, así como en los puntos cercanos a las Bahías Guelaguichi y Chipehua (Figura 17).

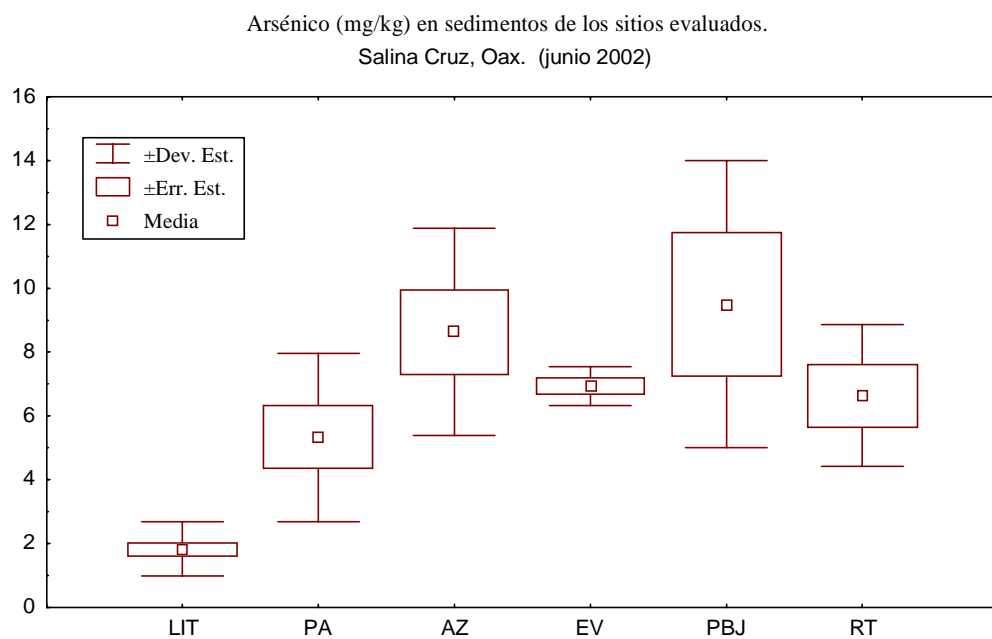


Figura 14 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del arsénico en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

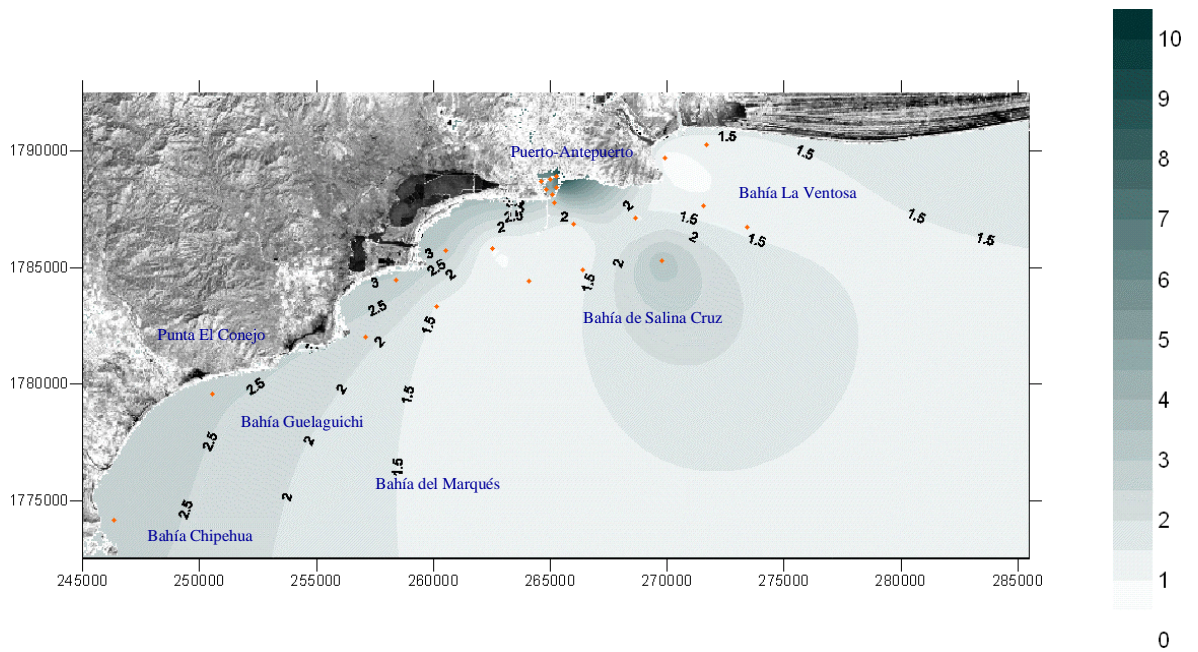
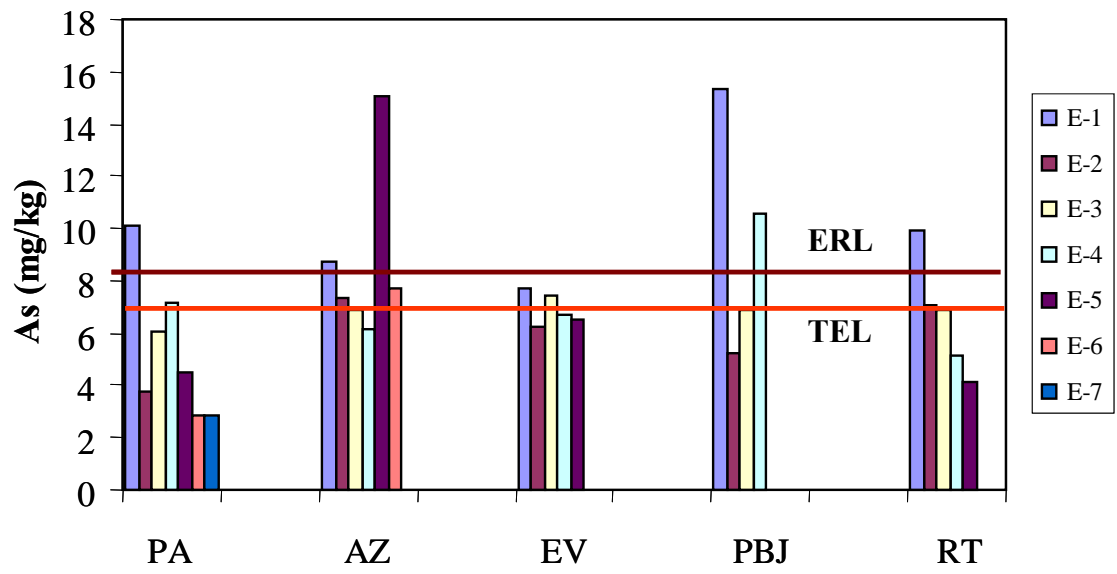


Figura 15 Distribución de las concentraciones del arsénico por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

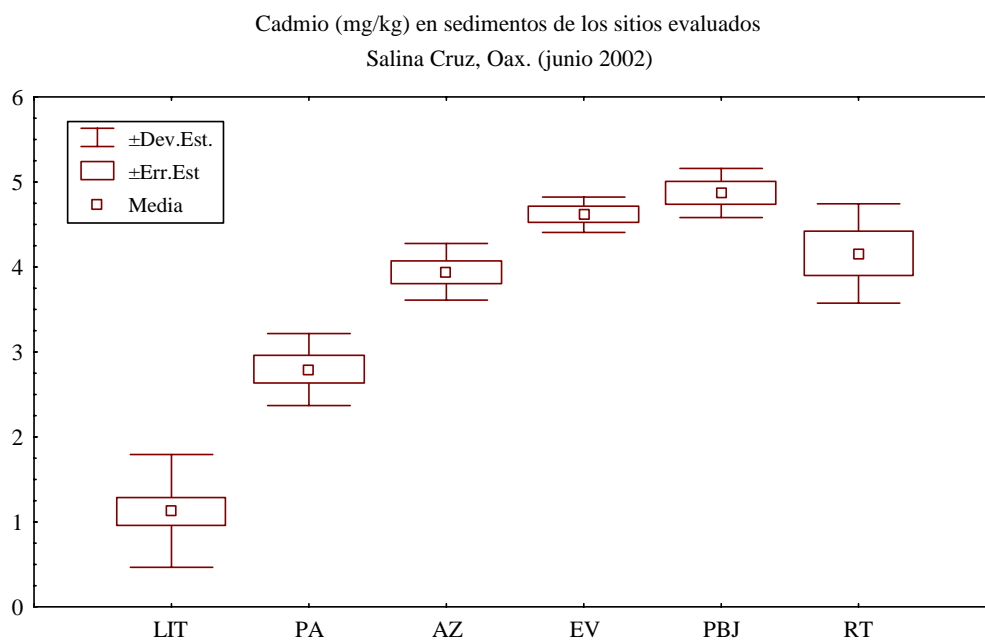


Figura 16 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del cadmio en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

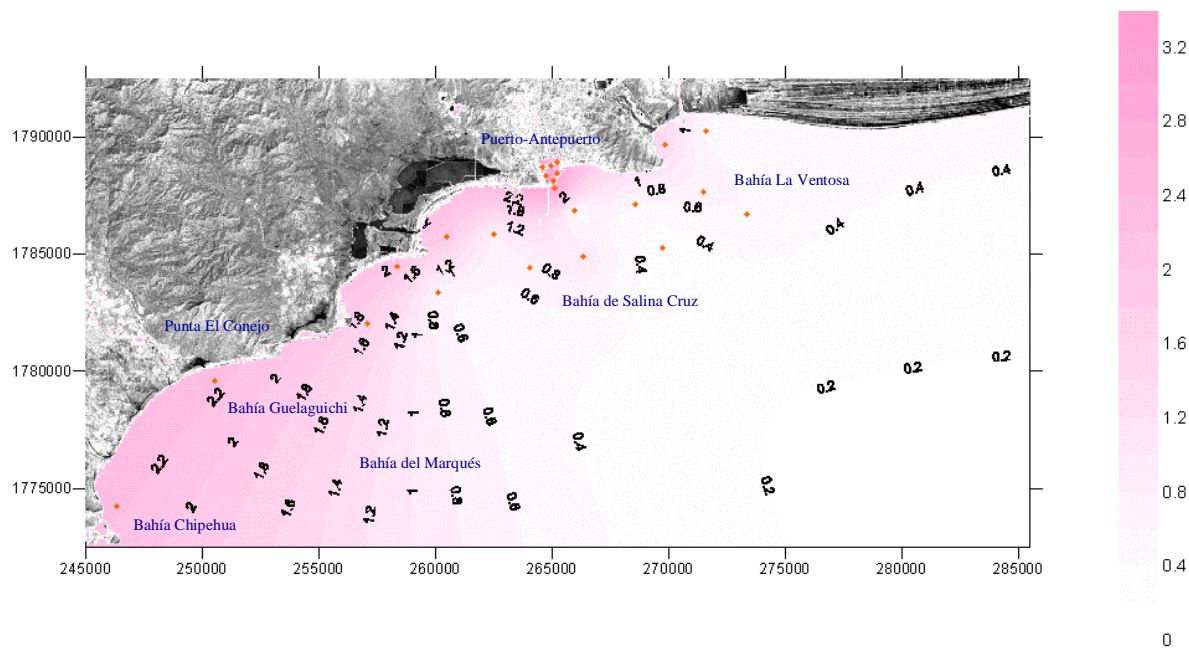
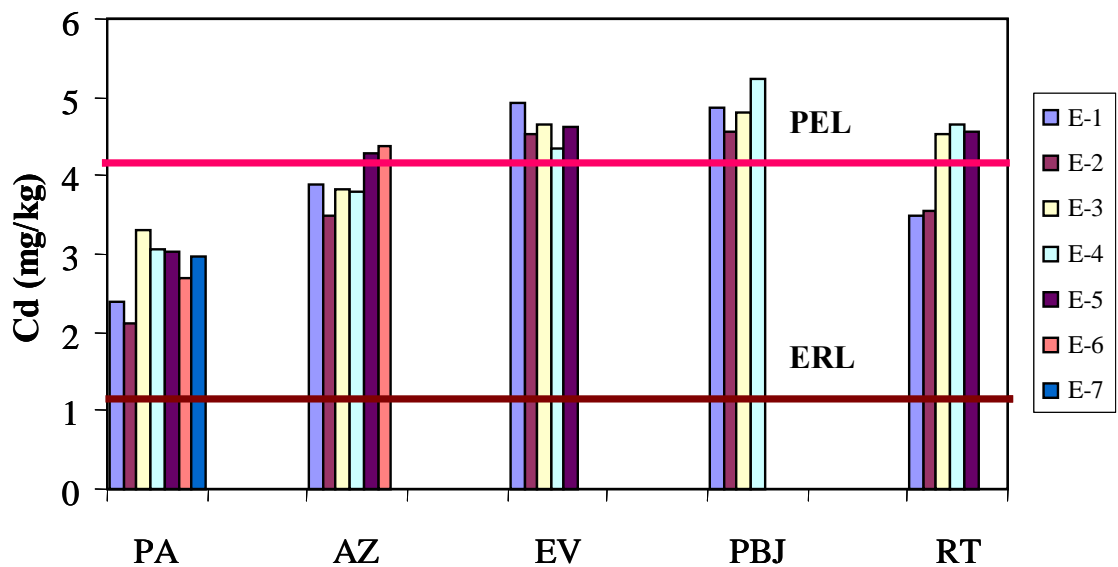


Figura 17 Distribución de las concentraciones del cadmio por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

El comportamiento estadístico del cobre se muestra en la Figura 18 en los seis sitios evaluados, observándose en el LIT y RT un promedio similar y baja dispersión de los valores; el EV y la PBJ obtuvieron un valor promedio semejante pero una mayor dispersión para esta última. El PA y el AZ presentaron los valores promedio más altos, el primero con una dispersión mayor.

Los valores promedio en el PA, AZ, EV, PBJ y RT fluctuaron entre 5.24 y 56.71 mg/kg, mientras que los valores nominales obtuvieron concentraciones entre 1.39 y 135.72 mg/kg. En la zona del litoral se obtuvo un valor promedio de 7.57 mg/kg y valores entre 3.66 y 15.54 mg/kg, este último en la estación 2 frente a la bahía La Ventosa, las concentraciones más altas se encontraron frente a la bahía de Salina Cruz y bahía del Marqués (Figura 19).

Los valores promedio más altos para el níquel fueron para AZ, EV y PBJ con una mayor dispersión en la PBJ y menor para el EV. El PA y el RT obtuvieron un valor promedio igual y una menor dispersión de los valores para el RT. En general para estos sitios los promedios fluctuaron entre 20.0 y 41.36 mg/kg y los valores nominales se encontraron en el intervalo de 12.85 y 69.94, este último se registró en el AZ (Figuras 20 y 21).

El área del litoral presentó el promedio más bajo de este metal (15.88 mg/kg) así como una baja dispersión de los datos los que fluctuaron entre 8.69 y 24.88 mg/kg. Los valores más altos se presentaron en las estaciones frente a Bahía de Salina Cruz y del Marqués así como en las estaciones 13 y 15 (Figura 21).

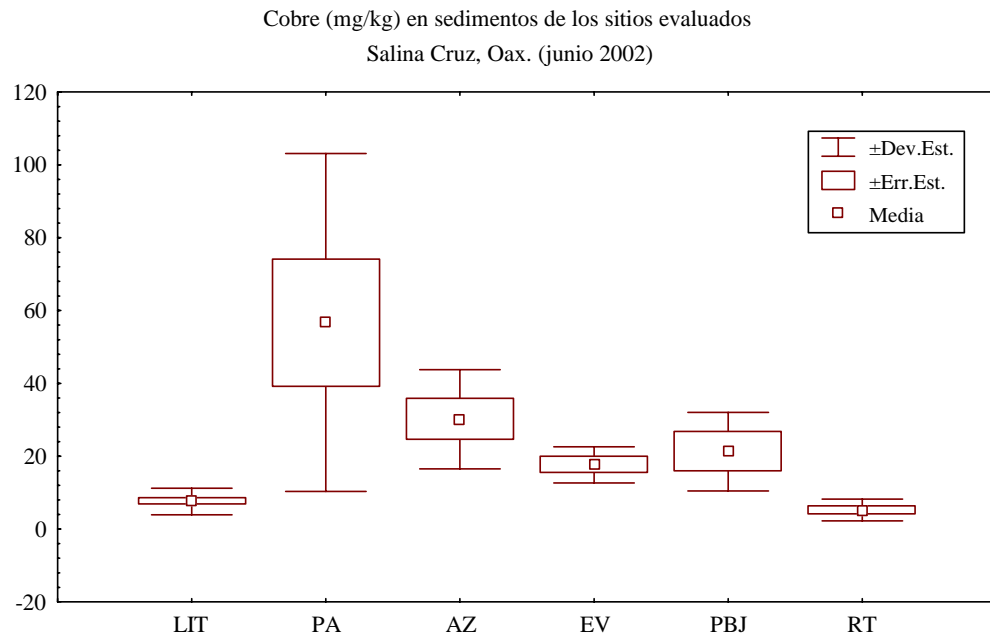


Figura 18 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del cobre en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

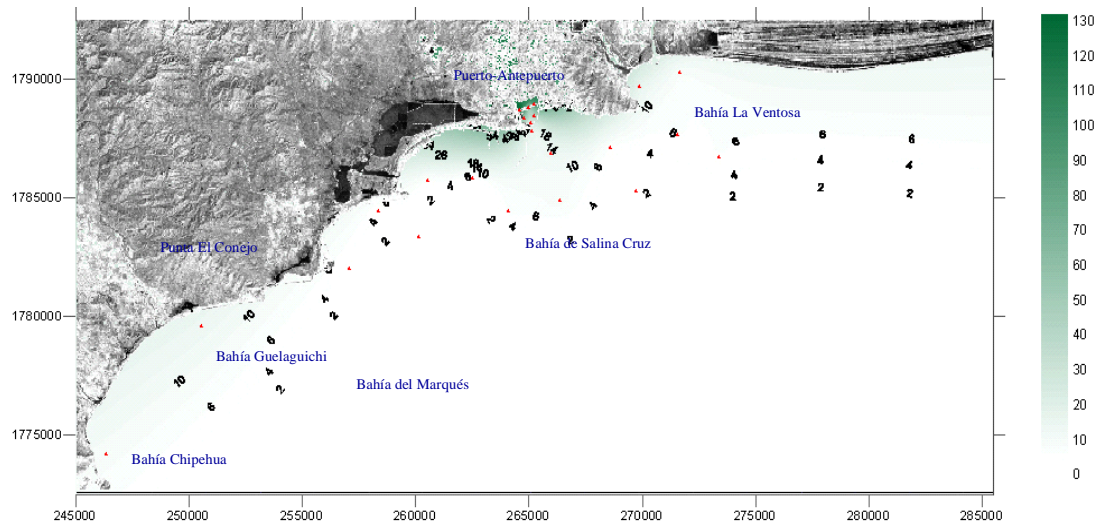
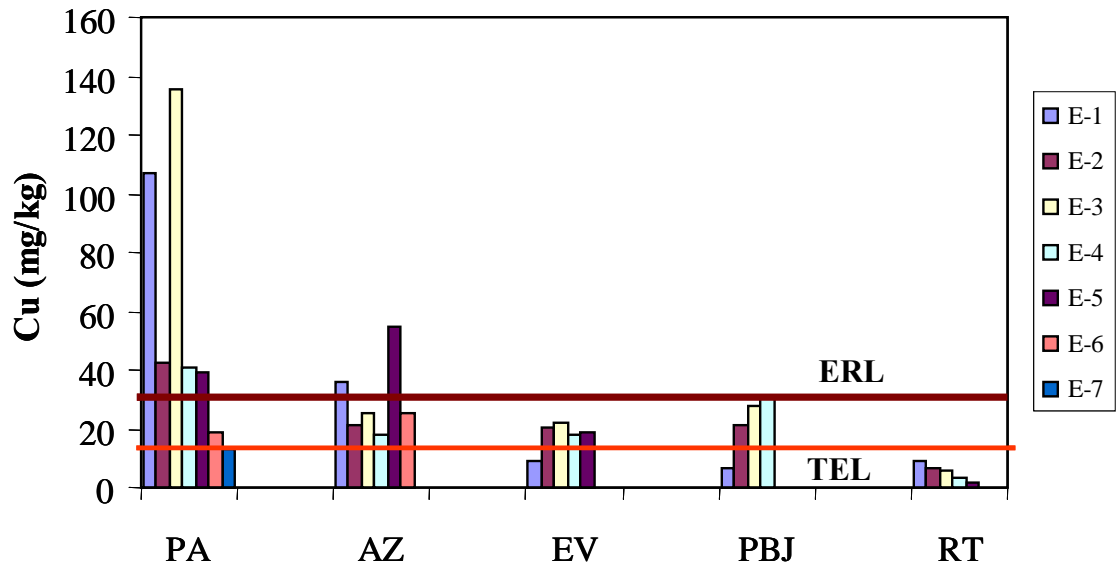


Figura 19 Distribución de las concentraciones del cobre por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

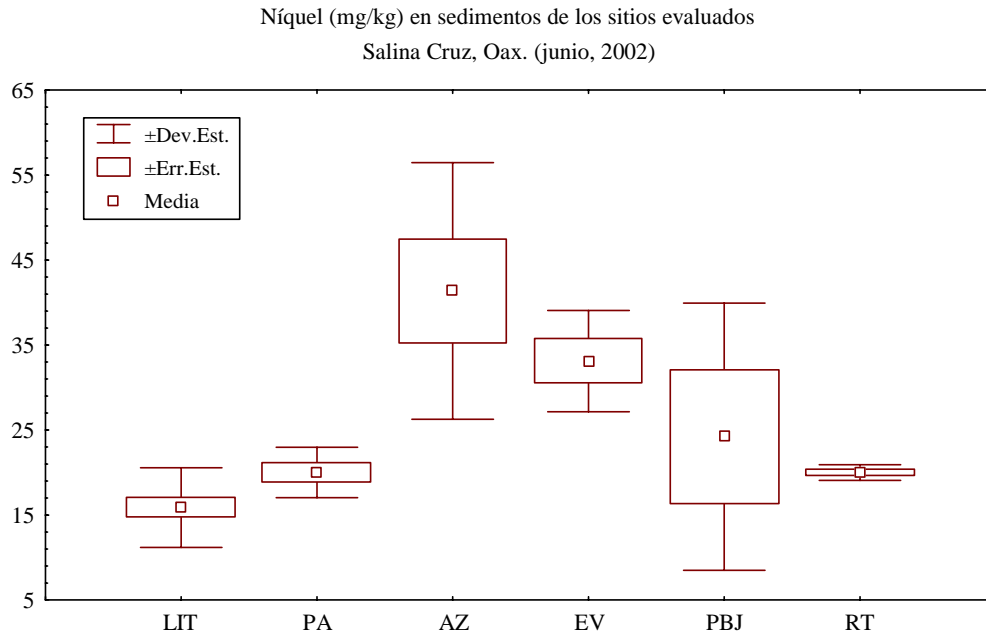


Figura 20 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del níquel en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

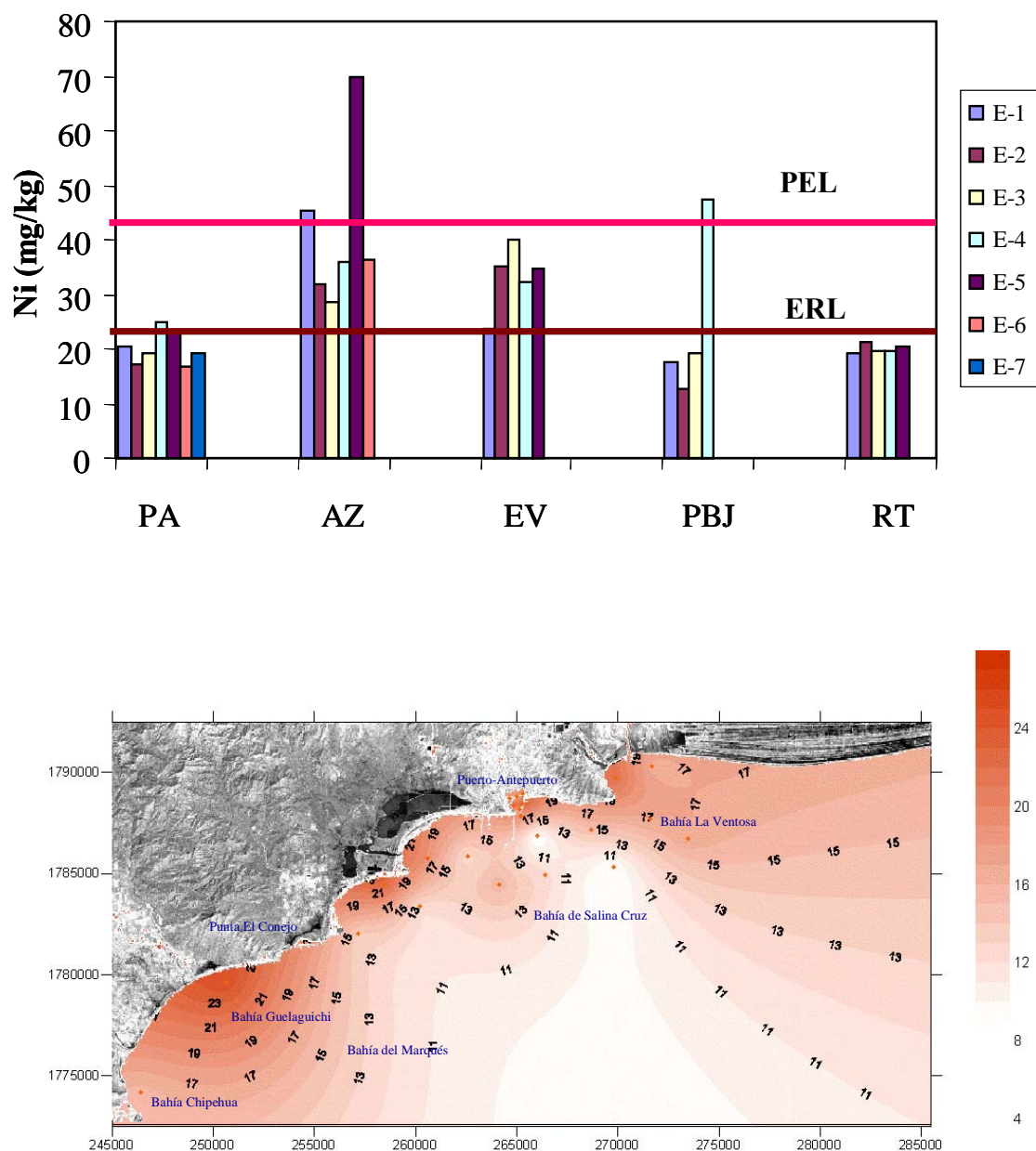


Figura 21 Distribución de las concentraciones del níquel por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

El vanadio obtuvo los valores promedio más bajos en el PA y RT así como la menor dispersión; el AZ y EV presentaron los promedios más altos (69.06 y 78.34 respectivamente), con una mayor dispersión para el primero. La PBJ registró un promedio de 24.72. El área del LIT presentó el promedio más bajo y baja dispersión de los valores (Figura 22).

Los valores nominales en el PA, AZ, EV, PBJ y RT fluctuaron entre 1.40 y 181.33 mg/kg; las concentraciones más elevadas fueron para el AZ, EV y PBJ (Figura 23). En el LIT los valores estuvieron entre 0.84 y 3.10 mg/kg, en este sitio los valores mayores se presentaron frente a la Bahía La Ventosa así como en las estaciones 11 y 12 frente a la bahía de Salina Cruz (Figura 23).

Los valores promedio más altos para el cromo fueron para el AZ y LIT con una mayor dispersión en el AZ. El PA y la PBJ obtuvieron un valor promedio semejante (25.28 y 23.72 respectivamente) con una mayor dispersión de los valores para la presa. EL EV obtuvo un valor promedio de 38.93 y el RT con el menor promedio (16.99) con una menor dispersión para este último (Figura 24). Los valores nominales en toda el área de estudio fluctuaron entre 5.0 y 79.86 mg/kg, en general las concentraciones más altas se registraron en el AZ y EV, así como en las estaciones 1-5 frente a la Bahía La Ventosa 7-11 frente a la Bahía de Salina Cruz del LIT (Figura 25).

El comportamiento estadístico del mercurio se muestra en la Figura 26 en los seis sitios evaluados, observándose un patrón similar para todos los sitios, con valores promedio entre 0.05 y 0.70 y una baja dispersión de los valores. El PA fue el sitio que obtuvo el promedio más alto (0.70) y una dispersión de los datos mayor. Los valores nominales obtuvieron concentraciones entre 0.02 y 2.18 mg/kg, este último se registró en el PA. En la zona del litoral el valor más alto se registró en la estación 8 situada en la Bahía de Salina Cruz frente al PA (Figura 27).

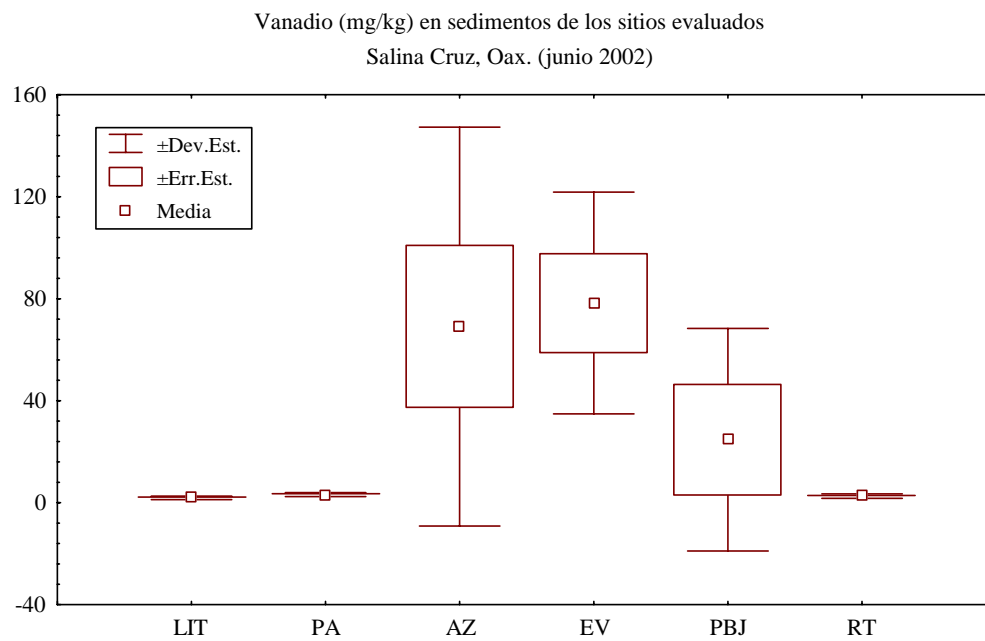


Figura 22 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del vanadio en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

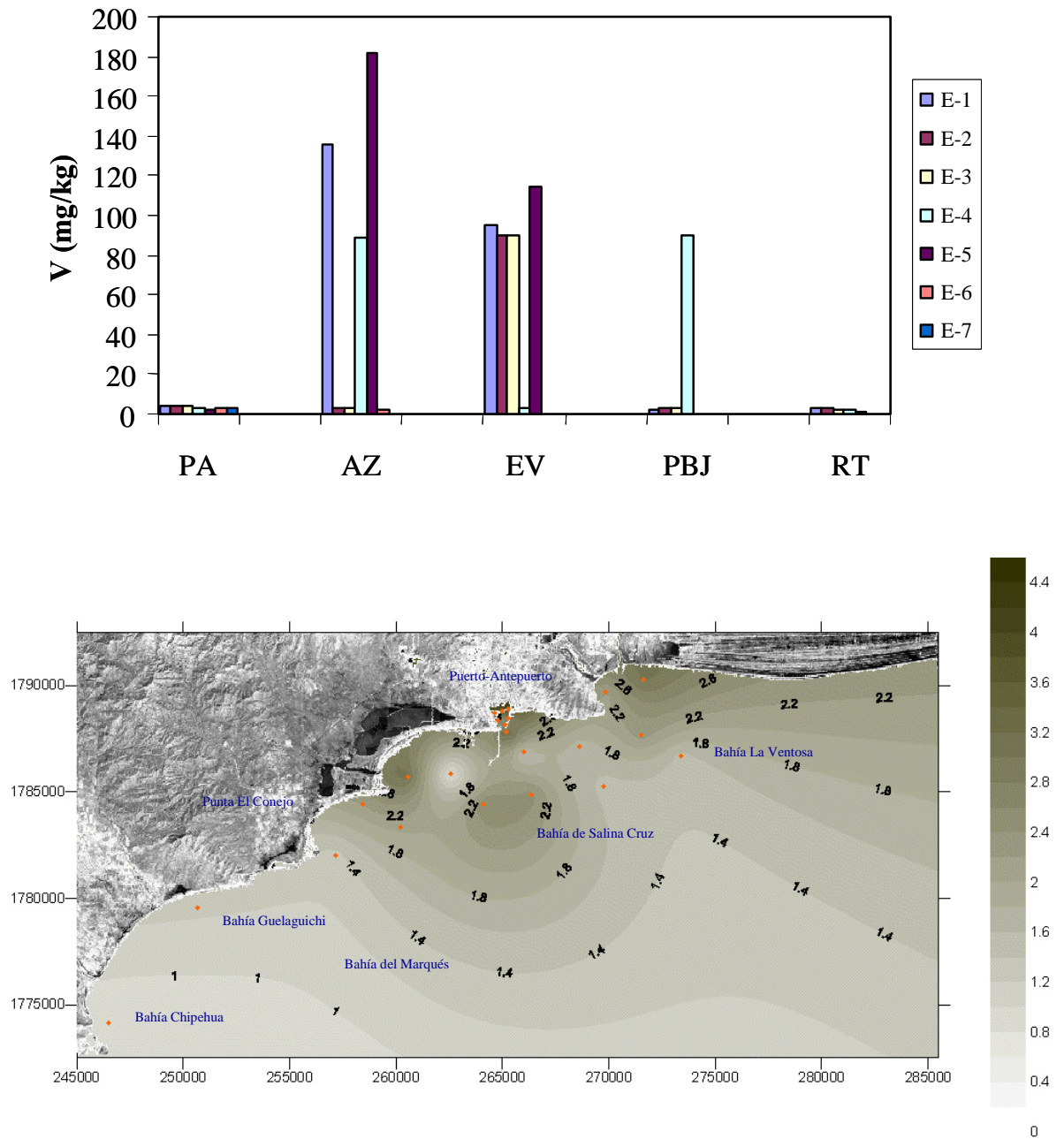


Figura 23 Distribución de las concentraciones del vanadio por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

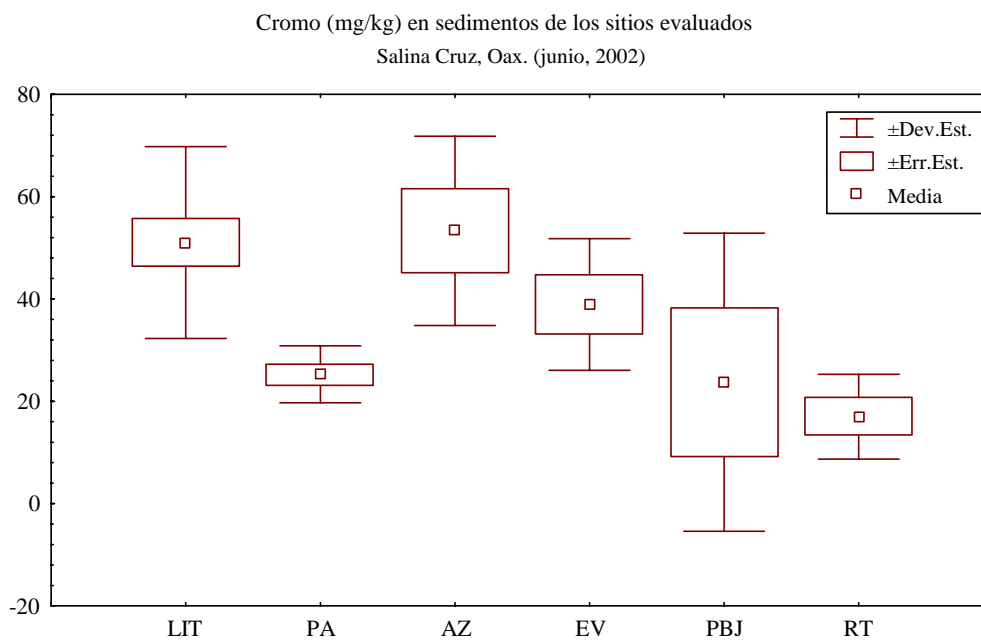


Figura 24 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del cromo en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

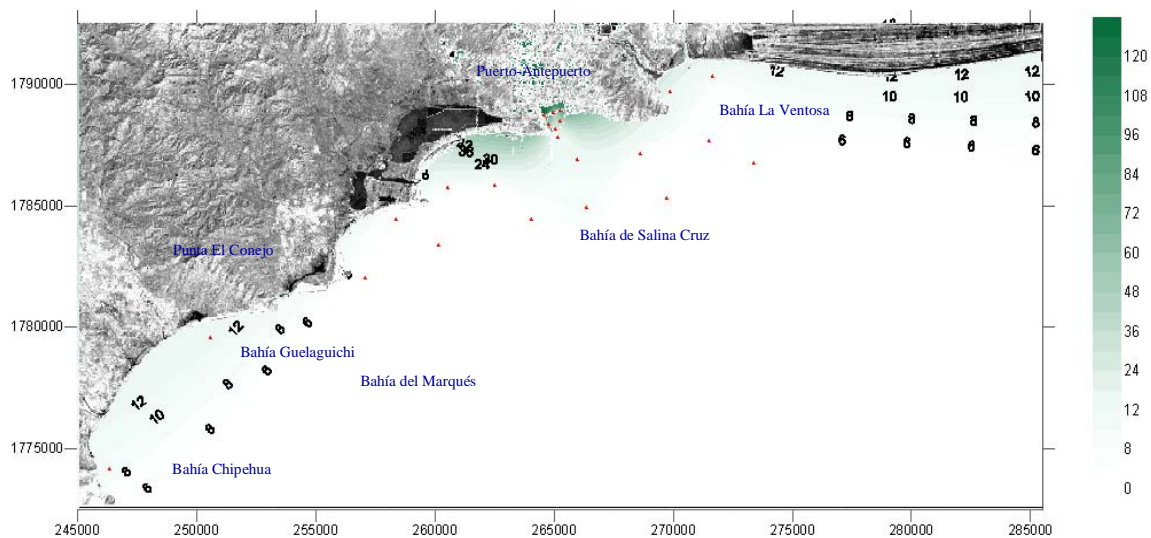
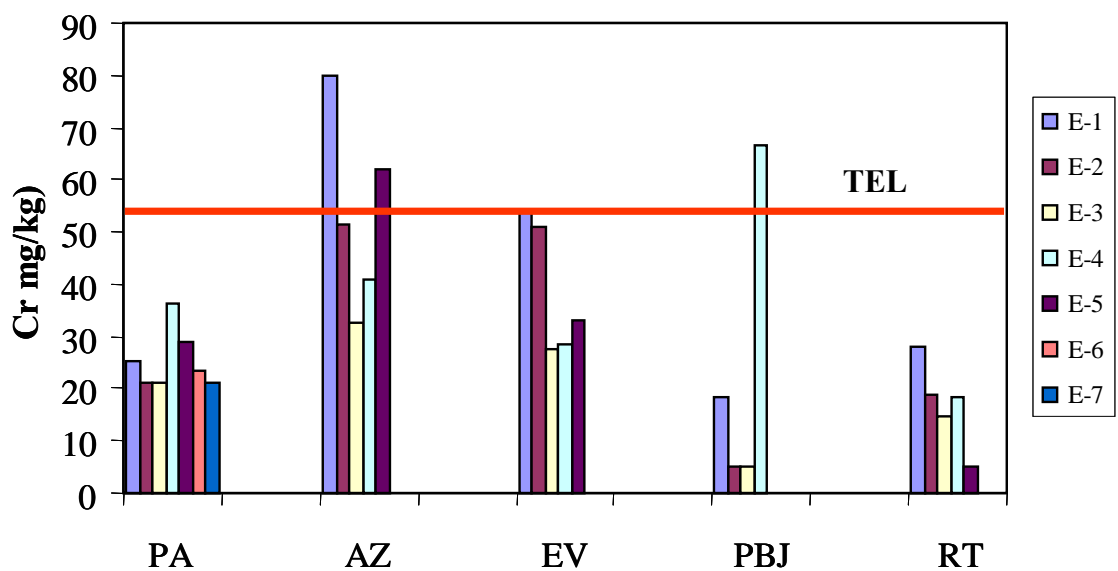


Figura 25 Distribución de las concentraciones del cromo por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

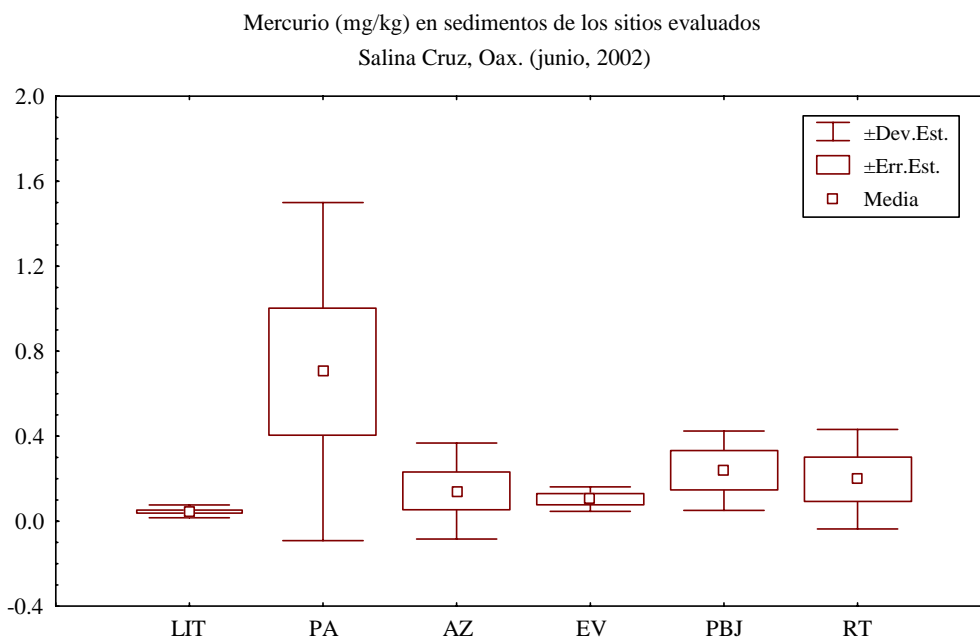


Figura 26 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del mercurio en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

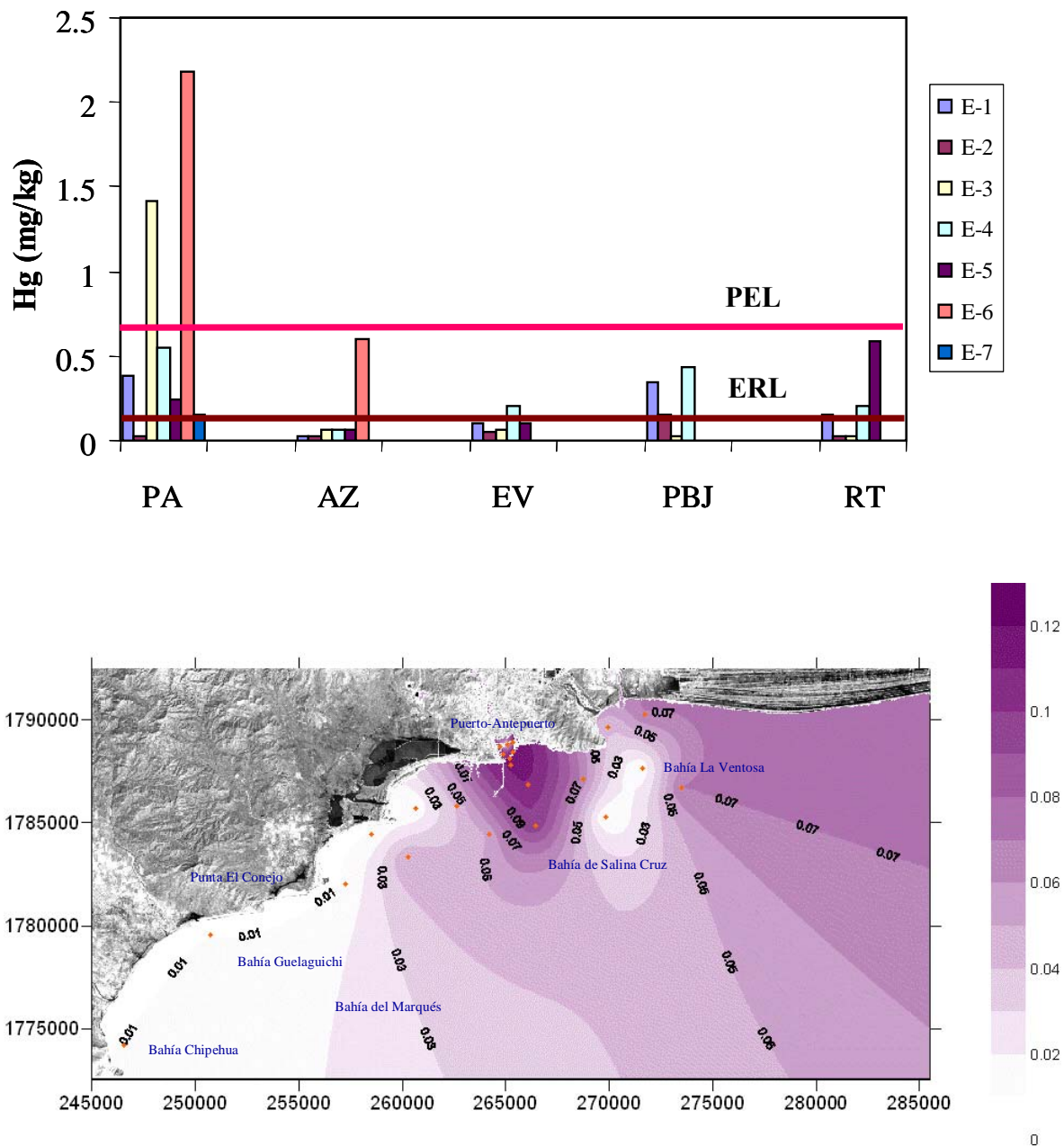


Figura 27 Distribución de las concentraciones del mercurio por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

En la Figura 28 se presenta el comportamiento estadístico del plomo en los seis sitios evaluados, observándose que el LIT, la PBJ y el RT obtuvieron una concentración promedio similar y una menor dispersión para la zona del litoral. El AZ y el EV presentaron un valor promedio semejante pero mayor a los sitios descritos anteriormente y una dispersión de los datos semejante y el PA obtuvo el promedio más alto así como la mayor dispersión de los valores.

Los valores nominales obtuvieron concentraciones entre 17.89 y 123.74 mg/kg para los cinco sitios que no corresponden al litoral, registrándose los más altos en el PA seguidos del AZ y disminuyendo hacia el EV. En la zona del litoral se obtuvieron concentraciones entre 12.84 y 38.43 los valores más altos se encontraron en las estaciones de la Bahía de Salina Cruz y Bahía del Marqués (Figura 29).

Para el caso del zinc el comportamiento fue el de presentar el valor promedio más alto para el PA disminuyendo para el AZ, EV, PBJ y el más bajo fue para el RT con las dispersiones más bajas para el EV y el RT y la mayor para el PA. El área del LIT obtuvo un valor promedio también bajo (58.0 mg/kg) y una baja dispersión (Figura 30).

Para este metal, los valores nominales fluctuaron entre 28.17 y 423.02 mg/kg, este último registrado en el PA en donde se obtuvieron las concentraciones más bajas así como la estación 5 del AZ. La zona del litoral obtuvo valores nominales entre 21.76 y 70.72 mg/kg, los valores más altos se presentaron en las estaciones de la bahía La Ventosa y la Bahía de Salina Cruz (Figura 31).

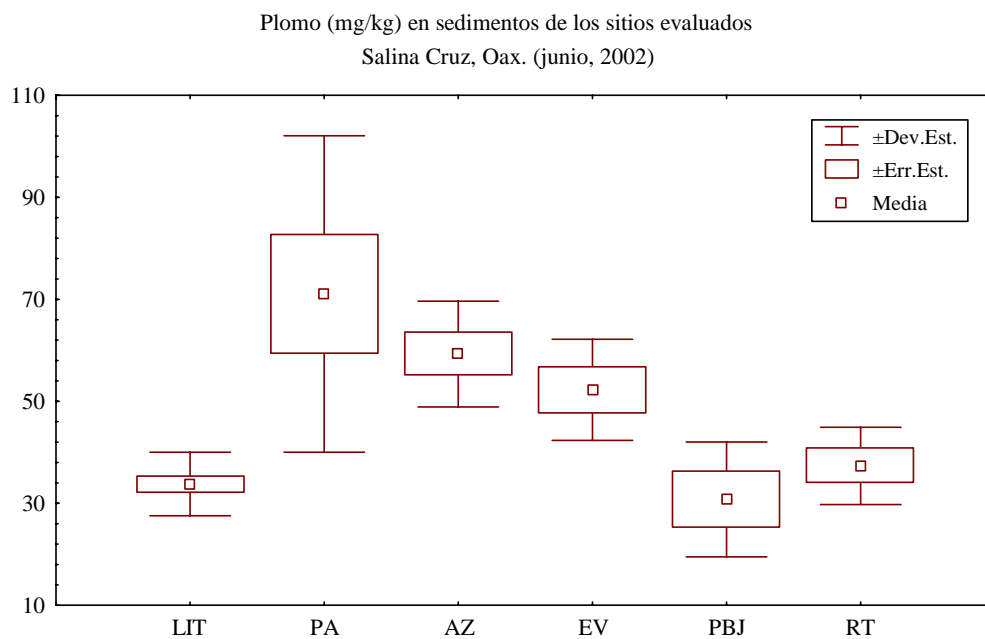


Figura 28 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del plomo en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

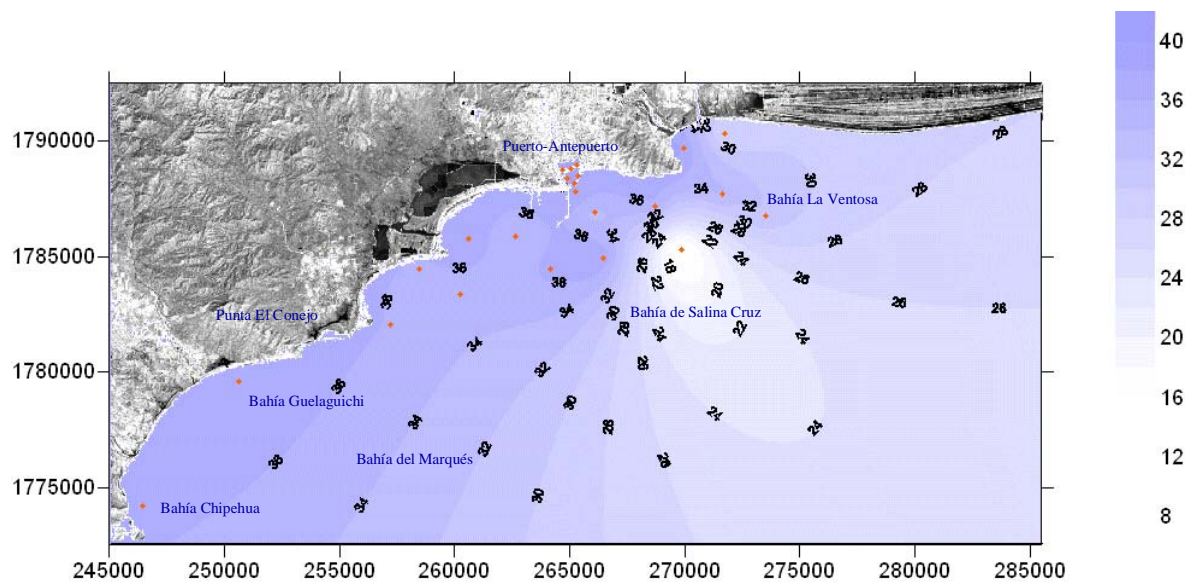
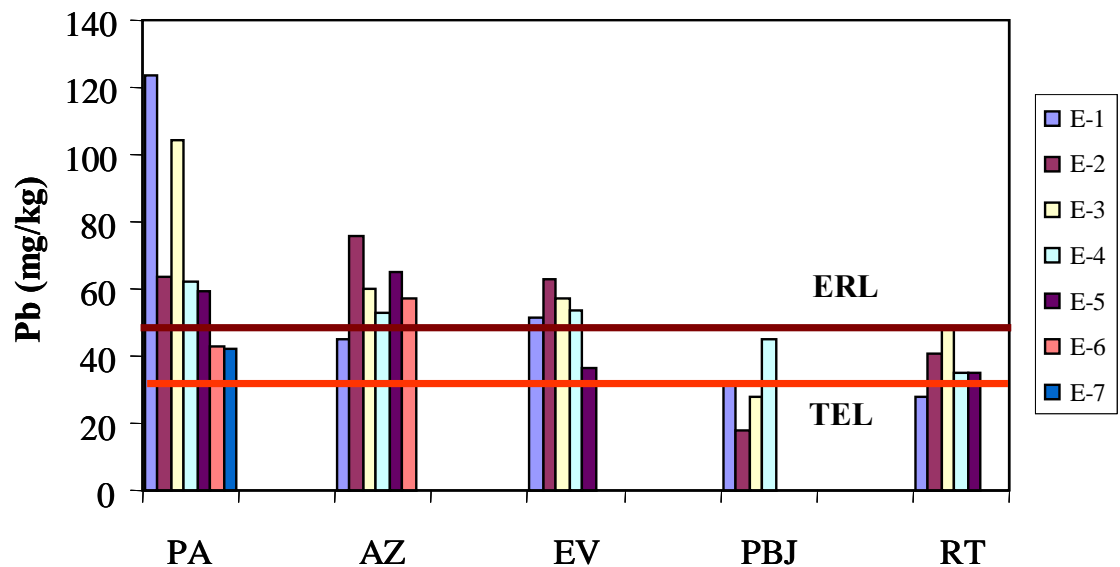


Figura 29 Distribución de las concentraciones del plomo por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

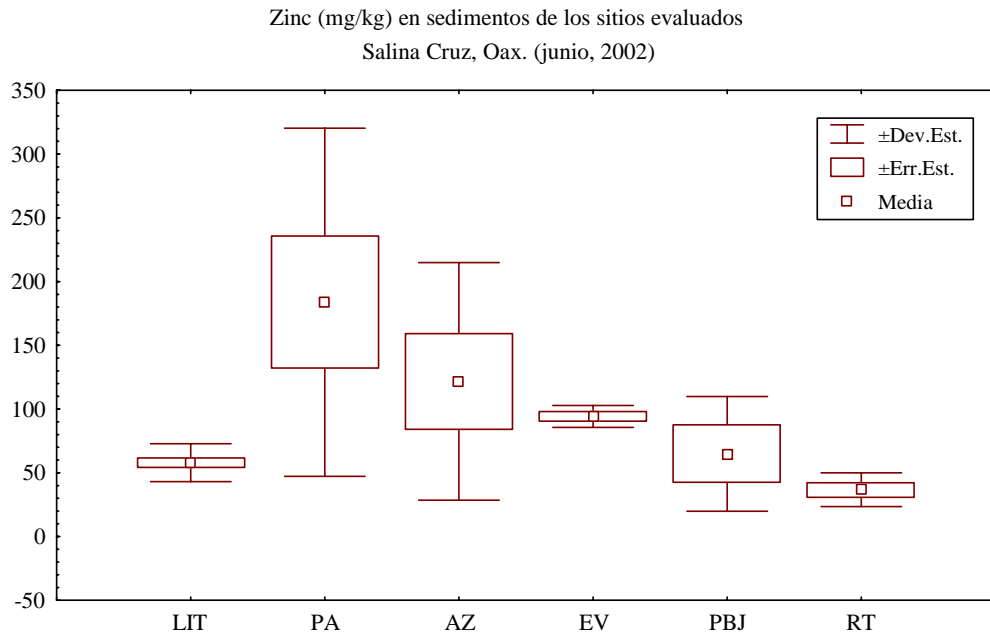


Figura 30 Diagrama de cajas que muestra los parámetros estadísticos del comportamiento del zinc en sedimento de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

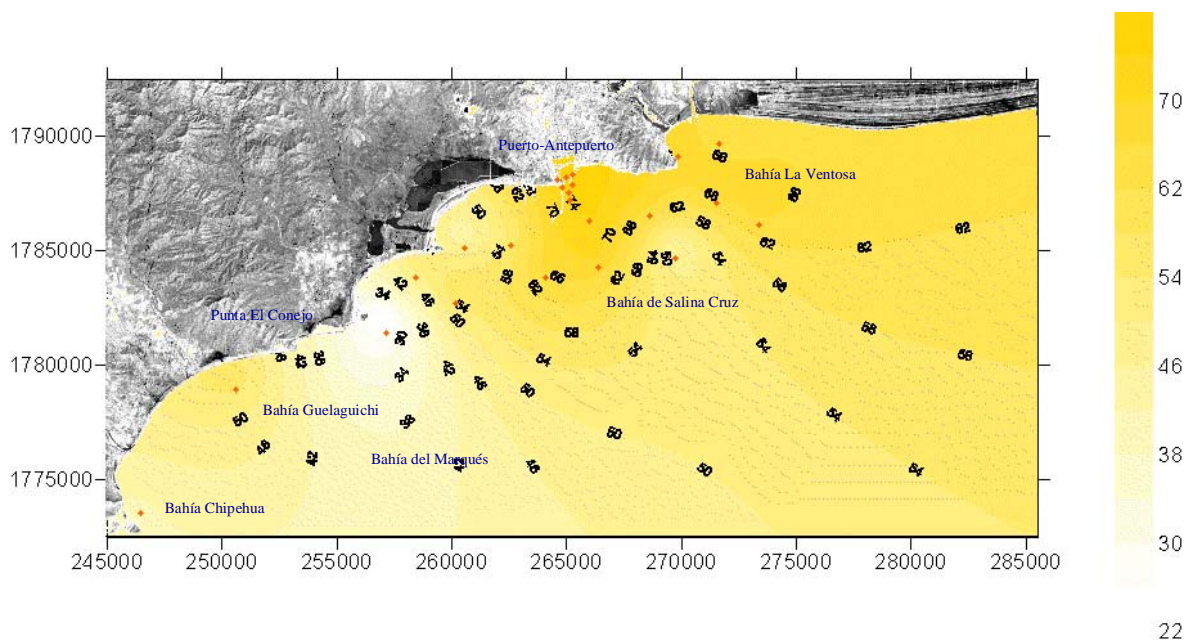
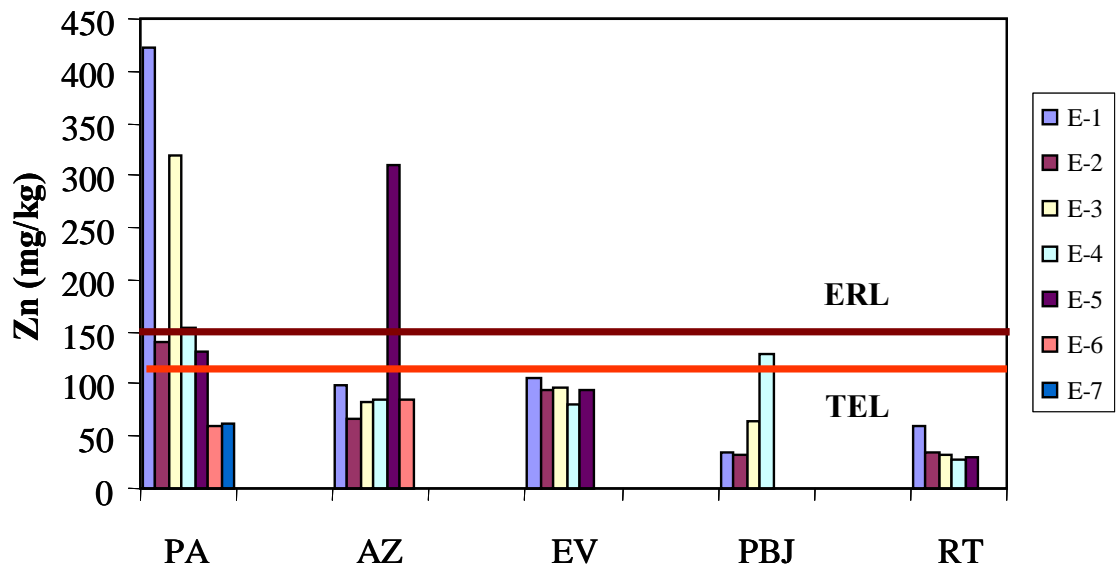


Figura 31 Distribución de las concentraciones del zinc por estación en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

En resumen, el comportamiento de los metales en la zona del litoral se presenta en el siguiente ordenamiento decreciente para los valores promedio Zn>Cr>Pb>Ni>Cu>V>As>Cd>Hg. Para el área del Puerto-Antepuerto se obtuvo el siguiente arreglo Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>As>V>Cd>Hg. En el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa se dio el siguiente orden Zn>V>Pb>Cr>Ni>Cu>As>Cd>Hg. Para la presa Benito Juárez se presentó el siguiente comportamiento Zn>Pb>V>Ni>Cr>Cu>As>Cd>Hg y finalmente para el río Tehuntepec fue Pb>Zn>Ni>Cr>As>Cu>Cd>V>Hg. A excepción de este último en los demás sistemas se conservó como el metal con un promedio más alto el zinc, de esta manera se puede decir que el zinc y el plomo fueron los metales con los valores más altos, en toda la zona de estudio. Las estaciones del puerto y antepuerto obtuvieron las concentraciones más altas de la mayoría de los metales y las más bajas se dieron en el área del litoral.

Índice de Geoacumulación

En la Tabla X se muestran los intervalos del Índice de Geoacumulación, indicando un color diferente para cada uno de ellos. En las tablas para cada sitio los resultados presentan el color de acuerdo a este índice.

De los nueve metales evaluados en el área del litoral de Salina Cruz, el 25 y 100 % de los valores de As y Cd, de acuerdo al Índice de Geoacumulación (Müller, 1979), obtuvieron la clasificación de no contaminados a fuertemente contaminados, y el 94 % de los valores de plomo fueron no contaminados (Tabla XI).

Para el caso del área del Puerto-Antepuerto el total de los valores de los metales As, Cd, Hg y Pb, obtuvieron una clasificación desde no contaminada hasta fuertemente contaminada y solamente la estación 6 correspondiente al antepuerto presentó la categoría de muy fuertemente contaminada. Para el Cu y Zn, dos y tres estaciones respectivamente presentaron la clasificación de moderadamente contaminada y para este último dos puntos fueron de moderadamente a fuertemente contaminadas (Tabla XI).

Para el Arroyo Zanjón, el mayor número de puntos para el As y Pb fue para la clasificación de moderadamente contaminada y solamente una estación para estos

mismos metales y el Hg, obtuvieron la categoría de moderadamente a fuertemente contaminadas. En la misma tabla se presentan la clasificación del Índice de Geoacumulación en el Estero Ventosa. Para el As y la mayoría de los puntos para el Pb así como un punto para el Hg fueron clasificadas como no contaminadas a moderadamente contaminadas. Para el Cd la mayoría fue fuertemente contaminada y sola una considerada entre moderadamente a fuertemente contaminada (Tabla XII).

Para la Presa Benito Juárez, el As obtuvo tres intervalos de la clasificación, desde moderadamente a fuertemente contaminada. El Cd presentó de fuertemente a muy fuertemente contaminada. El Hg, Pb y Zn obtuvieron en una o dos estaciones la categoría de no contaminada a moderadamente contaminada (Tabla XIII).

Finalmente en el Río Tehuantepec se obtuvo para el caso de los metales As, Hg y Pb en la mayoría de las estaciones para el primero y último la clasificación de no contaminada a fuertemente contaminada y todas las estaciones para el Cd, la clasificación de fuertemente contaminadas (Tabla XIII).

Como puede observarse el As, Cd y el Pb en las seis zonas y el Hg en cinco zonas obtuvieron alguna clasificación dentro del Índice de Geoacumulación de no contaminada a muy fuertemente contaminada, en tanto que el Zn y el Cu solamente en una o dos áreas. El puerto y antepuerto fue el sitio en que de los nueve metales, seis presentaron dicha clasificación, en tanto que la zona del litoral los metales As, Cd y Pb fueron los únicos que estuvieron altos. Los metales Cr y V por sus valores no entraron en ninguna de las categorías.

Tabla X Índice de geoacumulación calculada de acuerdo a la ecuación (1).

Intensidad de la contaminación de acuerdo al Índice de geo-acumulación (Muller, 1979).			
	I_{geo}	Clase	Intensidad de la contaminación
	> 5	6	Muy fuertemente contaminada
	4-5	5	Fuertemente a muy fuertemente contaminada
	3-4	4	Fuertemente contaminada
	2-3	3	Moderadamente a Fuertemente contaminada
	1-2	2	Moderadamente contaminada
	0-1	1	No contaminada a Moderadamente contaminada
	< 0	0	No contaminada

Ecuación (1) $I_{geo} = \log ([M]_i / (1.5([M]_r))$, donde $[M]_i$ y $[M]_r$

Tabla XI Índice de Geoacumulación para cada metal en sedimentos superficiales del litoral y Puerto Antepuerto de Salina Cruz, Oax.

Litoral de Salina Cruz
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	1.36	0.50	42.89	8.19	0.07	16.57	27.69	3.05	62.39
2	0.77	1.43	71.52	15.54	0.04	21.93	38.43	2.17	69.62
3	1.10	0.70	67.81	6.18	0.02	16.95	34.3	2.29	67.81
4	1.38	0.60	53.41	6.13	0.07	16.82	31.85	1.54	67.26
5	1.39	0.59	67.39	5.05	0.07	14.87	35.48	1.71	67.39
6	3.48	0.50	42.48	5.00	0.02	8.69	12.84	1.54	45.38
7	1.36	1.07	79.44	9.30	0.1	12.59	38.17	2.48	70.72
8	1.35	0.50	59.02	13.54	0.11	8.71	33.18	1.57	83.2
9	0.96	0.76	51.61	5.00	0.04	12.42	33.83	0.84	54.47
10	1.21	0.74	66.07	6.79	0.05	15.82	36.57	2.57	67.00
11	1.42	0.66	64.41	5.00	0.05	12.31	34.76	2.06	57.78
12	2.88	1.90	33.65	5.89	0.02	18.97	37.95	3.10	42.94
13	2.94	1.97	41.42	3.75	0.02	23.27	35.5	2.2	52.27
14	2.16	1.68	8.61	3.66	0.02	13.75	35.91	1.32	21.76
15	2.61	2.25	39.43	13.24	0.02	24.88	37.74	1.25	56.33
16	2.86	2.23	27.35	8.90	0.02	15.48	36.62	0.85	41.72

PUERTO Y ANTEPUERTO
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	10.06	2.38	25.06	107.19	0.38	20.51	123.74	4.20	423.02
2	3.77	2.10	21.15	42.50	0.02	16.96	63.25	3.80	139.68
3	6.08	3.30	21.19	135.72	1.41	18.99	104.04	3.70	319.81
4	7.15	3.06	36.13	41.00	0.55	24.95	62.31	2.70	152.92
5	4.48	3.03	28.83	38.8	0.24	22.67	59.03	1.96	129.98
6	2.87	2.70	23.55	19.09	2.18	16.85	42.83	2.63	58.65
7	2.86	2.98	21.03	12.70	0.15	19.14	42.15	3.45	62.49

Tabla XII Índice de Geoacumulación para cada metal sedimentos superficiales en el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa en Salina Cruz, Oax

ARROYO ZANJÓN

(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	8.77	3.89	79.86	36.14	0.02	45.32	45.32	135.77	97.73
2	7.33	3.48	51.64	21.25	0.02	31.98	75.47	2.80	67.53
3	6.85	3.83	32.38	25.51	0.07	28.45	60.24	3.20	83.39
4	6.12	3.8	40.96	18.04	0.07	36.08	52.56	88.74	85.81
5	15.02	4.28	61.77	55.00	0.07	69.94	64.76	181.33	310.85
6	7.75	4.38	36.87	25.01	0.6	36.37	57.20	2.50	84.70

ESTERO LA VENTOSA

(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	7.72	4.92	54.38	9.28	0.10	23.64	51.45	95.17	104.58
2	6.28	4.53	51.18	20.37	0.05	34.94	62.79	89.55	93.49
3	7.42	4.66	27.76	22.21	0.07	39.86	56.92	90.23	97.17
4	6.75	4.35	28.30	17.69	0.20	32.34	53.87	5.00	80.86
5	6.49	4.60	33.04	18.62	0.10	34.75	36.25	114.15	95.12

Tabla XIII Índice de Geoacumulación para cada metal en sedimentos superficiales en la Presa “Benito Juárez” y el Río Tehuantepec en Salina Cruz, Oax.

PRESA BENITO JUAREZ

(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	15.36	4.87	18.50	6.23	0.35	17.52	31.83	4.60	35.05
2	5.22	4.55	5.00	20.86	0.15	12.85	17.89	3.20	31.63
3	6.85	4.81	5.00	27.77	0.02	19.03	28.16	2.60	63.78
4	10.58	5.25	66.38	30.22	0.43	47.46	45.18	90.17	128.81

RIO TEHUANTEPEC

(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	9.96	3.49	27.96	9.09	0.15	19.17	27.66	2.01	59.90
2	7.09	3.55	18.75	6.71	0.02	21.41	40.56	0.35	35.55
3	6.89	4.53	14.77	5.71	0.02	19.39	48.13	1.93	31.50
4	5.12	4.66	18.46	3.30	0.21	19.62	35.06	1.54	28.17
5	4.14	4.56	5.00	1.39	0.59	20.41	35.27	1.53	28.73

En la Figura 32 se muestra el índice de geoacumulación para el cadmio que fue el metal que en todas las estaciones de todos los sitios presentaron una clasificación de moderadamente contaminada dentro de este índice y a excepción del área del litoral, los demás sitios obtuvieron la clasificación de fuertemente contaminada.

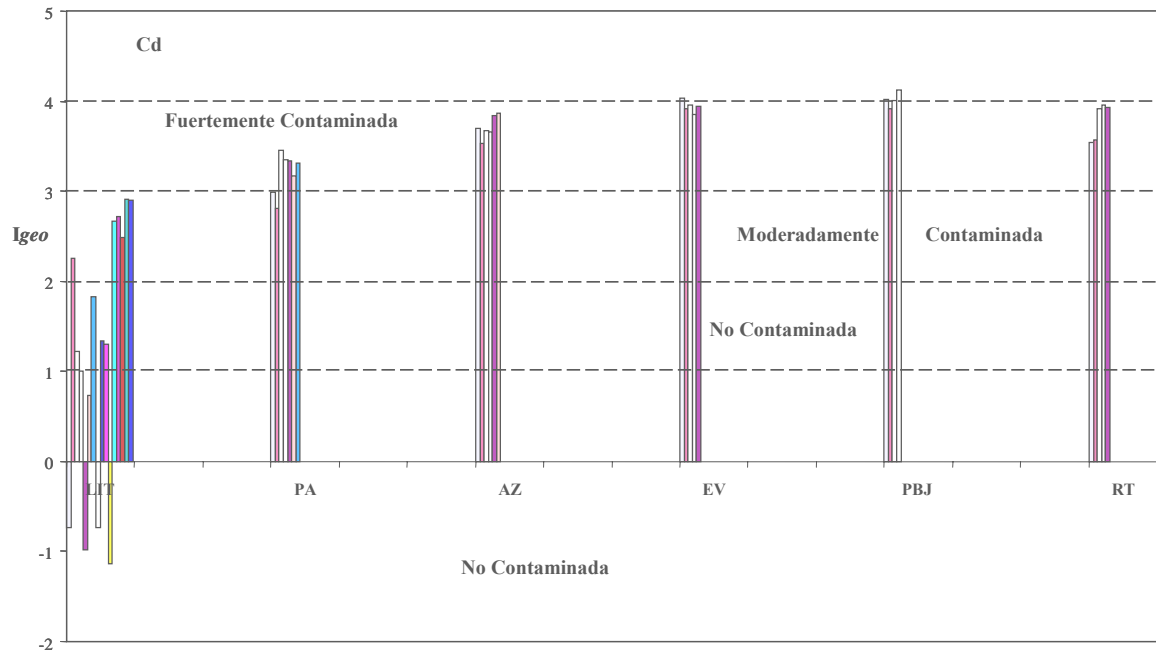


Figura 32 Índice de Geoacumulación del cadmio en sedimento superficial de los sitios evaluados en Salina Cruz, Oax.

Comparación de los metales con las concentraciones de las guías de calidad de sedimentos

En guías internacionales para calidad del sedimento según su efecto tóxico en animales y plantas, se han propuesto dos valores, el ERL o nivel de efectos de rango bajo, y el ERM o nivel de efectos de rango medio (Long *et al.*, 1995). En la Tabla XIV, se presentan los valores para cada metal de acuerdo al criterio ERL y ERM.; de esta manera, los metales con un asterisco representan los que superan alguno de estos criterios.

De los nueve metales evaluados en el área del litoral de Salina Cruz seis estaciones para el Cd y tres para el Ni obtuvieron valores mayores a los criterios ERL y ninguno sobrepasó el criterio ERM. Para el caso del área del Puerto-Antepuerto todas las estaciones para los metales Cd y Hg, cinco de siete estaciones para el Cu y Pb, así como tres para Zn, dos para Ni y una para As obtuvieron valores mayores a los criterios ERL y ninguno sobrepasó el criterio ERM (Tabla XV).

Para el Arroyo Zanjón, todas las estaciones sobrepasaron el criterio ERL para los metales Cd, Ni y Pb como se observa en la Tabla XVI, y para el As, Cu, Hg y Zn, una o dos estaciones superaron dicho criterio.

En el Estero La Ventosa, el Cd así como el Ni y Pb en la mayoría de las estaciones sobrepasaron el criterio de ERL y el Hg en solamente una estación (Tabla XVI).

Para la Presa Benito Juárez, solamente para el caso del Cd todas las estaciones sobrepasaron el criterio ERL. Para el As y Hg dos y tres estaciones respectivamente y una estación para Ni también lo superaron. En el Río Tehuantepec el Cd en todas las estaciones superó el criterio ERL y tres estaciones para el Hg y una para el As, Ni y Pb (Tabla XVII).

Los sitios en que el mayor número de metales (siete) excedieron el criterio ERL fueron el puerto y antepuerto así como el Arroyo Zanjón. El Río Tehuantepec cinco metales, el Estero La Ventosa y la presa Benito Juárez cuatro metales y solamente dos en el área litoral sobrepasaron dicho criterio.

Tabla XIV Criterios de efecto de rango bajo (ERL) y efecto de rango medio (ERM) para metales en sedimentos (Long *et al.*, 1995).

Criterio	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
ERL	8.2	1.2	81	34	0.15	20.9	46.7	150
ERM	70	9.6	370	270	0.71	52	218	410

Tabla XV Metales que superaron los criterios ERL y ERM en el litoral y Puerto-Antepuerto de Salina Cruz, Oax.

Litoral de Salina Cruz
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	1.36	0.50	42.89	8.19	0.07	16.57	27.69	3.05	62.39
2	0.77	1.43*	71.52	15.54	0.04	21.93*	38.43	2.17	69.62
3	1.10	0.70	67.81	6.18	0.02	16.95	34.30	2.29	67.81
4	1.38	0.60	53.41	6.13	0.07	16.82	31.85	1.54	67.26
5	1.39	0.59	67.39	5.05	0.07	14.87	35.48	1.71	67.39
6	3.48	0.50	42.48	5.00	0.02	8.69	12.84	1.54	45.38
7	1.36	1.07	79.44	9.30	0.10	12.59	38.17	2.48	70.72
8	1.35	0.50	59.02	13.54	0.11	8.71	33.18	1.57	83.2
9	0.96	0.76	51.61	5.00	0.04	12.42	33.83	0.84	54.47
10	1.21	0.74	66.07	6.79	0.05	15.82	36.57	2.57	67.00
11	1.42	0.66	64.41	5.00	0.05	12.31	34.76	2.06	57.78
12	2.88	1.90*	33.65	5.89	0.02	18.97	37.95	3.10	42.94
13	2.94	1.97*	41.42	3.75	0.02	23.27*	35.50	2.20	52.27
14	2.16	1.68*	8.61	3.66	0.02	13.75	35.91	1.32	21.76
15	2.61	2.25*	39.43	13.24	0.02	24.88*	37.74	1.25	56.33
16	2.86	2.23*	27.35	8.90	0.02	15.48	36.62	0.85	41.72

PUERTO Y ANTEPUERTO
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	10.06*	2.38*	25.06	107.19*	0.38*	20.51	123.74*	4.2	423.02*
2	3.77	2.10*	21.15	42.50*	0.02	16.96	63.25*	3.8	139.68
3	6.08	3.30*	21.19	135.72*	1.41*	18.99	104.04*	3.7	319.81*
4	7.15	3.06*	36.13	41.00*	0.55*	24.95*	62.31*	2.7	152.92*
5	4.48	3.03*	28.83	38.80*	0.24*	22.67*	59.03*	1.96	129.98
6	2.87	2.70*	23.55	19.09	2.18*	16.85	42.83	2.63	58.65
7	2.86	2.98*	21.03	12.7	0.15*	19.14	42.15	3.45	62.49

Tabla XVI Metales que superaron los criterios ERL y ERM en el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa de Salina Cruz, Oax.

ARROYO ZANJÓN
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	8.77*	3.89*	79.86	36.14*	0.02	45.32*	45.32	135.77	97.73
2	7.33	3.48*	51.64	21.25	0.02	31.98*	75.47*	2.80	67.53
3	6.85	3.83*	32.38	25.51	0.07	28.45*	60.24*	3.20	83.39
4	6.12	3.80*	40.96	18.04	0.07	36.08*	52.56*	88.74	85.81
5	15.02*	4.28*	61.77	55.00*	0.07	69.94*	64.76*	181.33	310.85*
6	7.75	4.38*	36.87	25.01	0.60*	36.37*	5720*	2.50	84.70

ESTERO LA VENTOSA
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	7.72	4.92*	54.38	9.28	0.10	23.64*	51.45*	95.17	104.58
2	6.28	4.53*	51.18	20.37	0.05	34.94*	62.79*	89.55	93.49
3	7.42	4.66*	27.76	22.21	0.07	39.86*	56.92*	90.23	97.17
4	6.75	4.35*	28.30	17.69	0.20*	32.34*	53.87*	2.60	80.86
5	6.49	4.60*	33.04	18.62	0.10	34.75*	36.25	114.15	95.12

Tabla XVII Metales que superaron los criterios ERL y ERM en la Presa “Benito Juárez” y el Río Tehuantepec en Salina Cruz, Oax.

PRESA BENITO JUAREZ
mg/kg de peso seco

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	15.36*	4.87*	18.50	6.23	0.35*	17.52	31.83	4.60	35.05
2	5.22	4.55*	5.00	20.86	0.15*	12.85	17.89	3.20	31.63
3	6.85	4.81*	5.00	27.77	0.02	19.03	28.16	2.60	63.78
4	10.58*	5.25*	66.38	30.22	0.43*	47.46*	45.18	90.17	128.81

RIO TEHUANTEPEC
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	9.96*	3.49*	27.96	9.09	0.15*	19.17	27.66	2.01	59.90
2	7.09	3.55*	18.75	6.71	0.02	21.41*	40.56	0.35	35.55
3	6.89	4.53*	14.77	5.71	0.02	19.39	48.13*	1.93	31.50
4	5.12	4.66*	18.46	3.30	0.21*	19.62	35.06	1.54	28.17
5	4.14	4.56*	5.00	1.39	0.59*	20.41	35.27	1.53	28.73

Por otro lado, las concentraciones de los nueve metales también fueron comparadas con los valores de nivel de efecto umbral/nivel de efecto probable (TELS/PELs) para sedimentos de aguas costeras marinas, estuarios y de agua dulce de acuerdo a las Guías de Calidad de Sedimentos (Long y MacDonald, 1998, Smith *et al.*, 1966). En la Tabla XVIII, se presentan los valores para cada metal de acuerdo a estos criterios.

Los efectos de umbral (TELS) representan el nivel por debajo del cual es de esperarse que rara vez ocurran efectos adversos. Los niveles de efecto probable (PELs) corresponden a las concentraciones por encima de las cuales deben esperarse efectos adversos frecuentes. Estos niveles representan las concentraciones mínimas en las que se observa un efecto del contaminante sobre un organismo (NOAA, 1999).

De esta manera para el área del litoral el Cd en 10 estaciones, el Cr en ocho estaciones, el Ni en siete y el Pb en 15 estaciones se encontraron por arriba del límite del TEL (Tabla XIX).

Tabla XVIII Criterios de TEL y PEL (Long y MacDonald, 1998 y Smith et al., 1966).

Criterio	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
TEL	7.24	0.68	52.3	18.7	0.13	15.9	30.2	124
PEL	41.6	4.21	160	108	0.70	42.8	112	271

Tabla XIX Metales que superaron los criterios TEL y PEL en el litoral y Puerto Antepuerto de Salina Cruz, Oax.

LITORAL DE SALINA CRUZ
(mg/kg de peso seco)

Est.	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	1.36	0.50	42.89	8.19	0.07	16.57*	27.69	3.05	62.39
2	0.77	1.43*	71.52*	15.54	0.04	21.93*	38.43*	2.17	69.62
3	1.1	0.70*	67.81*	6.18	0.02	16.95*	34.30*	2.29	67.81
4	1.38	0.60	53.41*	6.13	0.07	16.82*	31.85*	1.54	67.26
5	1.39	0.59	67.39*	5.05	0.07	14.87	35.48*	1.71	67.39
6	3.48	0.50	42.48	5.00	0.02	8.69	12.84	1.54	45.38
7	1.36	1.07*	79.44*	9.30	0.10	12.59	38.17*	2.48	70.72
8	1.35	0.50	59.02*	13.54	0.11	8.71	33.18*	1.57	83.2
9	0.96	0.76*	51.61	5.00	0.04	12.42	33.83*	0.84	54.47
10	1.21	0.74*	66.07*	6.79	0.05	15.82	36.57*	2.57	67.00
11	1.42	0.66	64.41*	5.00	0.05	12.31	34.76*	2.06	57.78
12	2.88	1.90*	33.65	5.89	0.02	18.97*	37.95*	3.10	42.94
13	2.94	1.97*	41.42	3.75	0.02	23.27*	35.5*	2.20	52.27
14	2.16	1.68*	8.61	3.66	0.02	13.75	35.91*	1.32	21.76
15	2.61	2.25*	39.43	13.24	0.02	24.88*	37.74*	1.25	56.33
16	2.86	2.23*	27.35	8.90	0.02	15.48	36.62*	0.85	41.72

PUERTO Y ANTEPUERTO
(mg/kg de peso seco)

Estación	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	10.06*	2.38*	25.06	107.19*	0.38*	20.51*	123.74*	4.20	423.02*
2	3.77	2.10*	21.15	42.50*	0.02	16.96*	63.25*	3.80	139.68*
3	6.08	3.30*	21.19	135.72*	1.41*	18.99*	104.04*	3.70	319.81*
4	7.15	3.06*	36.13	41.00*	0.55*	24.95*	62.31*	2.70	152.92*
5	4.48	3.03*	28.83	38.80*	0.24*	22.67*	59.03*	1.96	129.98*
6	2.87	2.70*	23.55	19.09*	2.18*	16.85*	42.83*	2.63	58.65
7	2.86	2.98*	21.03	12.70	0.15*	19.14*	42.15*	3.45	62.49

Tabla XX Metales que superaron los criterios TEL y PEL en el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa en Salina Cruz, Oax.

ARROYO ZANJÓN
(mg/kg de peso seco)

Estación	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	8.77*	3.89*	79.86*	36.14*	0.02	45.32*	45.32*	135.77	97.73
2	7.33*	3.48*	51.64	21.25*	0.02	31.98*	75.47*	2.80	67.53
3	6.85	3.83*	32.38	25.51*	0.07	28.45*	60.24*	3.20	83.39
4	6.12	3.80*	40.96	18.04	0.07	36.08*	52.56*	88.74	85.81
5	15.02*	4.28*	61.77*	55.00*	0.07	69.94*	64.76*	181.33	310.85*
6	7.75*	4.38*	36.87	25.01*	0.60*	36.37*	57.20*	2.50	84.70

ESTERO LA VENTOSA
(mg/kg de peso seco)

Estación	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	7.72*	4.92*	54.38*	9.28	0.10	23.64*	51.45*	95.17	104.58
2	6.28	4.53*	51.18	20.37*	0.05	34.94*	62.79*	89.55	93.49
3	7.42*	4.66*	27.76	22.21*	0.07	39.86*	56.92*	90.23	97.17
4	6.75	4.35*	28.30	17.69	0.20*	32.34*	53.87*	2.60	80.86
5	6.49	4.61*	33.04	18.62	0.10	34.75*	36.25*	114.15	95.12

Tabla XXI Metales que superaron los criterios TEL y PEL en la Presa y el Río Tehuantepec en Salina Cruz, Oax.

PRESA BENITO JUAREZ
(mg/kg de peso seco)

Estación	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	15.36*	4.87*	18.5	6.23	0.35*	17.52*	31.83*	2.20	35.05
2	5.22	4.55*	5.00	20.86*	0.15*	12.85	17.89	3.40	31.63
3	6.85	4.81*	5.00	27.77*	0.02	19.03*	28.16	3.10	63.78
4	10.58*	5.25*	66.38*	30.22*	0.43*	47.46*	45.18*	90.17	128.81*

RIO TEHUANTEPEC
(mg/kg de peso seco)

Estación	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
1	9.96*	3.49*	27.96	9.09	0.15*	19.17*	27.66	3.50	59.90
2	7.09	3.55*	18.75	6.71	0.02	21.41*	40.56*	3.30	35.55
3	6.89	4.53*	14.77	5.71	0.02	19.39*	48.13*	2.50	31.50
4	5.12	4.66*	18.46	3.30	0.21*	19.62*	35.06*	2.20	28.17
5	4.14	4.56*	5.00	1.39	0.59*	20.41*	35.27*	1.40	28.73

En las Figuras 15 y 17 se muestra las estaciones de los sitios que superaron los criterios ERL, ERM así como los criterios PEL y TEL, para el arsénico fueron seis las estaciones en los cinco sitios el criterio ERL, en tanto que para el cadmio todas las estaciones superaron este criterio. El TEL para el arsénico fue superado en ocho estaciones, mientras que el PEL en todas las estaciones del EV y la presa, dos del AZ y tres del río.

En las Figuras 19 y 21 se presentan los metales cobre y níquel en donde se muestra que cinco estaciones del PA y dos del AZ superaron el criterio ERL y a excepción del RT y una estación del estero y la presa, las demás superaron el criterio TEL para el cobre. Para el níquel todas las estaciones del AZ, EV y una estación de la presa superaron el ERL. Por otro lado, dos estaciones del AZ y una estación de la presa superaron el criterio PEL.

Para los metales cromo y mercurio, en las Figuras 25 y 27 se muestran las estaciones que superaron ambos criterios. El cromo solamente en dos estaciones del AZ y en una estación del EV y la PBJ se superó el criterio TEL. Para el mercurio en seis estaciones del PA, una estación en el AZ, EV y tres estaciones en la PBJ y RT rebasaron el criterio ERM y dos estaciones del PA superaron el criterio PEL.

Finalmente para el plomo, cinco estaciones del PA y AZ, cuatro para EV y una estación en el RT se encontraron por arriba del criterio ERL y a excepción de dos estaciones de la PBJ y una del RT, en las demás estaciones se superó el criterio TEL para el plomo. Para el zinc, cinco estaciones del PA y una estación del AZ y de la PBJ rebasaron el criterio TEL (Figuras 29 y 31). En las Tablas XIX, XX y XXI se muestra con un asterisco los metales que superaron los criterios TEL y PEL para cada sitio.

De esta manera, de los tres metales que presentaron un alto índice de geoacumulación y que superaron el valor ERL y TEL (Cd, Pb y Zn) se les determinó su FE para conocer su fuente (fuente natural o antropogénica). Se observa que el cadmio, plomo y zinc presentaron en cinco estaciones del litoral y en el área del Puerto-Antepuerto un factor de enriquecimiento superiores a la unidad; esto indica un aporte antropogénico de estos metales en esos sitios.

En la Tabla XXII se presentan las correlaciones significativas estadísticamente ($P < 0.01$) obtenidas entre contaminantes orgánicos, metales, materia orgánica y las características sedimentológicas para los diferentes sitios evaluados. En las áreas del Puerto-Antepuerto y la presa “Benito Juárez”, no se presentaron correlaciones significativas entre los parámetros.

Las correlaciones obtenidas entre las características granulométricas y los contaminantes orgánicos indicaron una relación importante en la zona costera y en el Río Tehuantepec. En sedimentos de la zona litoral se observa la presencia de dos núcleos de máxima concentración, ubicados fuera del área de influencia de las actividades petroleras, uno frente a playa Abierta y otro al Este frente a Salinas del Marqués, que siguen el patrón general de circulación de las aguas en dirección Este-Oeste. Se observa una franja de acumulación en la isobata de los 20 m, que coincide con el comportamiento del material orgánico extraíble.

Los altos niveles de algunos metales se correlacionan con las características granulométricas y la materia orgánica. En este sentido, la mayor concentración de materia orgánica encontrada en el Arroyo Zanjón, en algunas estaciones de la zona litoral, del estero y del Río Tehuantepec conjuntamente con las partículas finas en sus sedimentos en especial en las estaciones cinco y seis pudo haber influido en una mayor captación de los metales encontrados en este sitio.

Tabla XXII Correlaciones significativas de los parámetros evaluados en los sedimentos superficiales en los diferentes sitios de Salina Cruz, Oax. ($P < 0.01$).

Parámetros	Litoral	Arroyo Zanjón	Estero La Ventosa	Río Tehuantepec
HAT vs. Arcillas	0.67			
MOE vs. Arenas	-0.5			
MOE vs. Arcillas	0.65			
As vs. Arenas	0.55			
Cd vs. Arenas	0.7			
Cd vs. Limos	-0.7			
Cd vs. Finos	-0.69			
As vs. Materia Orgánica		0.95		
Cu vs. Materia Orgánica		0.97		
Ni vs. Materia Orgánica		0.89		
Zn vs. Materia Orgánica		0.94		
As vs. Finos			-0.99	
Cd vs. Finos			0.89	
Cr vs. Limos			-0.88	
Zn vs. Arcillas			-0.91	
Zn vs. Finos			0.93	
HAT vs. Arenas				-0.99
MOE vs. Arenas				-0.91
Zn vs. Arenas				-0.94
HAT vs. Limos				0.99
MOE vs. Limos				0.97
Zn vs. Limos				0.96
HAT vs. Arcillas				0.97
MOE vs. Arcillas				0.89
Zn vs. Arcillas				0.96
HAT vs. Materia Orgánica				0.97
Zn vs. Materia Orgánica				0.91
HAT vs. Finos				-0.99
MOE vs. Finos				-0.96
Zn vs. Finos				-0.97

3.3 Evaluación de la toxicidad

3.3.1 Bioensayos con *Vibrio fischeri* (*Microtox*; *Photobacterium phosphoreum*)

Los ensayos con elutriados o de la fase de partículas suspendidas se desarrollaron con el fin de evaluar el potencial a corto plazo del almacenamiento de dragados y disposición de aguas de desecho. Estas pruebas miden el potencial de liberación de compuestos del sedimento a la fase acuosa y la columna de agua por solubilidad. Para muchos invertebrados bentónicos, la toxicidad y bioacumulación de contaminantes asociados al sedimento como metales y compuestos orgánicos no ionizados se han correlacionado con las concentraciones presentes en el agua de poro (Ingersoll, 1995).

En las Figuras 33 a 35 se presentan los resultados de estos bioensayos. Los resultados del porcentaje de efecto fisiológico de la fase de partículas suspendidas sobre la capacidad de luminiscencia de la bacteria fueron negativos en algunos casos. De acuerdo con el análisis de toxicidad aguda aplicado a las muestras de sedimento, no se presentaron efectos sobre la luminiscencia de la bacteria *Vibrio fischeri*, los valores se encontraron dentro de los niveles de no efecto, y una disminución de la luminiscencia menor al 50 %.

Comparando los valores del porcentaje de efecto observado para cada muestra, los porcentajes más altos correspondieron a las estaciones 2 y 4 del Puerto-Antepuerto y a las estaciones 5 y 6 del Arroyo Zanjón, con un efecto del 45 y 48% de las muestras a los 15 minutos, respectivamente, siendo el único valor positivo de efecto registrado, este efecto aparentemente, de acuerdo a este bioensayo no representa riesgo ambiental de manera aguda hacia la biota del sitio (Figuras 33-35).

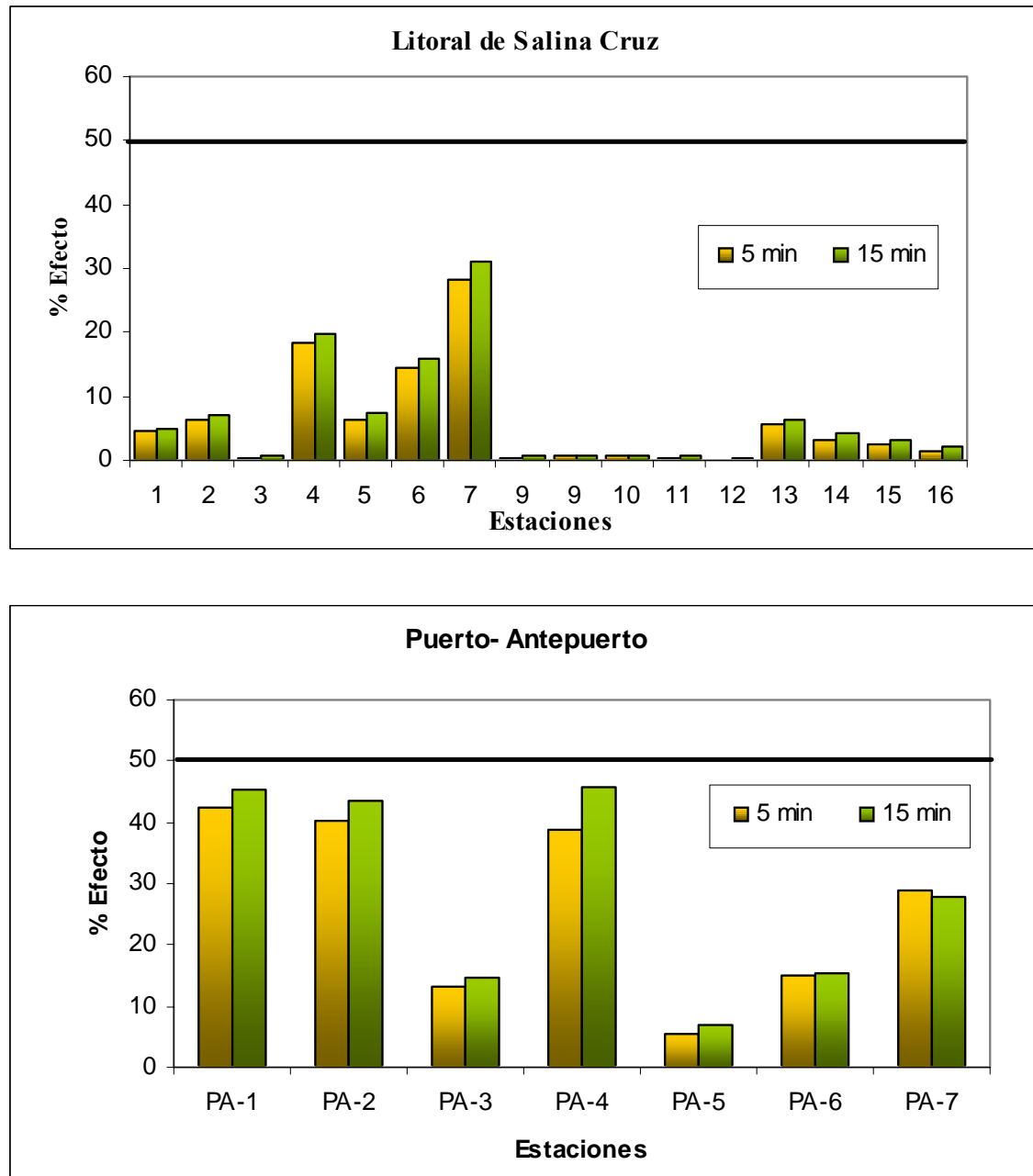


Figura 33 Promedio del Porcentaje de Efecto en sedimentos del Puerto-Antepuerto y litoral de la región de Salina Cruz, Oax.

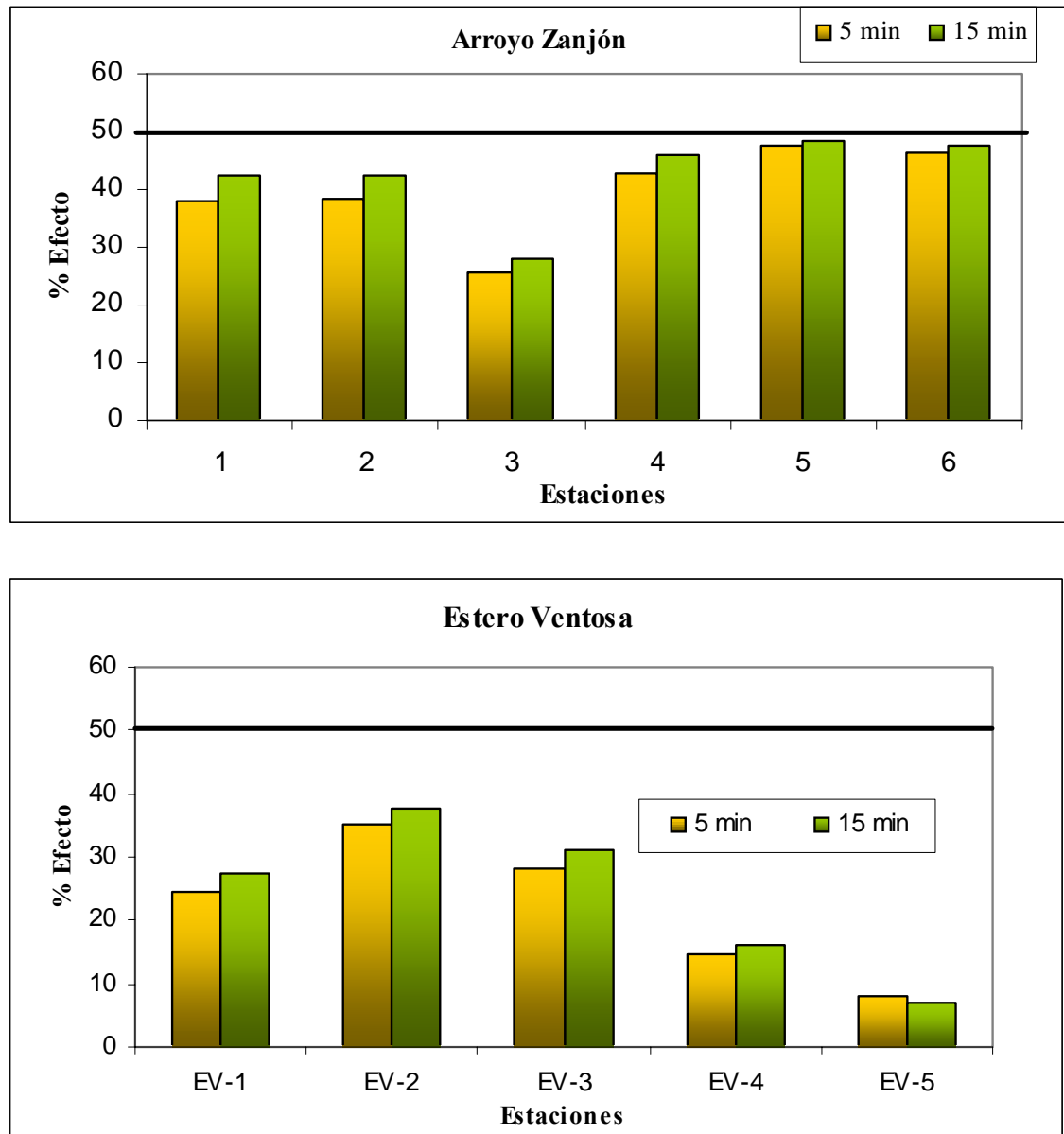


Figura 34 . Promedio del Porcentaje de Efecto de sedimentos del Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax.

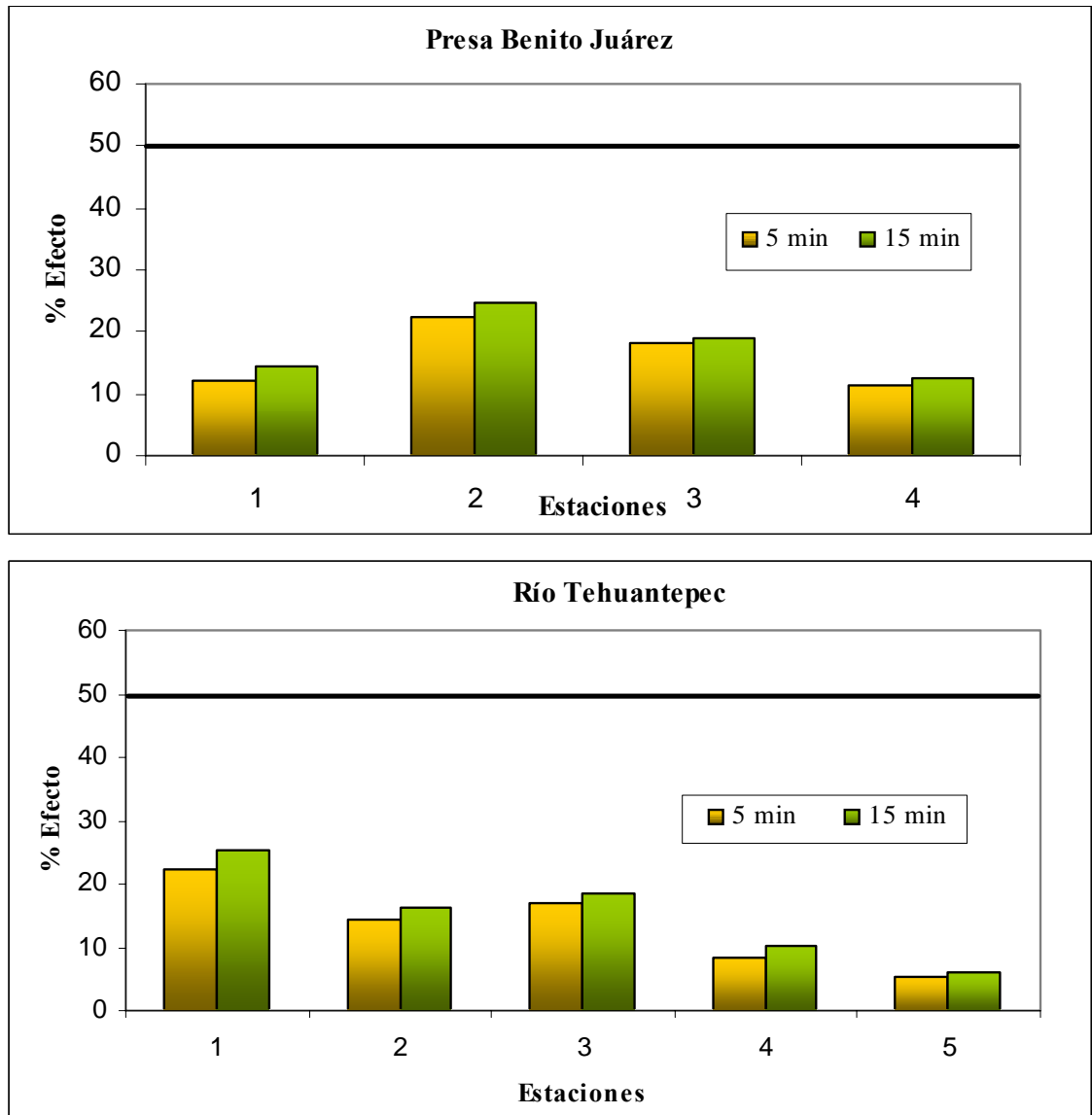


Figura 35 Promedio del Porcentaje de Efecto de sedimentos de la Presa Benito Juárez y Río Tehuantepec de la región de Salina Cruz, Oax

3.3.2 Bioensayos con nauplios de *Mysidopsis bahia*

Con respecto a los resultados obtenidos con *Mysidopsis bahia*, se registraron valores de mortalidad menores al 50 %, (Figuras 36). La mayor mortandad (35 %) se presentó en la estación 5 del antepuerto (Figura 37). Los resultados obtenidos no indican que las fases de partículas suspendidas no afecten a los organismos, por lo que es conveniente continuar al siguiente paso que es la evaluación crónica durante 22 días para determinar si existe algún efecto a otro nivel como puede ser la talla o el peso, de tal manera que los resultados obtenidos hasta el momento indicaron que la fase de partículas suspendidas al 100 % no causaron efectos sobre esta especie.

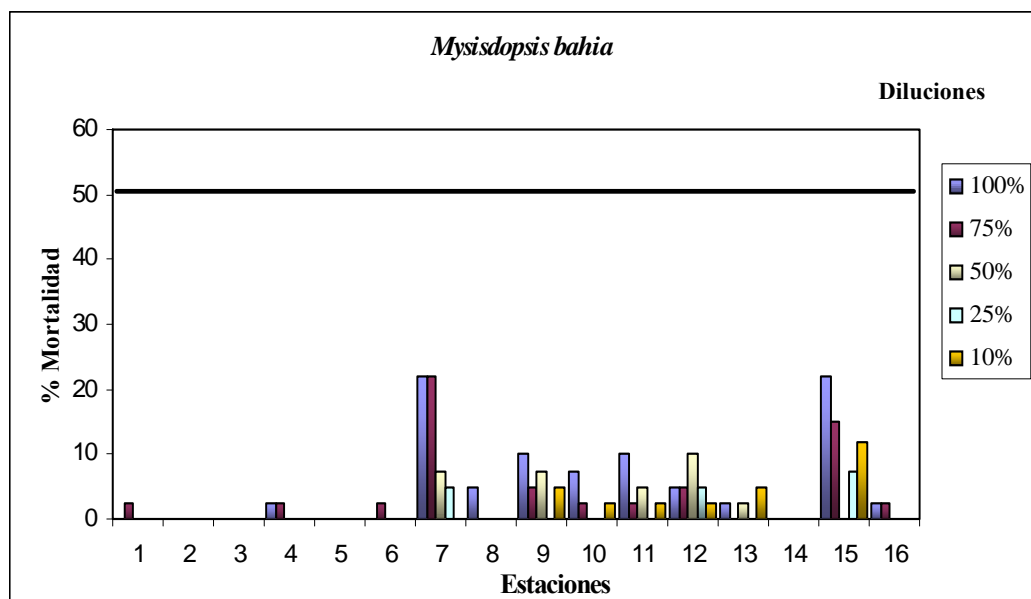


Figura 36 Porcentaje de mortalidad de *M. bahia* en el litoral de Salina Cruz, Oax.

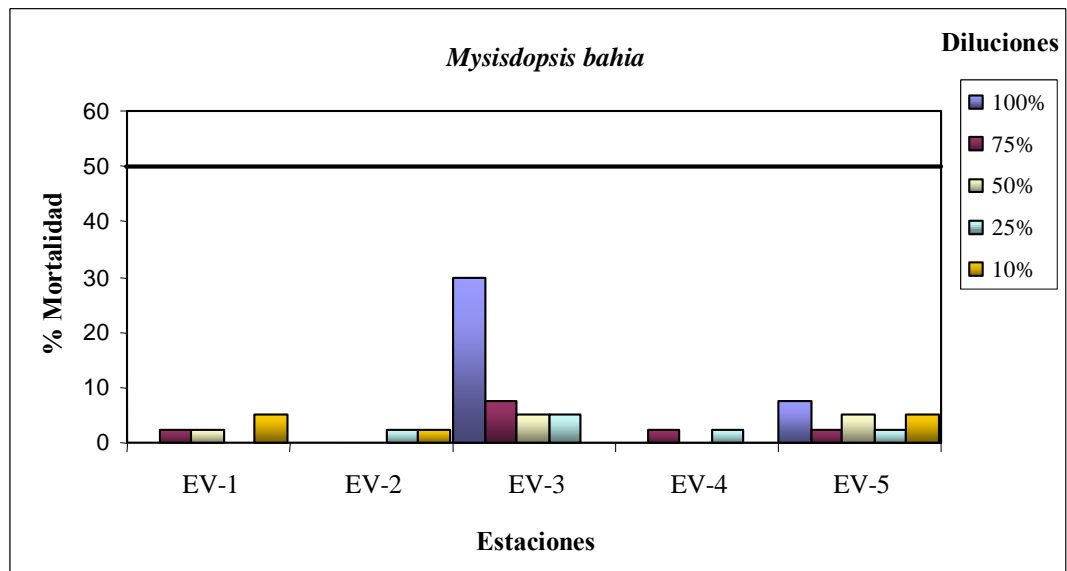
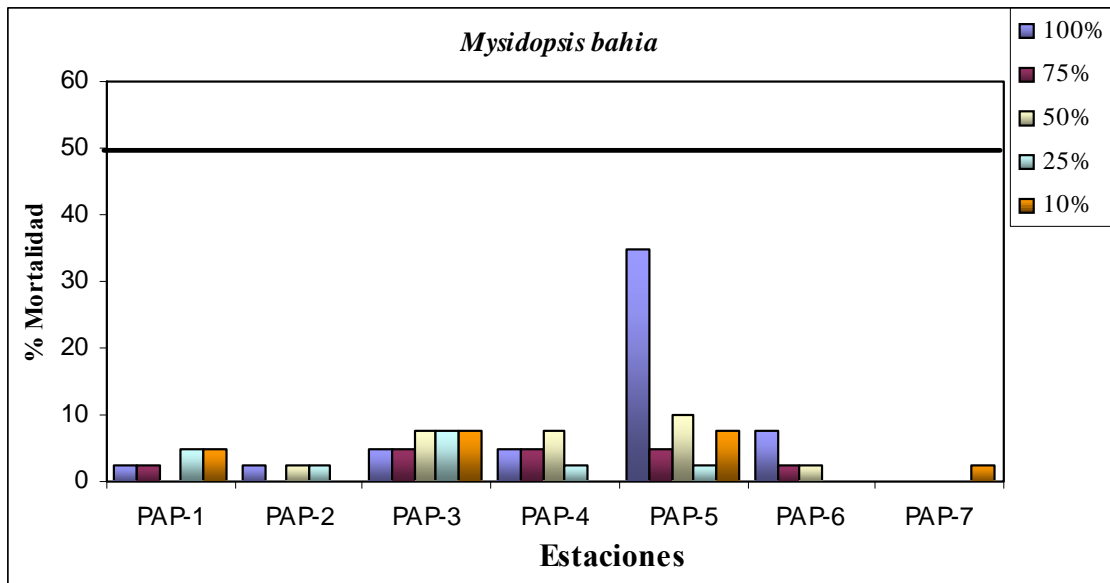


Figura 37 Porcentaje de mortalidad de *M. bahia* en el Puerto-Antepuerto y Estero La Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax.

3.3.3 Bioensayos con nauplios de Artemia franciscana y Artemia sp.

Las especies que resultaron más sensibles a la fase de partículas suspendidas fueron *Artemia franciscana* y *Artemia* sp., en donde se obtuvo un porcentaje mayor de mortalidad, no obstante, solamente se obtuvieron valores mayores al 50 % en las estaciones del puerto y antepuerto, así como en la estación 1 del estero Ventosa (Figuras 38 y 40).

En la Tabla XXIII y XXIV se presentan los valores obtenidos de CL₅₀, para ambas especies, los que solamente se pudieron determinar para estos sitios, observándose que para el caso de *Artemia franciscana* los valores de la CL₅₀ en general fueron mayores que para la *Artemia* sp. (Oaxaca), lo que indica que la FPS fueron menos tóxicas para la primera.

El comportamiento de estos resultados coinciden con los obtenidos con *Vibrio fischeri* en algunas de las estaciones del estero en evaluaciones realizadas en otras épocas, es decir, que se presenta un grado de toxicidad en los principales sitios con influencia tanto de la refinería como del área portuaria.

Bioensayos con nauplios de *Artemia franciscana* y *Artemia* sp.

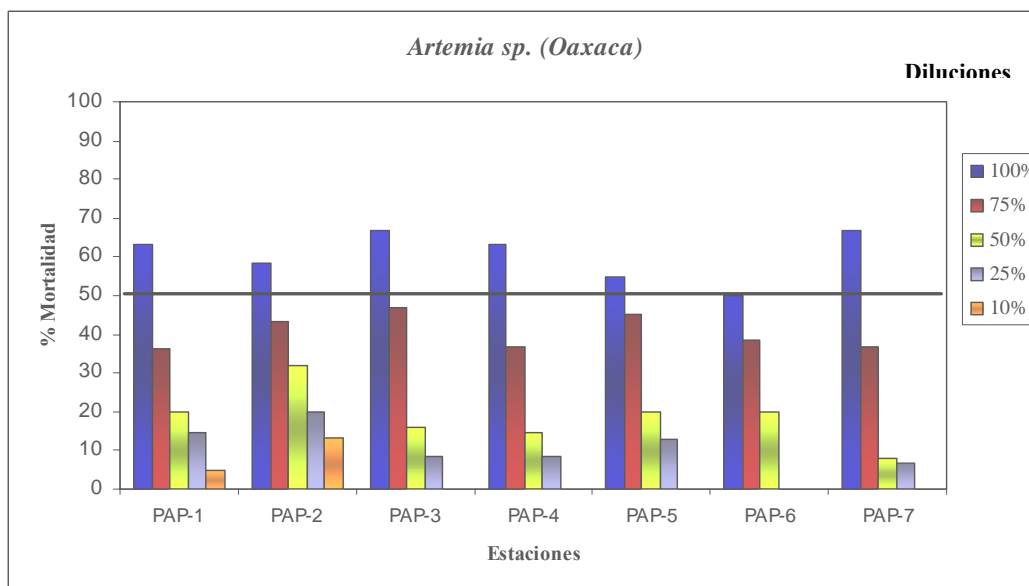
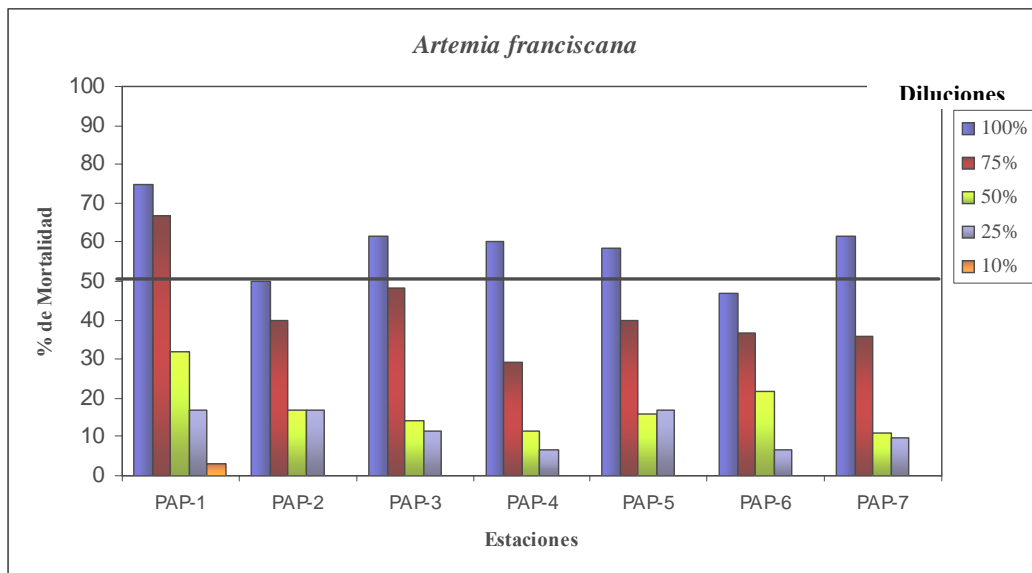


Figura 38 Porcentaje de mortalidad de *A. franciscana* y *Artemia* sp., en el Puerto-Antepuerto de la región de Salina Cruz, Oax.

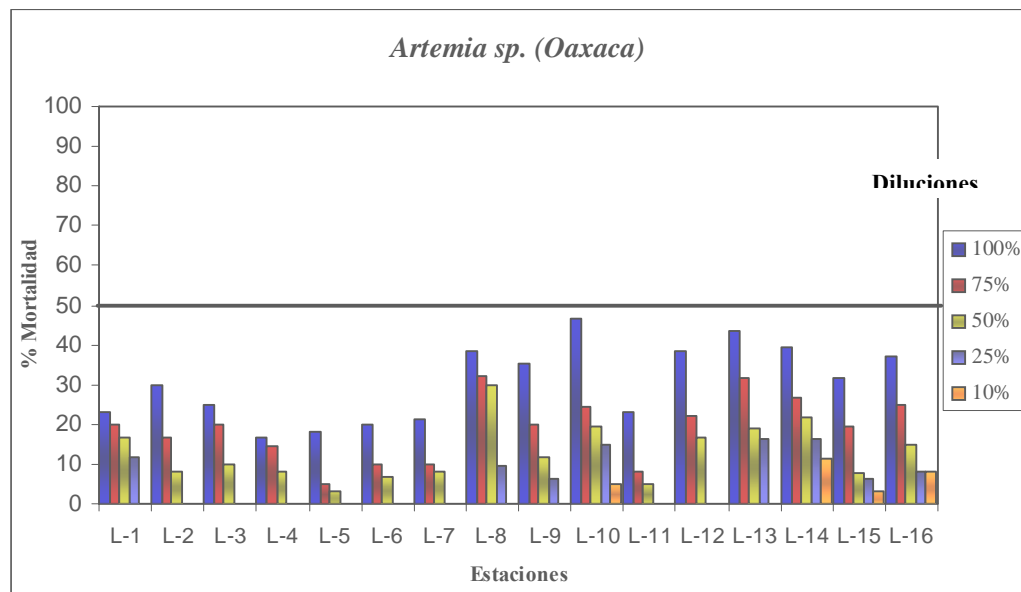
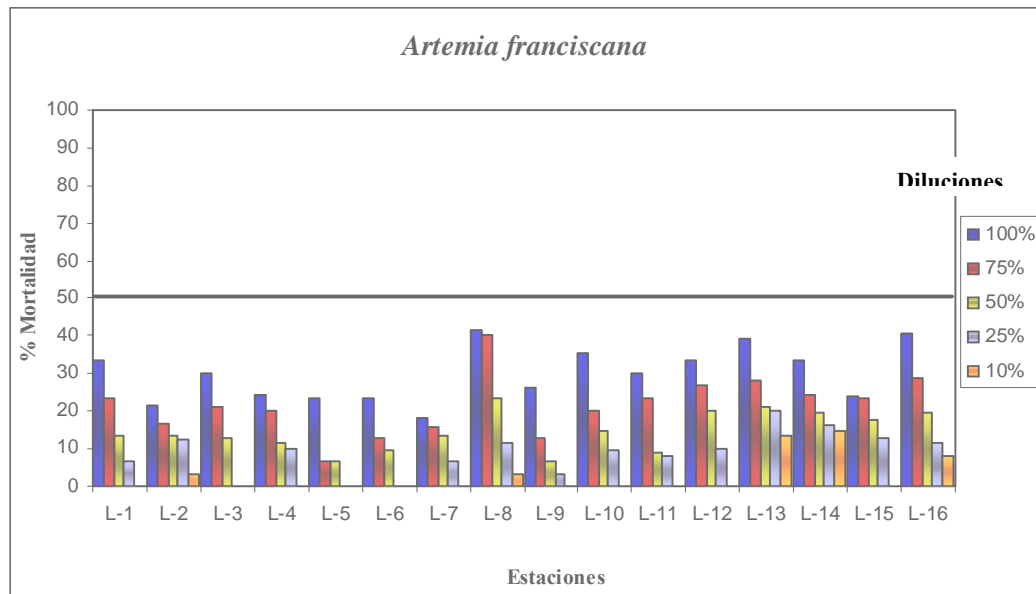


Figura 39 Porcentaje de mortalidad de *A. franciscana* y *Artemia* sp., en el litoral de la región de Salina Cruz, Oax.

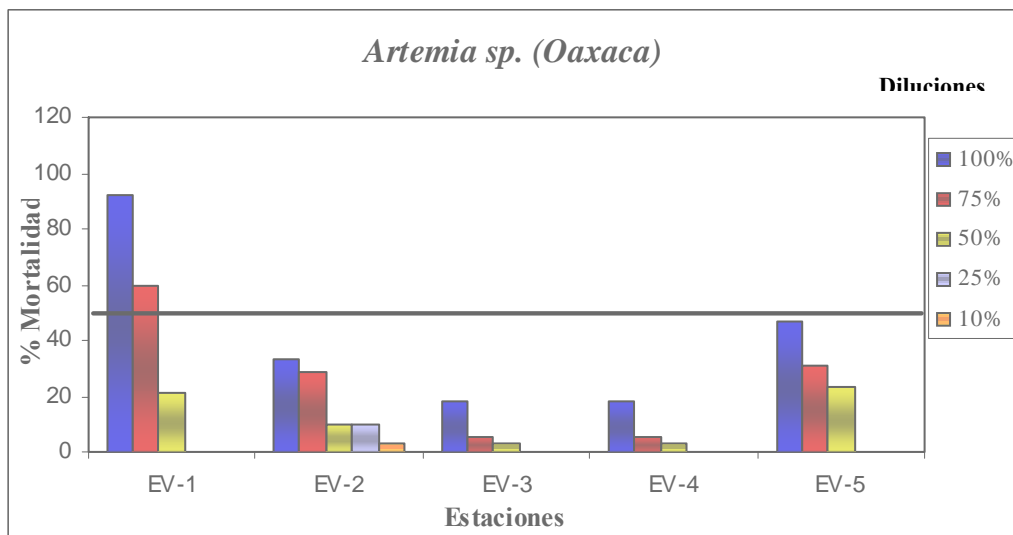
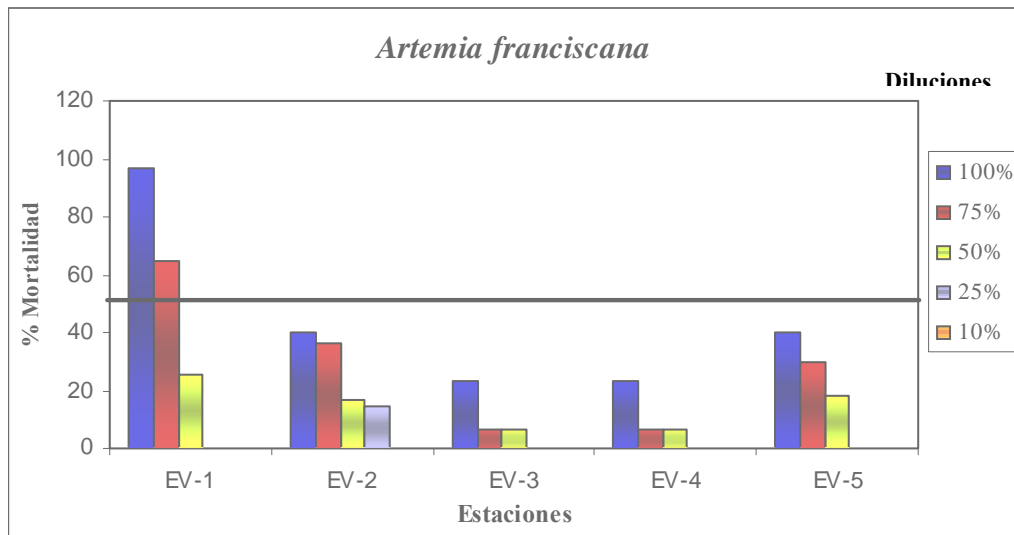


Figura 40 Porcentaje de mortalidad de *A. franciscana* y *Artemia sp.*, en el Estero La Ventosa de la región de Salina Cruz, Oax.

Tabla XXIII Valores de CL_{50} (obtenidos por el método Probit) con *Artemia franciscana*.

Estación	CL_{50}	Intervalo de Confianza
PAP-1	95.05	76.1-133.24
PAP-2	92.0	67.99-152.55
PAP-3	98.57	32.18-147.57
PAP-4	88.99	77.15-108.92
PAP-5	89.56	75.31-114.59
PAP-6	93.67	82.36-113.38
PAP-7	66.61	42.9-111.82
EV1	66.41	58.72-67.35

Tabla XXIV Valores de CL_{50} (obtenidos por el método Probit) con *Artemia* sp. (*Oaxaca*)

Estación	CL_{50}	Intervalo de Confianza
PAP-1	59.02	52.21-68.87
PAP-2	104.04	83.44-147.57
PAP-3	83.64	72.47-101.48
PAP-4	97.92	84.21-123.52
PAP-5	84.04	76.4-94.8
PAP-6	-	--
PAP-7	73.96	69.5-78.59
EV1	63.11	61.69-71.11

3.3.4 Bioensayos con neonatos de *Daphnia magna*

En la Tabla XXV y Figura 41 se presentan los resultados de CL_{50} , para las seis estaciones del Arroyo Zanjón. A excepción de las estaciones 1 y 6 en que no se observó una respuesta tóxica de los sedimentos, la estación 2 fue la que obtuvo una toxicidad mayor (38.15) presentando el porcentaje de mortalidad mayor al 50 % en la concentración de 50, 75 y 100 mg/L de la fase de partículas suspendidas, siguiendo en importancia la estación 3 con una CL_{50} , de 52.63, la que obtuvo un porcentaje de mortalidad del 50 % de los organismos a partir de la concentración del 75 y 100 mg/L de la fase de partículas suspendidas. La estación 5 obtuvo una toxicidad de 89.88, con una mortalidad del 60 % de los organismos en la concentración de 100 mg/L de la fase sólida.

Las cuatro estaciones que obtuvieron un valor significativo y alto de toxicidad presentaron una concentración alta de plomo así como valores altos de cobre, níquel y la estación 5 el zinc fue la que presentó el valor más alto. Por otra parte, las estaciones 2 y 4 obtuvieron concentraciones altas de material orgánico extraíble.

En la Tabla XXVI y Figura 41 se presentan los valores obtenidos de CL_{50} , para las cuatro estaciones de la Presa Benito Juárez, observándose que para el caso de las dos primeras estaciones, se obtuvo una respuesta positiva de toxicidad, la estación con una toxicidad mayor fue la 4 ya que el porcentaje de mortalidad del 50 % se dio desde la concentración de 50 mg/L de la fase de partículas suspendidas. En la estación 3, la mortalidad del 50 % de los organismos se presentó a partir de la concentración de 75 mg/L de la fase de partículas suspendidas, obteniendo una CL_{50} mayor (46.53%).

Para la estación 1 solamente se registró un 50 % de mortalidad en la concentración más alta del 100 mg/L de la fase de partículas suspendidas, por lo que la CL_{50} resulta ser muy alta (106.8 %), mientras que la estación 2 a esta misma concentración no alcanzó una mortalidad del 50 % de la población. Los dos puntos que obtuvieron un valor significativo de la CL_{50} , coinciden con los valores altos de algunos contaminantes evaluados en los sedimentos como los metales cobre, cromo, níquel, plomo, vanadio y

concentraciones altas de material orgánico extraíble así como el de presentar un índice alto de fineza en los sedimentos de la estación tres.

Para el Río Tehuantepec, en la Tabla XXVII y Figura 42 se presentan los valores obtenidos de CL_{50} , para las cinco estaciones del río. A excepción de las estaciones 3 y 5 en que no se observó una respuesta tóxica de los sedimentos, la estación 2 fue la que obtuvo una toxicidad mayor (47.96) presentando el porcentaje de mortalidad mayor al 50 % en las la concentración de 75 y 100 mg/L de la fase de partículas suspendidas, siguiendo en importancia la estación 4 con una CL_{50} de 48.9, la que obtuvo un porcentaje de mortalidad del 50 % de los organismos a partir de la concentración del 50 mg/L de la fase de partículas suspendidas y por último la estación 1 que presentó la toxicidad más baja (57.28), con una mortalidad mayor al 50 % de los organismos a partir de 75 mg/L de concentración de la fase sólida.

Las tres estaciones que obtuvieron un valor significativo y alto de toxicidad presentaron una concentración alta de plomo así como valores altos de cadmio y arsénico, además la estación 1 obtuvo el valor más alto de material orgánico extraíble. Por otra parte, la estación 5 que no manifestó toxicidad fue la estación que obtuvo la concentración más alta de mercurio.

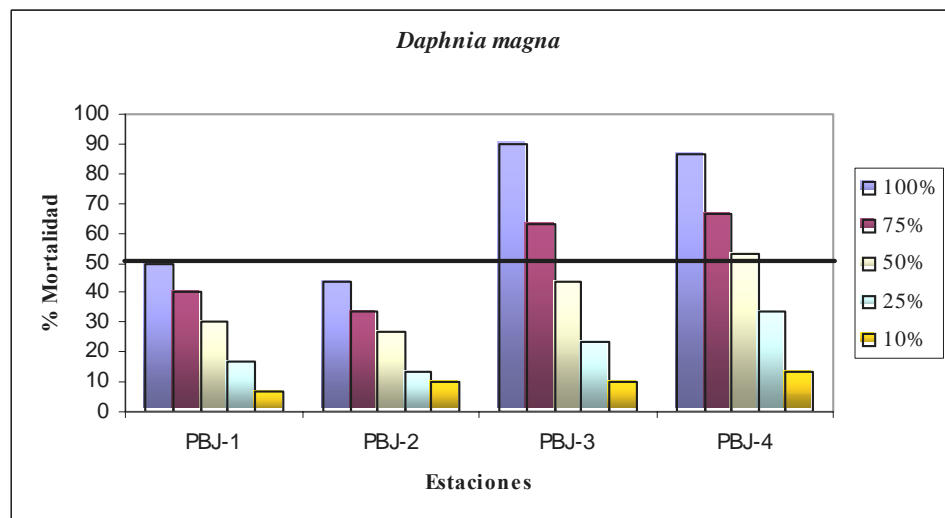
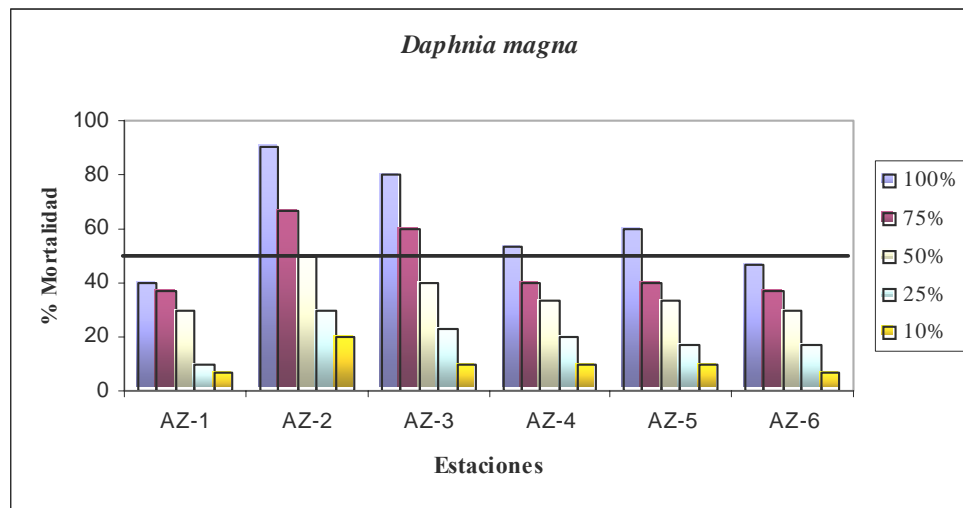


Figura 41 Porcentaje de mortalidad de *Daphnia magna* en el Arroyo Zanjón y Presa Benito Juárez de la región de Salina Cruz, Oax.

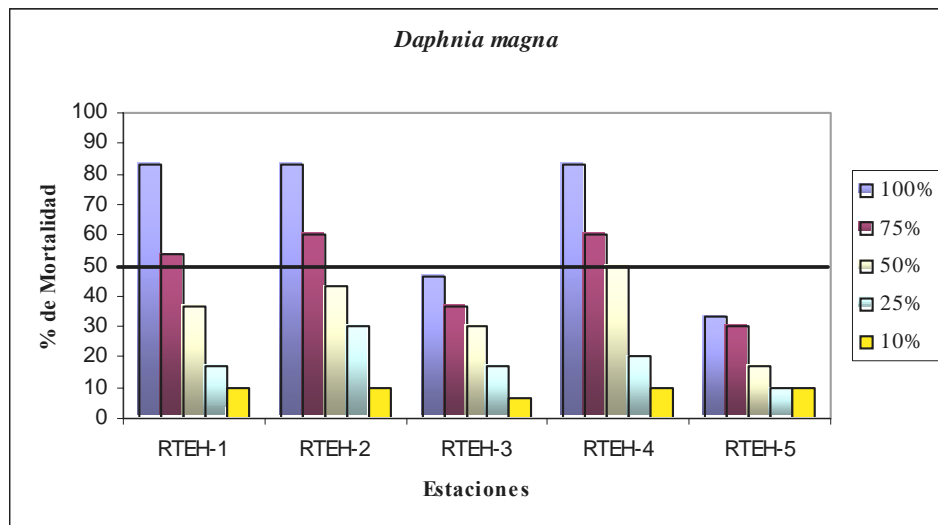


Figura 42 Porcentaje de mortalidad de *Daphnia magna* en el Río Tehuantepec de la región de Salina Cruz, Oax.

Tabla XXV Valores de CL₅₀ (obtenidos por el método Probit) con *Daphnia magna*.
(Arroyo Zanjón).

Estación	CL ₅₀	Intervalo de Confianza
AZ-1	139.72	86.9-502.8
AZ-2	38.15	28.3-50.2
AZ -3	52.63	40.9-69.9
AZ -4	101.42	66.8-264.5
AZ -5	89.88	62.9-180.2
AZ -6	121.47	78.1-364.9

Tabla XXVI Valores de CL₅₀ (obtenidos por el método Probit) con *Daphnia magna*.
(Presa Benito Juárez).

Estación	CL ₅₀	Intervalo de Confianza
PBJ-1	106.8	72.3-252.3
PBJ-2	163.6	90.9-1178
PBJ-3	46.53	36.9-58.8
PBJ-4	39.63	30.2-51.2

Tabla XXVII Valores de CL₅₀ (obtenidos por el método Probit) con *Daphnia magna*.
(Río Tehuantepec).

Estación	CL ₅₀	Intervalo de Confianza
RTEH-1	57.28	45.1- 76.17
RTEH-2	47.96	37.0- 63.1
RTEH-3	121.47	78.1- 364.9
RTEH-4	48.9	38.5- 62.9
RTEH-5	322.6	128.5-1114.9

Comparación de resultados entre *Vibrio fischeri* y nauplios de *Daphnia magna*: Los resultados de los bioensayos con ambas especies para los cuatro sitios se presenta en las Figuras de la 43 a la 46 en donde se observa que la especie que resultó más sensible a la fase de partículas suspendidas fue *Vibrio fischeri*, quien obtuvo una CE₅₀ menor al obtenido para *Daphnia magna* en tres de los cuatro sitios de muestreo. En el Arroyo Zanjón la mayor toxicidad se presentó en la estación 5, la que se localiza en la parte final de la refinera, mientras que la menos tóxica fue la estación 1 situada en la cabecera del arroyo (Figura 44). En este sentido, la estación 5 presentó el valor más alto de material orgánico extraíble y de hidrocarburos así como de los metales arsénico, cadmio, cobre,

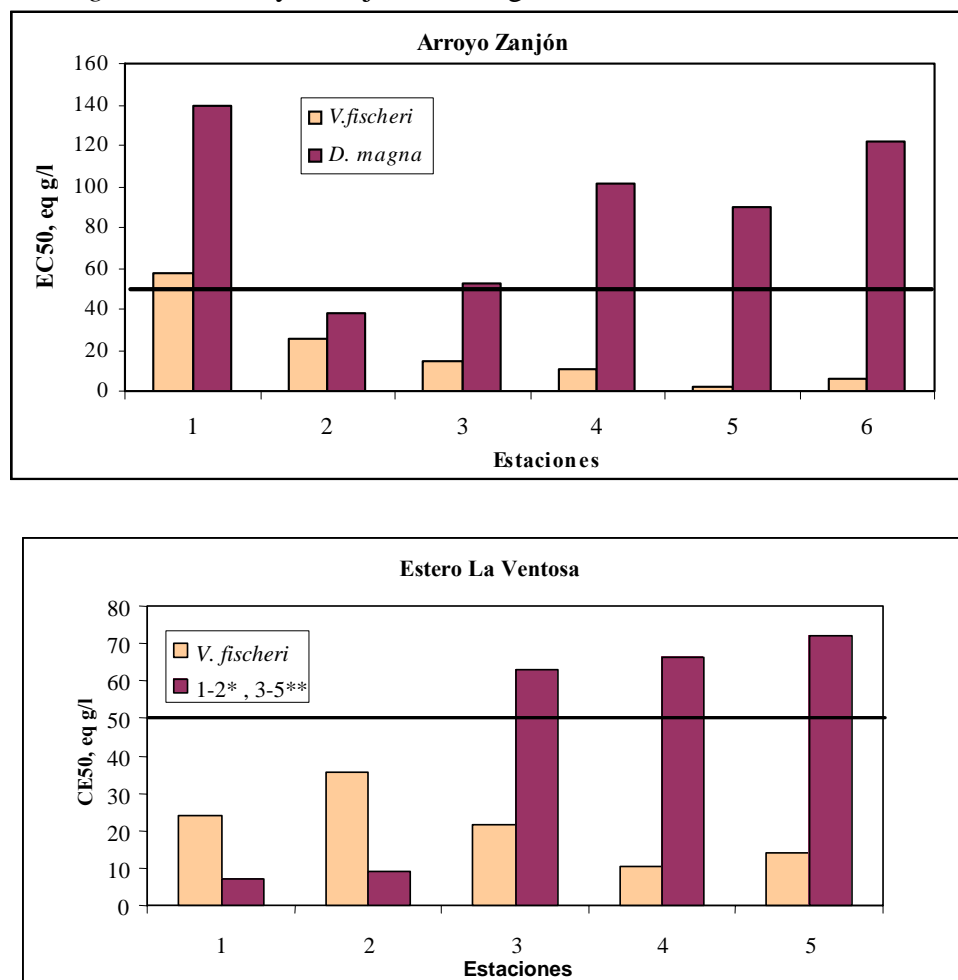
níquel, y zinc, lo que fue corroborado por las correlaciones significativas de estos parámetros con *V. fischeri* a excepción del cadmio con el que no hubo correlación. Para el caso con *D. magna* solamente se obtuvo una correlación significativa con el plomo (Tabla XXIX). En la Figura 44 se presenta el comportamiento que se obtuvo de la toxicidad en el Estero La Ventosa, el que por ser un ecosistema estuarino, los puntos de muestreo 1 y 2 presentaron características de agua dulce, en tanto que las estaciones 3-5 obtuvieron una salinidad en un intervalo de 20.8 y 32.5 ‰, de tal manera, la toxicidad del sedimento fue evaluada a través del organismo *Artemia franciscana*, observándose una sensibilidad menor a la fase de partículas suspendidas en comparación con *Vibrio fischeri*. Las estaciones con características de agua dulce fueron evaluadas con *Daphnia magna* la que resultó ser más sensible a la fase de partículas suspendidas en comparación con *V. fischeri*. Estas dos estaciones corresponden a la cabeza del estero (Figura 44) y se caracterizaron por presentar valores altos de hidrocarburos, material orgánico extraíble, metales como el cadmio, níquel y plomo, sin embargo, las correlaciones que se obtuvieron para este cuerpo acuático fue entre el plomo con *V. fischeri* y el cromo con *D. magna*; mientras que las correlaciones entre *A. franciscana* y los contaminantes fueron con los hidrocarburos, cobre y níquel (Tablas XXVIII y XXIX).

En la presa “Benito Juárez” se observó un comportamiento similar al del Arroyo Zanjón (Figura 45), en donde se observa que la especie más sensible a la fase de partículas suspendidas fue *Vibrio fischeri*, quien obtuvo una CE₅₀ menor al obtenido para *Daphnia magna* en todos los puntos de muestreo, no obstante los puntos 1 y 2 obtuvieron la mayor toxicidad. Para este sitio, se obtuvieron correlaciones significativas altas entre la toxicidad con *V. fischeri* y los metales cadmio, cromo, níquel, vanadio y zinc, de igual manera entre la toxicidad con *D. magna* y los metales cadmio y zinc (Tabla XXIX).

En el Río Tehuantepec se da el mismo patrón que para el arroyo y la presa, obteniendo una mayor toxicidad en las estaciones 1, 2 y 5. La estación 1 obtuvo las concentraciones más altas de hidrocarburos, material orgánico extraíble, de los metales arsénico, y zinc así como un porcentaje alto de materia orgánica, cabe hacer mención que a diferencia del resto de los puntos de muestreo, en éste, el tipo de sedimento fue areno-limoso, la

estación 2 obtuvo un valor alto de arsénico y níquel, en tanto que el punto cinco del río, el cadmio y el plomo fueron altos. Las correlaciones obtenidas en este sistema fueron entre *V. fischeri* con los metales cadmio, plomo y zinc y entre *Daphnia magna* con el zinc (Tabla XXIX)

Figura 43 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre *Vibrio fischeri* y *Daphnia magna* en el Arroyo Zanjón en la región de Salina Cruz, Oax



* *Daphnia magna*

** *Artemia franciscana*

Figura 44 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre *Vibrio fischeri*, *Artemia franciscana* y *Daphnia magna* en el Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.

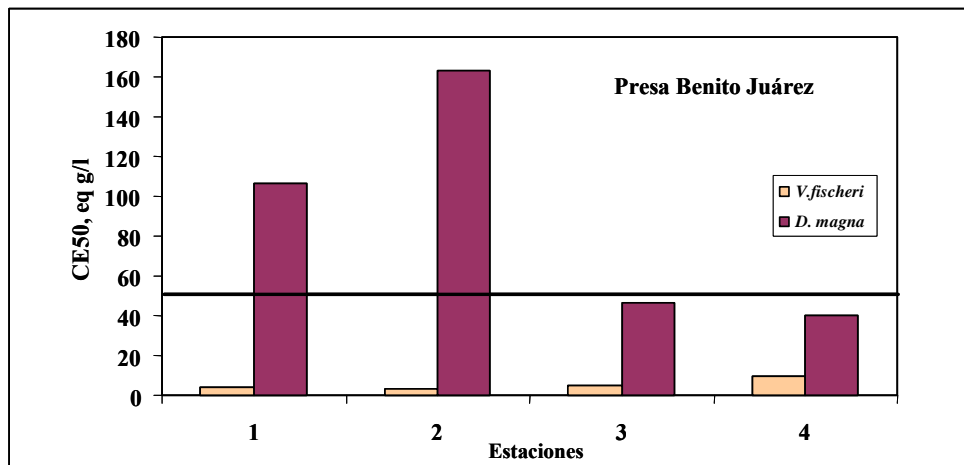


Figura 45 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre *Vibrio fischeri* y *Daphnia magna* en la presa “Benito Juárez” en la región de Salina Cruz, Oax.

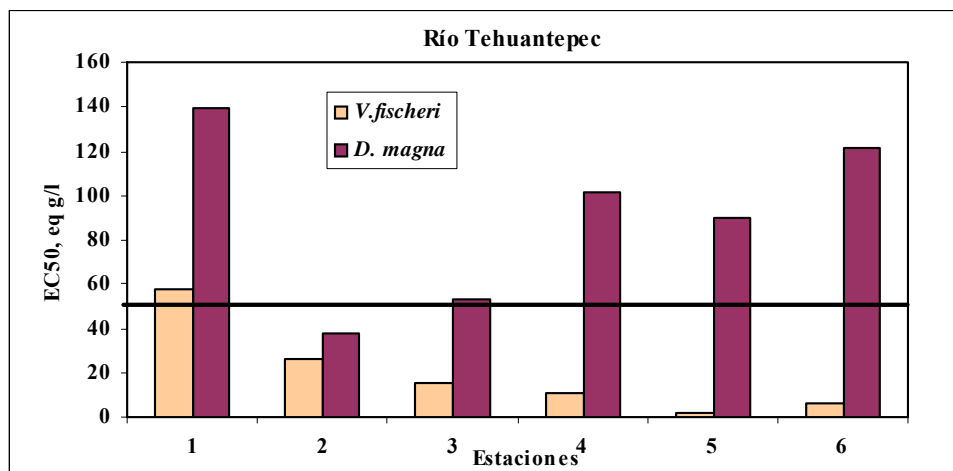


Figura 46 Comparación del efecto tóxico del sedimento entre *Vibrio fischeri* y *Daphnia magna* en el Río Tehuantepec en la región de Salina Cruz, Oax.

Tabla XXVIII Correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0.01$) entre contaminantes orgánicos, metales, materia orgánica y la toxicidad de *V. fischeri*, *Artemia franciscana* y *Artemia* sp. (Oaxaca), en el Litoral y Puerto-Antepuerto.

Parámetros	<i>V. fischeri</i>	<i>Artemia</i> sp. (Oaxaca)
Litoral		
Cd	-0.51	0.51
Ni	0.70	
Puerto-Antepuerto		
		<i>A. franciscana</i>
As		-0.82
Zn		-0.78

Tabla XXIX Correlaciones estadísticamente significativas ($P < 0.01$) entre contaminantes orgánicos, metales, materia orgánica y la toxicidad de *V. fischeri* y *D. magna*.

Parámetros	<i>V. fischeri</i>	<i>D. magna</i>
Arroyo Zanjón		
HAT	0.89	0.85
As	0.92	
Cu	0.83	
Ni	0.89	
Pb		
Zn	0.97	
MO	0.88	
Presa "Benito Juárez"		
Cd	0.96	0.87
Cr	0.96	
Ni	1.0	
V	0.96	
Zn	0.98	
Río Tehuantepec		
Cd	0.86	0.92
Pb	0.89	
Zn	0.94	
Estero La Ventosa		
Pb	0.88	0.96
Cr		
		<i>A. franciscana</i>
HAT		0.92
Cu		0.91
Ni		0.88

Se llevó a cabo un análisis de cúmulos en las que se incluyeron todos los resultados de contaminantes orgánicos, metales, características granulométricas y los resultados de la toxicidad con las diferentes especies, obteniendo agrupaciones de estaciones con características semejantes. Para el área del litoral se hicieron dos tipos de análisis de cúmulos, uno incluyendo el área del Puerto-Antepuerto y otro sin dichas estaciones. El área del PA como se muestra en la Figura 47 se separa del resto de las estaciones del litoral ya que es un sitio que obtuvo concentraciones elevadas de material orgánico extraíble así como de hidrocarburos y algunos metales como el cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc así como también se manifestó una respuesta a la toxicidad de la FPS para las especies como *V. fischeri*, *Artemia franciscana* y *Artemia* sp.

En la misma figura se puede observar que excluyendo las estaciones del PA, se forman tres agrupaciones para el área del litoral, las estaciones 1-3, 5 y 8 que se encuentran cercanas a la costa y que se caracterizan por presentar los valores más altos de algunos de los contaminantes como hidrocarburos y cadmio. El segundo grupo incluye a las estaciones 4, 6, 7, 9-11, se caracteriza por presentar las concentraciones más altas de los metales cromo, plomo y zinc así como la estación 9 que obtuvo el valor más alto de material orgánico extraíble y de hidrocarburos.

El último grupo que incluye a las estaciones de la 12 a la 16, presenta características granulométricas similares y bajas concentraciones de hidrocarburos así como de mercurio y vanadio (Figura 48).

Las zonas del Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa se analizaron juntas así como en el caso de la presa y el Río Tehuantepec (Figuras 49 a la 52).

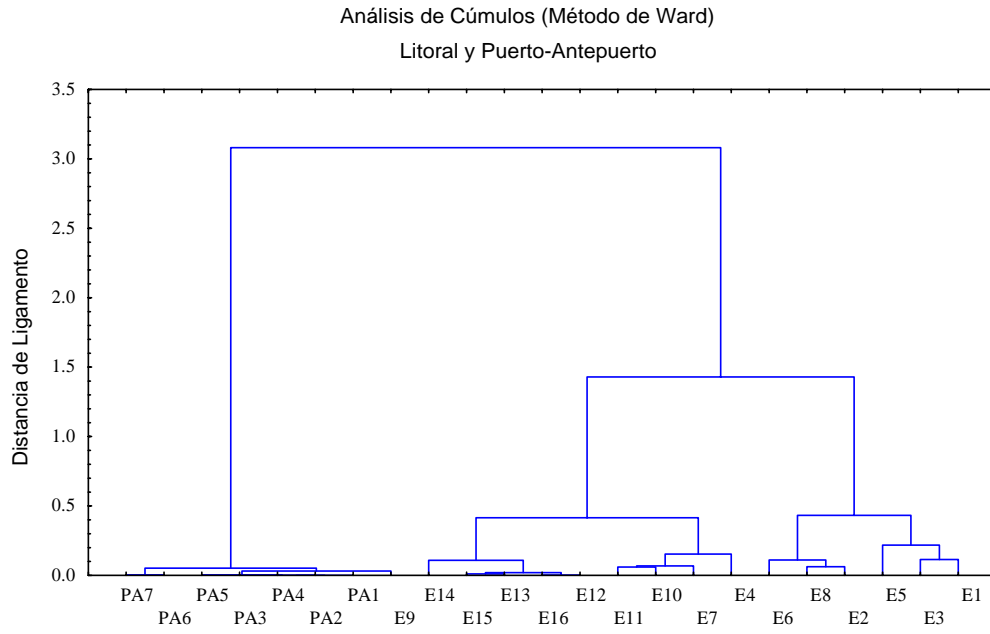
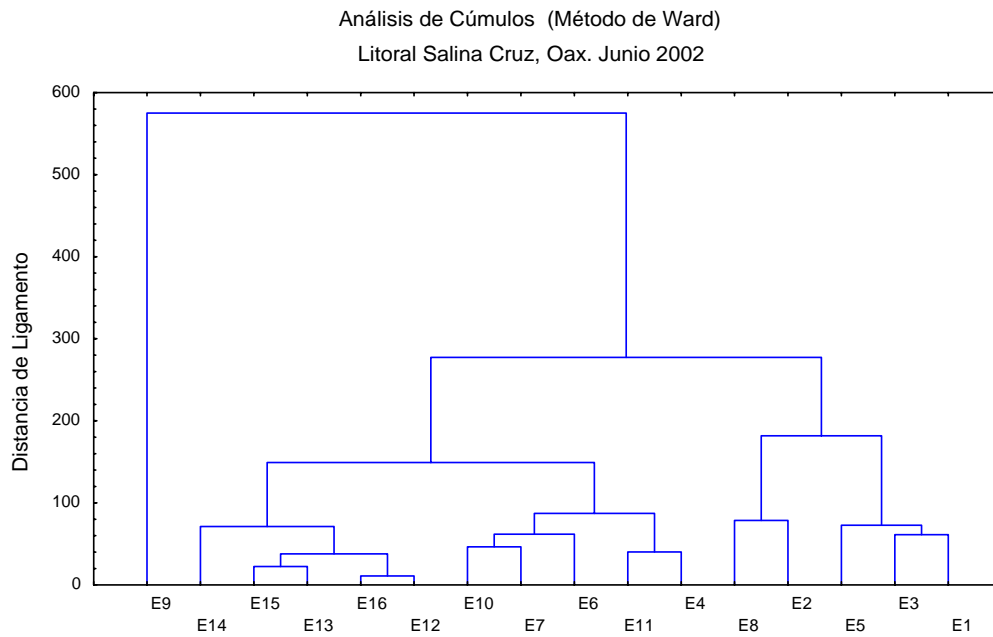


Figura 47 Análisis de cúmulos en el área del litoral e incluyendo el Puerto-Antepuerto en la región de Salina Cruz, Oax.

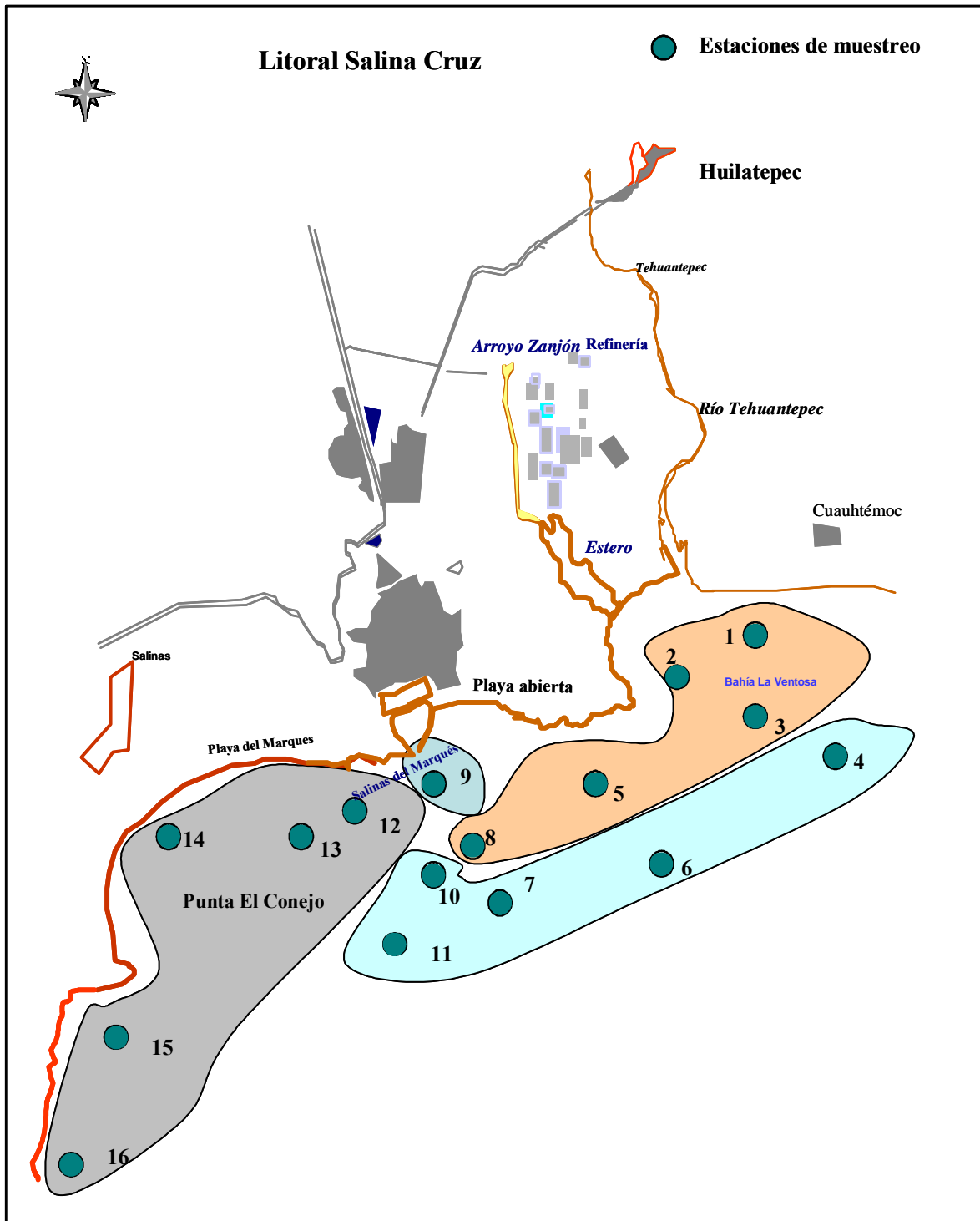


Figura 48 Resultados de los grupos formados de acuerdo al análisis de cúmulos en la región de Salina Cruz, Oax.

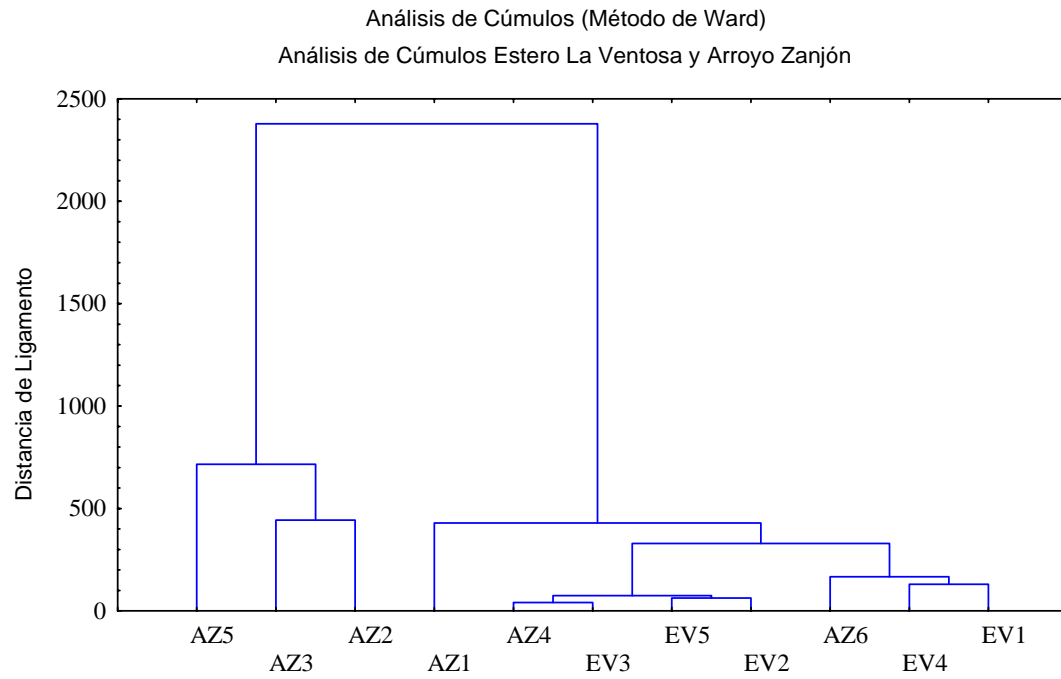


Figura 49 Análisis de cúmulos en el área del Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.

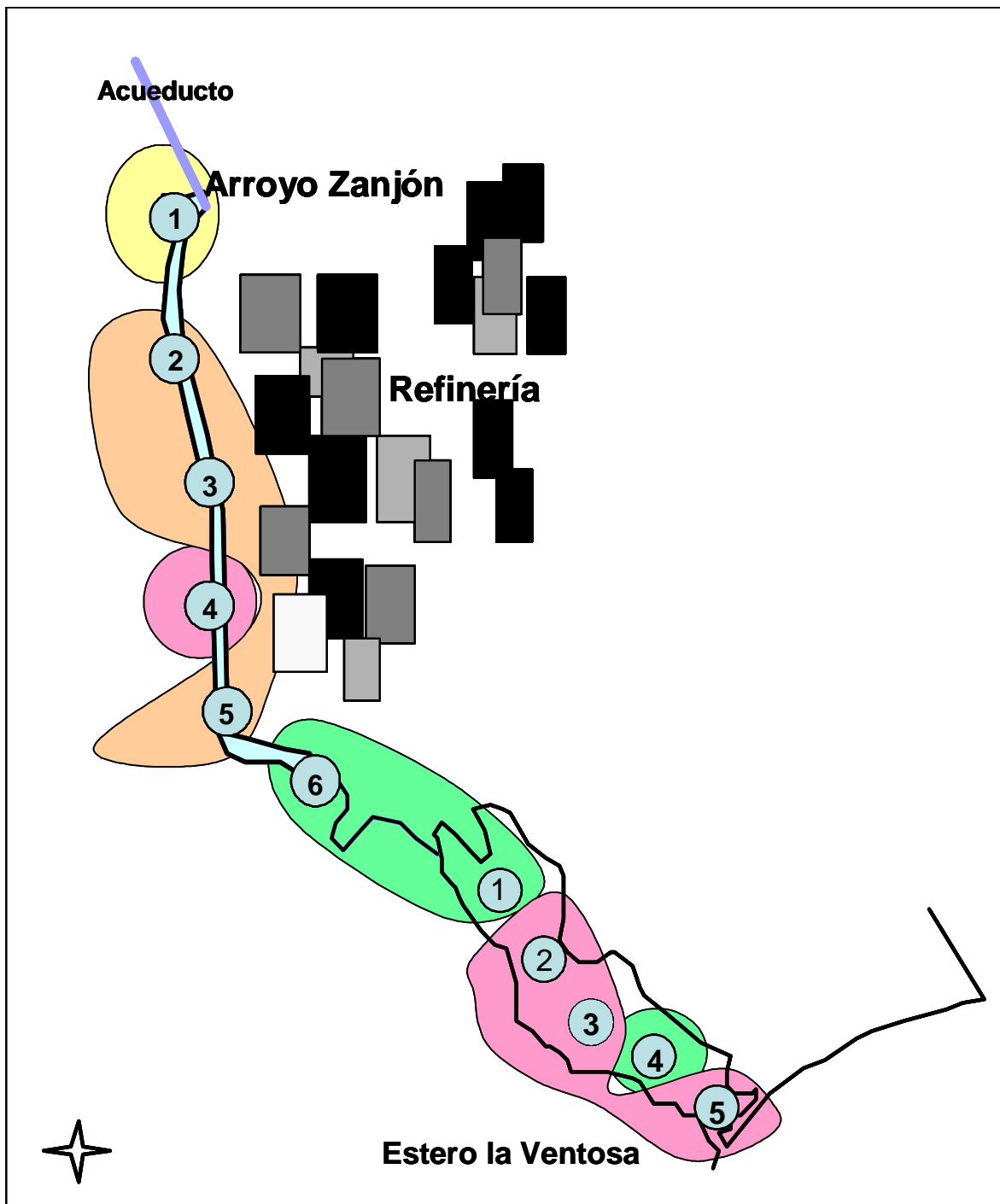


Figura 50 Resultados de los grupos formados de acuerdo al análisis de cúmulos en el Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.

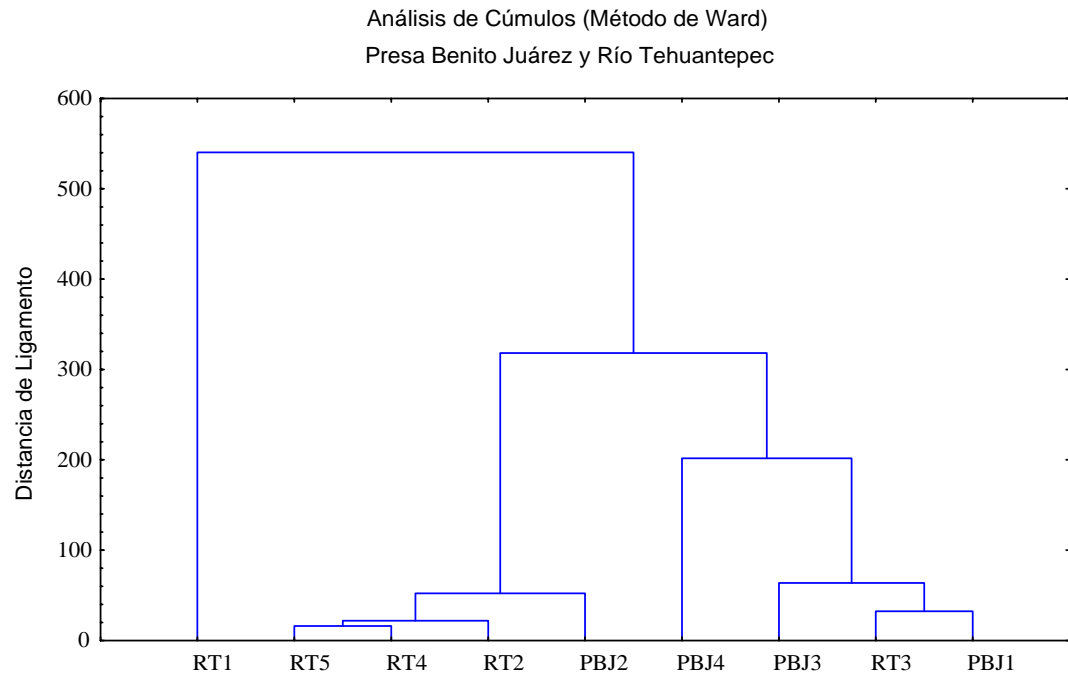


Figura 51 Análisis de cúmulos en el área del Río Tehuantepec y Presa “Benito Juárez” en la región de Salina Cruz, Oax.

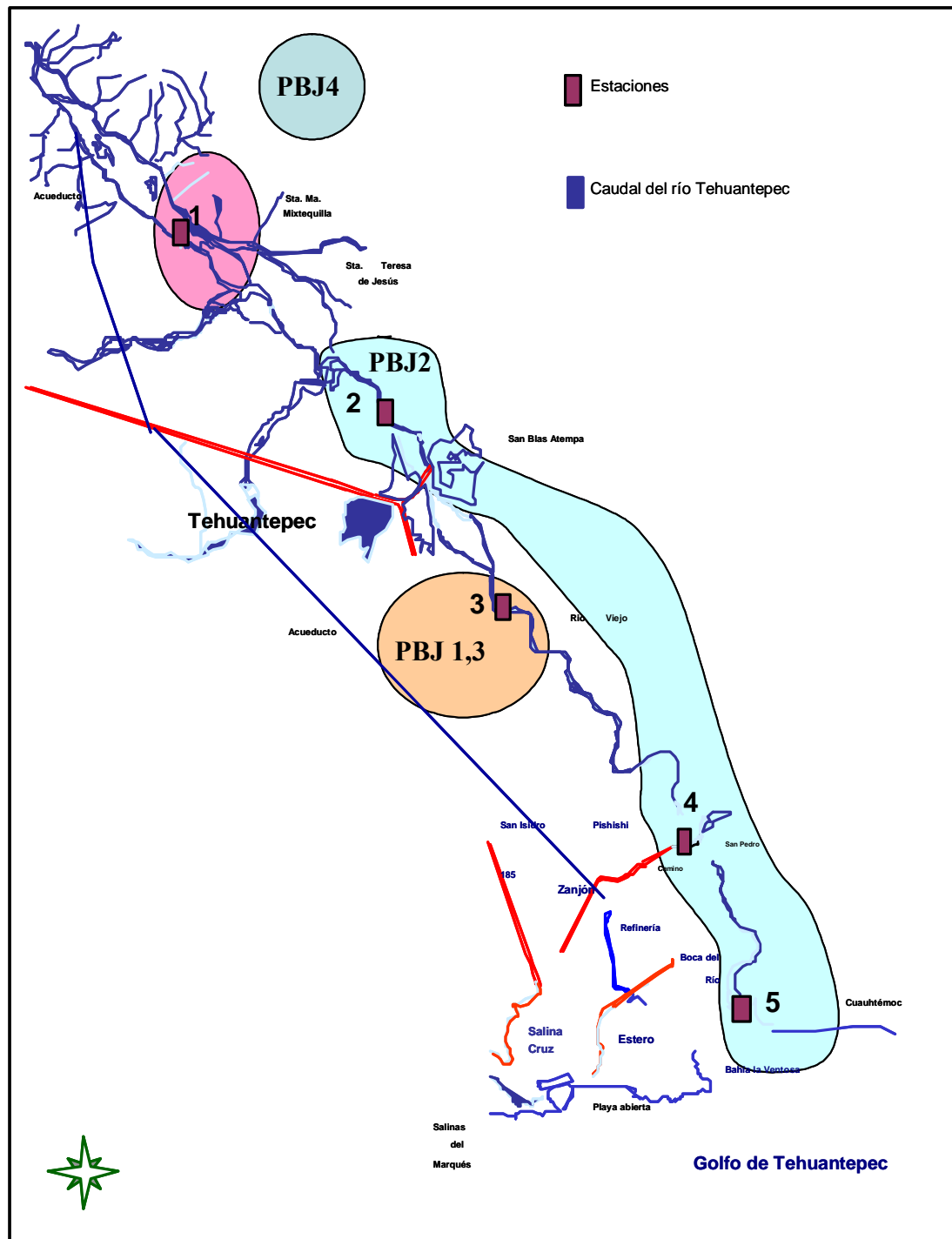


Figura 52 Resultados de los grupos formados de acuerdo al análisis de cúmulos en el Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa en la región de Salina Cruz, Oax.

4. DISCUSIÓN

Hidrocarburos aromáticos y material orgánico extraíble

A excepción del área del Puerto-Antepuerto y de la estación 5 del Arroyo Zanjón, ubicada después de la refinería, en general los valores de los hidrocarburos aromáticos totales fueron menores al valor para sedimentos no contaminados de la UNESCO (1984) (70 mg/kg). Solamente dos estaciones del puerto rebasaron este valor.

El 19 % de los datos superó el estándar más alto de efecto probable (ERM=44.79 mg/kg), en tanto que el 47 % fueron superiores al límite de calidad inferior que asegura no efecto a la biota (TEL=1.68 mg/kg), de acuerdo a las guías de calidad de sedimentos (Long *et al.*, 1995; Long y MacDonald, 1998, CCREM, 1996, NOAA, 1999); presentándose en el área del puerto y antepuerto todas las concentraciones superiores a este valor. Estas condiciones que pueden ser consideradas como características de una zona portuario-industrial con influencia petrolera (Evangelista *et al.*, 2005).

Los valores tanto promedio (0.11-67.74 mg/kg) como nominales (0.003-141.85 mg/kg) de hidrocarburos encontrados durante este estudio son inferiores a los reportados por Parga-Lozano *et al.* (2002) en sedimentos del área de la bahía de Cartagena Colombia quienes reportan valores promedio entre 73 y 700 mg/kg y valores que van de 50 a 1415 mg/kg. Por otro lado, también son menores a los niveles altos de hidrocarburos encontrados en los sedimentos de otras regiones del mundo contaminadas crónicamente por petróleo como Odessa, en el Mar Negro (110-310 mg/kg peso seco), Hong Kong (60-646 mg/kg peso seco) y la Bahía de Nueva York (35-2900 mg/kg peso seco) (Evangelista *et al.*, 2005). En el estudio realizado por estos autores se menciona que los niveles totales de hidrocarburos sobre todo de los poliaromáticos encontrados en los sedimentos recolectados de localidades de Petrobrás están por debajo de las concentraciones propuestas por MacDonald *et al.*, (1996) como capaces de causar efectos en la biota. Sin embargo debido a la forma en que éstos están unidos a los sustratos orgánicos, se estima que los hidrocarburos pueden causar efectos biológicos adversos aún cuando los criterios de calidad no se excedan. En este estudio se observó

una disminución del peso seco en larvas de camarón entre áreas impactadas y no impactadas con hidrocarburos aromáticos totales (MacDonald *et al.*, 1996).

Por otro lado, las concentraciones de hidrocarburos aromáticos totales reportados en este estudio se encuentran dentro de los intervalos reportados para otros sitios en diferentes cuerpos acuáticos de México como el Río Cazonés en Veracruz (16.8 a 88.9 mg/kg), Guaymas, Sonora (540.13 y 2411.09 mg/kg), el río Coatzacoalcos (3.36-32.58 mg/kg) y en las Chapopoterías del Golfo de México 150 mg/kg.

Para el material orgánico extraíble, las concentraciones reportadas varían de un sitio a otro; sin embargo, los valores observados en este estudio pueden ser comparados con los obtenidos en cuerpos acuáticos semejantes, como los ríos Pánuco, Coatzacoalcos y Cazonés, Ver. (sitios influenciados por intensa actividad de la industria petrolera), así como en la laguna Lagarto, Oax., cercana a una estación de rebombeo de Pemex-Refinación, y la laguna Limón, Tab., cuerpo receptor de las aguas residuales del complejo petroquímico ciudad Pemex por dos años. Las concentraciones en estos sitios varían entre 91 y 34,884 mg/kg (IMP, 1998).

Las concentraciones de hidrocarburos aromáticos y del material orgánico extraíble más altas en el área de Salina Cruz, se observaron en el puerto y antepuerto. Este comportamiento puede considerarse típico de estos sitios, ya que se trata de una zona con poca circulación de sus aguas, además someras y por ende la actividad portuaria intensa lo que permite que se acumulen diversos contaminantes. De acuerdo al estudio hecho sobre hidrodinámica del puerto y antepuerto de Salina Cruz durante 1999, se encontró que esta zona presenta tiempos de recambio de agua altos (IMP, 2000b). Esto es una característica de los puertos, ya que son construidos como lugares de abrigo y resguardo para las embarcaciones. En este caso la aplicación del modelo, dio como resultado que en un evento de mareas vivas no se da el recambio total de agua del puerto, ya que existen zonas en las cuales ésta tiende a formar giros en el patrón de la circulación residual y retienen agua y el material en suspensión. No obstante, bajo condiciones de marea media y vientos medios, se tiene un recambio del 80 % del agua del puerto en 6 días. Este resultado ayuda a explicar las condiciones prevalecientes en el

puerto en la zona de amarre de los barcos pesqueros y en los astilleros, en donde se acumulan constantemente material y contaminantes (IMP, 2000b).

Los valores más bajos se obtuvieron en las estaciones de la zona costera como consecuencia de una alta hidrodinámica de la región. Analizando las estaciones cuyos sedimentos parecen ser las de mayor contaminación petrogénica se puede decir que los puntos de muestreo del puerto y antepuerto presentan características particulares como son: siniestros marítimos, tales como varadas, hundimientos y abordajes de petroleros y otros buques que transportan hidrocarburos como cargamento o combustible; las operaciones de los petroleros, durante las cuales se descargan hidrocarburos como consecuencia de los procedimientos de limpieza de tanques y de deslastre, Los buques distintos de los petroleros, durante el traslado y la limpieza de los tanques de combustible líquido y la descarga del lastre y de las aguas de lavado.

Las operaciones efectuadas en la terminal marítima de los barcos petroleros, en las que pueden derramarse hidrocarburos durante el embarque y desembarque de carga y la toma de combustible de todos los tipos de buques y gabarras así como de los buques atracados y la precipitación de hidrocarburos desde la atmósfera influyen en las concentraciones altas de éstos, por lo que se asocian a los sitios de actividad industrial y reflejan claramente los procesos que ahí se desarrollan (IMP, 2000b).

Metales

Existen diversos criterios o índices para atribuir un grado o un valor a la contaminación por metales en sedimentos, desde los más sencillos como el factor de contaminación en el que se toma en consideración la concentración del elemento en la muestra y la concentración del elemento correspondiente a su valor de fondo (Rubio *et al.*, 2000), a los más complejos que incluyen una normalización para minimizar el efecto de tamaño de grano tales como el factor de enriquecimiento o el índice de geoacumulación y otros criterios como los sugeridos en guías internacionales para calidad del sedimento de acuerdo a los niveles de efecto tóxico en comunidades biológicas, proponiendo dos valores: ERL (nivel de efectos de rango bajo) y ERM (nivel de efectos de rango medio) (Long *et al.*, 1995).

Los sitios en que el mayor número de metales (siete) excedieron el criterio ERL fueron el puerto y antepuerto así como el Arroyo Zanjón. El Río Tehuantepec cinco metales, el Estero La Ventosa y la presa Benito Juárez cuatro metales y solamente dos en el área litoral sobrepasaron dicho criterio.

La mayoría de los metales empleados en actividades industriales manifiestan su presencia en las regiones costeras tanto del Golfo como del Pacífico mexicano, sobre todo en las cercanías de las refinerías de petróleo, fabricas de fertilizantes, empresas de minería y metalurgia, y desde luego en las cercanías de ciudades con gran número de habitantes (INEGI, 2001). Las descargas domésticas sin tratamiento aportan grandes volúmenes de lodos enriquecidos con metales como Pb, Zn, Cd y Cr, que son descargadas en los ríos o directamente en el mar. Los metales también son introducidos en ambientes marino y costero por el lavado de suelos, intemperismo de las rocas, erupciones volcánicas, empleo de fertilizantes y plaguicidas en zonas agrícolas, y el desecho de fundidoras y plantas de cromado (Rosales-Hoz *et al.*, 1999).

El cadmio fue el metal que además de exceder el criterio ERL en seis estaciones del litoral y en todas las estaciones de los demás sitios así como presentar un índice de geoacumulación de moderadamente a fuertemente contaminado indica una fuente de diversos tipos, este metal es un elemento traza con variados usos, incluyendo electrochapado, fabricación de pigmentos, baterías, alambres, materiales fotográficos, cristal, cerámica, biocidas y como estabilizador de plásticos; sus principales fuentes en ambientes acuáticos son el lavado de los suelos agrícolas y descargas de la minería y la industria, desechos municipales y lodos de plantas de tratamiento (Green-Ruiz, 2000).

El aporte de Cd particulado puede estar ligado a un proceso metabólico del fitoplancton (González *et al.*, 1991). Segovia-Zavala *et al.* (1998) analizaron muestras de agua marina en la frontera entre México y California y observaron que altas concentraciones de Cd se asociaron a altos niveles de nutrientes y a bajas temperaturas, características propias de las zonas de surgencias. De acuerdo con Förstner y Wittman (1979) el Cd es uno de los principales componentes metálicos de las aguas municipales, por lo que en el área de estudio las descargas de aguas municipales e industriales pueden originar la presencia de este metal.

El Pb se relaciona con la introducción continua y a veces masiva de aguas residuales, así como con las emisiones atmosféricas provenientes de las áreas urbanas e industriales, lo cual se agrava con el crecimiento demográfico (Villanueva y Páez-Osuna, 1996). Las fuentes principales del Zn en sistemas acuáticos incluyen los efluentes de las aguas residuales, explotación minera y fundición, así como de las actividades de la refinación, la combustión de madera, incineración de desechos y otras emisiones atmosféricas (CCREM, 1996). En general, Cu, Pb y Zn son buenos indicadores de actividad humana y pueden llegar al mar por vía de efluentes domésticos, industriales, por las descargas de los ríos o emanaciones a la atmósfera, pero posteriormente son depositados y acumulados en el sedimento mediante procesos biogeoquímicos (Acosta *et al.*, 2002).

El comportamiento de los metales en sedimentos permite inferir que la distribución de éstos se encuentra relacionada con el patrón general de corrientes, siguiendo el flujo dominante con dirección SE-NO, el que a la altura de punta Conejos cambia su dirección hacia mar adentro (IMP, 2000b). Estas condiciones pueden favorecer procesos de depositación más intensos y mayores tiempos de residencia en esta área, cuya presencia puede ser atribuible a diversos procesos, que en algunos casos se asocian con su transporte por las corrientes, y en otros son un reflejo del uso del sistema. Sin embargo, en todos los casos se evidencia una dinámica intensa que favorece los procesos de remoción de los contaminantes en el tiempo y en el espacio (IMP, 2000b).

De tal forma, el comportamiento general de los contaminantes en los sedimentos muestra una fuerte correspondencia con los procesos físicos que gobiernan el sistema, en los que la dinámica de las masas de agua determina en mayor medida los mecanismos de transporte, destino y tiempos de residencia de los mismos. Dentro de éstos, la construcción de las escolleras, así como el perfil topográfico de la costa, tienen una importancia relevante como elementos modificadores de la corriente principal, provocando un frente que promueve los dos núcleos de acumulación en los extremos oeste y este y la salida de las aguas desde el centro, lo que ayuda a la renovación de la masa de agua con la consecuente autodepuración del sistema (IMP, 2000b).

Toxicidad aguda en sedimentos

La interpretación de la dinámica ecotóxica ambiental, permite a partir de la complementariedad de las evaluaciones de toxicidad con los análisis de contaminantes del ambiente una mejor comprensión de los procesos nocivos que tienen lugar en un sistema, de manera que proporcionan medidas más cercanas al riesgo ecológico potencial de una fuente contaminante específica, o del impacto a largo plazo de actividades antropogénicas (Rand, 1995).

Los resultados del porcentaje de efecto fisiológico del elutriado o de la fase de partículas suspendidas sobre la capacidad de luminiscencia de la bacteria, fueron bajos ya que no se superó el 50% de efecto. Esta fase se evalúa con el fin de saber el potencial tóxico del agua atrapada en sedimento y en estrecho contacto con éste, y que contiene los contaminantes disueltos en la matriz acuosa que son liberados del sedimento. Los resultados sugieren poca biodisponibilidad o baja concentración de contaminantes disueltos en el agua que se encuentra en contacto con el sedimento (Meigen, 1991).

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta área durante otras campañas realizadas entre julio de 1997 y agosto de 1998, los sitios que han resultado con valores tóxicos en algunas estaciones, son del Arroyo Zanjón y Estero La Ventosa. En estos sitios, la problemática ambiental se ha asociado principalmente a actividades industriales y municipales, derrames esporádicos de residuos procedentes de las operaciones de la refinería y de la terminal marítima; vertimiento inadecuado de las aguas residuales municipales; escorrentías que transportan tanto sustancias derivadas de las actividades agropecuarias, industriales y domésticas, así como material terrígeno, proveniente de la erosión del suelo donde han talado la vegetación original para el establecimiento de núcleos de población, infraestructura e industrias; todas estas conjuntamente producen acumulación o azolvamiento y se consideran en cierta medida, causas potenciales de la degradación de la calidad ambiental (IMP, 2000b).

Los resultados obtenidos con *Mysidopsis bahia* no registraron valores de mortalidad mayores al 50 % para la fase de partículas suspendidas en ninguna de las estaciones

evaluadas, lo que indica que para esta especie las concentraciones mayores al 100 % no presentan alteraciones aparentes, sin embargo, es importante mencionar que esto no significa que no se existan a largo plazo daños crónicos. Se han llevado a cabo bioensayos con esta especie en sistemas base agua y recortes de perforación, así como con ocho fluidos genéricos de perforación de pozos petroleros, obteniendo resultados similares con *Mysidopsis bahia* y/o *Litopeneus setiferus* (Méndez-Vargas, 2002).

Los resultados de los bioensayos con las especies *Artemia franciscana* y *Artemia* sp. indicaron que la FPS de los sedimentos evaluados de todas las estaciones del PA y de la estación 1 del EV fueron más tóxicas que las demás estaciones del EV y del área litoral. El bioensayo con Microtox (15-min EC50 *Vibrio fischeri*) mostró una respuesta similar con la fase sólida de sedimento para las estaciones 2 y 4 del PA. El análisis estadístico mostró que la especie *Artemia* sp. (Oaxaca) es significativamente más sensible que *Vibrio fischeri* y *Artemia franciscana*. Se han realizado bioensayos con esta especie (*Artemia franciscana*) en sistemas base agua y recortes de perforación, así como con fluidos genéricos de perforación de pozos petroleros, obteniendo resultados similares a las obtenidas con *Mysidopsis bahia*, proponiéndola como una especie alternativa para la evaluación de los fluidos de perforación por su facilidad de manejo y bajos costos en relación a las demás especies propuestas por la EPA (Méndez-Vargas, 2002). Por otra parte, se han hecho estudios moleculares, citogenéticas y morfológicos de poblaciones de *Artemia* de Cuba, México y Estados Unidos concluyendo que las poblaciones de de esta especie de Cuba y México, corresponden a la superspecie *Artemia franciscana*. Las diferencias moleculares, citogenéticas y morfológicos entre las poblaciones de México soportan el concepto, que las poblaciones del sur de México (Oaxaca) pueden representar especies diferentes (Tizol-Correa *et al.*, 2006).

Los bioensayos utilizando la especie *Daphnia magna* sobre los elutriados de los sedimentos de las áreas AZ, PBJ y RT mostraron una respuesta toxicológica en todos los casos, por lo que no hubo diferencias significativas estadísticamente hablando entre las respuestas de esta especie entre los tres sitios. Esta especie ha sido utilizada en diferentes tipos de pruebas toxicológicas, se ha trabajado mucho para establecer las condiciones de

cultivo y mantenimiento de aquellas especies de referencia que sirven para pruebas de toxicidad y un ejemplo son todos los estudios que existen del cladóceros de agua dulce *Daphnia magna*. La biología, la ecología y por tanto el cultivo en laboratorio de este organismo son bien conocidos, de tal forma que los clones cultivados bajo condiciones estrictas son garantizados para pruebas toxicológicas (Martínez-Jerónimo, 1995).

De esta manera, se llevó a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en los sistemas que presentaron una respuesta toxicológica con *Vibrio fischeri* y las respuestas con los organismos *Artemia franciscana*, *Artemia* sp. (Oaxaca) y *Daphnia magna*. Los resultados obtenidos de las pruebas de toxicidad en el Arroyo Zanjón indican una correlación con los contaminantes lo que puede ser atribuido a las características de la localidad, como material terrígeno, proveniente de la erosión del suelo donde han talado la vegetación original para el establecimiento de núcleos de población, infraestructura e industrias; todas estas conjuntamente producen acumulación o azolvamiento y se consideran en cierta medida, causas potenciales de la degradación de la calidad ambiental (Ortiz-Gallarza *et al.*, 2005).

En el Estero La Ventosa, *Artemia franciscana* obtuvo una sensibilidad menor a la fase de partículas suspendidas en comparación con *Vibrio fischeri*. Las estaciones evaluadas con *Daphnia magna* resultaron ser más sensibles a la fase de partículas suspendidas en comparación con *V. fischeri*, además de presentar en ambos casos una relación con los contaminantes asociados con las características de las dos estaciones que corresponden a la cabeza del estero. En estos puntos hay pequeños islotes de pastos, característicos de los humedales. En la parte Noreste de la cabeza del estero se observa basura acumulada y se encuentra la salida de un emisor proveniente de la refinería. En la margen oriental, el estero está bordeado por abundante vegetación, principalmente de mangle; la margen occidental presenta escasa vegetación, compuesta por arbustos, pastos y escasos mangles. En este ecosistema se practica la pesca artesanal, extrayendo fundamentalmente camarón blanco y café, jaiba, langostino y especies de escama (Tapia-Martínez *et al.*, 1995). Se comunica con el Arroyo Zanjón y el estero la Vaca y esporádicamente ha sufrido el impacto de algunos derrames de hidrocarburos

procedentes de la refinería (Tapia-Martínez *et al.*, 1995). El comportamiento de estos resultados coinciden con los obtenidos con *Vibrio fischeri* (IMP, 2000), en algunas de las estaciones del estero en evaluaciones realizadas en otras épocas, es decir, que se presenta un grado de toxicidad en los principales sitios con influencia de la refinería como del área portuaria.

El comportamiento que caracterizó a la presa Benito Juárez fue semejante al del Arroyo Zanjón. En este sentido, la problemática ambiental de esta zona se basa en dos aspectos fundamentales: el primero es la fuente de erosión de la cuenca, la cual debido a un uso inadecuado del suelo, provoca serios problemas de azolvamiento en la zona de riego; de los impactos que ha sufrido este cuerpo acuático fue la transformación de un sistema biológico terrestre en acuático, lo cual implicó cambios ambientales. Un segundo efecto es el impacto que se relaciona con la laguna Superior, debido a que los drenes del Distrito de Riego No. 19 (al que pertenece la cuenca del Río Tehuantepec y el sistema lagunar Superior-Inferior) desembocan directamente a la laguna acarreado fertilizantes, insecticidas y herbicidas como urea, paratión etílico, Dipterex, Servín y Gesparín combinados, además de las descargas de aguas negras vertidos a los ríos Perros y Chicapa que desembocan a la laguna Superior (Méndez-González, 1998).

En la cuenca del Río Tehuantepec se identifican dos tipos de zonas críticas, la primera es provocada por prácticas agrícolas, ganaderas y forestales ubicada en la parte sur y cercana a la desembocadura del río. La segunda es aquella que aún conserva la vegetación original pero que presenta pendientes de más de 20% y suelos no aptos para uso agropecuario y está ubicada en la parte norte, cercana a la presa Benito Juárez. Otro aspecto importante es que el 40% de las tierras dominadas por las obras de riego, presenta problemas de salinidad y/o sodicidad y el 15% tiene problemas de empantanamiento provocado por la elevada recarga del manto freático (IMP, 2000b). Actualmente existen problemas asociados a la actividad urbana, debido a que durante su trayecto el Río Tehuantepec pasa por los poblados de Tehuantepec y San Blas, donde es utilizado para descargas de aguas negras, tiraderos de basura a cielo abierto y otros desechos domésticos que probablemente producen daños ecológicos y a la salud

humana, tomando en cuenta que el agua del río abastece a gran parte de los poblados de la región.

En las inmediaciones del poblado de Tehuantepec se observaron manchones pequeños de *Eichhornia crassipes* (lirio acuático) indicando eutroficación derivada de las descargas de aguas negras, así como depósitos irregulares de basura y de residuos sólidos, en las márgenes más cercanas, señalando que el manejo de la basura municipal no es apropiado (Ortiz-Gallarza *et al.*, 2005).

Las diferencias entre *Vibrio fischeri* y *Daphnia magna* han sido también observadas por (Santiago *et al.*, 1993 y Do Hong *et al.*, 2000) en sedimentos de agua dulce, ellos obtuvieron una mayor sensibilidad para *V. fischeri* de los extractos acuosos así como de extractos orgánicos. Por otra parte, Davoren *et al.* (2005), llevaron a cabo una evaluación ecotoxicológica en sedimentos estuarinos utilizando *V. fischeri*, *A. salina* y el alga *S. costatum* obteniendo resultados similares en este estudio a los reportados por dichos autores, lo que indica que las tres especies utilizadas permiten dar una aproximación de la calidad de los sedimentos, permitiendo dar una señal rápida de las condiciones actuales del ecosistema.

En este sentido, el Arroyo Zanjón y el Estero La Ventosa, por su tamaño, forma y ubicación, presentan condiciones óptimas para ser considerados en el monitoreo de la intensidad de las actividades antrópicas en la región, y servir como indicadores de los posibles eventos de contaminación que ocurran en la bahía La Ventosa, o de aquellos de origen continental, que influyan al ambiente costero.

Diferentes organismos de prueba dan diversos tipos de información acerca de la toxicidad de sedimentos y difieren en su capacidad en evaluar la toxicidad del sedimento. El primer criterio para la selección de especies de prueba debe ser que dichas especies tengan una importancia ecológica y/o económica y una relativa sensibilidad a la contaminación de los sedimentos (Davoren *et al.*, 2005). De esta forma, de acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio *V. fischeri*, las dos especies de *Artemia* y *Daphnia magna* resultaron ser útiles para evaluar las FPS de los sedimentos de los cuerpos receptores del área de Salina Cruz, Oax.

5. CONCLUSIONES

1.-Las concentraciones promedio y nominales de los hidrocarburos aromáticos totales presentaron los valores más altos en el Puerto-Antepuerto y en la estación (3) del Arroyo Zanjón, ubicada frente a la refinería. Sin embargo, estas concentraciones son comparables con localidades moderadamente contaminadas en sitios con actividades petroleras y fueron ligeramente superiores estadísticamente a los obtenidos en otros años en el área de Salina Cruz, en el período entre 1982-1995.

2.- Las concentraciones de hidrocarburos aromáticos y del material orgánico extraíble más altas en el área de Salina Cruz se observaron en el puerto y antepuerto. Este comportamiento puede considerarse típico de estos sitios, ya que se trata de una zona con poca circulación de sus aguas, además someras y por ende la actividad portuaria intensa lo que permite que se acumulen diversos contaminantes.

3.-El cadmio de los nueve metales evaluados, fue el que obtuvo una dispersión menor de las concentraciones, superó el criterio ERL y obtuvo la clasificación de acuerdo al Índice de Geoacumulación de no contaminado a fuertemente contaminado en toda el área de estudio.

4.-Los metales cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc presentaron las concentraciones promedio más altas en el área del PA, AZ y EV superando en el criterio ERL en la mayoría de las estaciones del PA y AZ.

5.- Los sitios más contaminados por metales pesados, por hidrocarburos aromáticos totales así como de material orgánico son básicamente el área del Puerto-Antepuerto y el Arroyo Zanjón, condiciones que pueden ser consideradas como características de una zona portuario-industrial y por otro lado, las concentraciones elevadas de estos contaminantes en el Arroyo Zanjón permiten suponer que son debidas a la cercanía de las instalaciones de la refinería.

6. -Las relaciones entre los diferentes parámetros evaluados en los sedimentos del área de Salina Cruz registraron mediante el análisis de cúmulos la separación de las áreas del

puerto y antepuerto con un comportamiento diferente al área costera, lo que corroboró la caracterización de los principales contaminantes indicativos de la actividad petrolera, donde se localiza la Terminal Marítima de PEMEX- Refinación y en donde se lleva a cabo el transporte y almacenamiento de los productos refinados.

7.-La toxicidad más alta utilizando *Vibrio fischeri* se presentó en el arroyo, sin embargo no superaron el 50% de efecto, por lo que no se consideran efectos agudos significativos, sin embargo, permiten dar una idea preliminar de la toxicidad del ambiente.

8.-La mortalidad de los organismos de *Mysidopsis bahia* en los ensayos no fueron mayores al 50 % en la concentración del 100 % de la fase de partículas suspendidas en cada una de las muestras evaluadas, por lo tanto no fue posible aplicar ningún método estadístico para determinar la CL₅₀.

9.-Las especies que resultaron más sensibles a la FPS de los sitios evaluados fueron *Artemia franciscana* y *Artemia* sp. (Oaxaca), obteniendo una CL₅₀ de 66.61 en la estación 7 del antepuerto y la estación 1 del estero Ventosa (63.11).

10.- Los valores de CL₅₀ más altos fueron para *A. franciscana*, lo que indica que la FPS es menos tóxica para esta especie que para *Artemia* sp.

11.-La especie *Vibrio fischeri* resultó ser más sensible que la especie *Daphnia magna* a los extractos acuosos de los sedimentos del Arroyo Zanjón así como de la presa “Benito Juárez” y el Río Tehuantepec.

12.-La especie *Daphnia magna* resultó ser más sensible que la especie *Vibrio fischeri* a los extractos acuosos de los sedimentos de dos de las cinco estaciones del Estero La Ventosa, las que presentaron características de agua dulce.

13.- La especie *Vibrio fischeri* resultó ser más sensible que la especie *Artemia franciscana* a los extractos acuosos de los sedimentos de tres de las cinco estaciones del Estero La Ventosa, las que presentaron características de aguas salinas.

14.-Se observó una clara relación entre los resultados obtenidos a través de los bioensayos y las concentraciones de contaminantes en los sedimentos de los cuatro sitios evaluados.

15.- La especie *V. fischeri* sigue siendo el organismo que da una respuesta rápida en una evaluación toxicológica, sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos en los diferentes sedimentos con las diferentes especies ensayadas, se observa que los resultados dependen de las características granulométricas así como de la especie utilizada, ya sea que se trate de una especie de agua dulce (*Daphnia*) o de una marina (*Mysidopsis* y/o *Artemia*).

16.- Los resultados aquí presentados constituyen el primer antecedente para el área de estudio acerca de la evaluación ecotoxicológica de la FPS de los sedimentos a través de una batería de bioensayos.

Las pruebas ecotoxicológicas realizadas en este estudio permiten dar una primera aproximación de las condiciones en que se encuentran los sistemas acuáticos influenciados por actividades industriales y/o por el impacto sobre el sedimento de actividades de dragado, los que influyen en la biota tanto en la columna de agua como sedimentaria. Por otro lado, este estudio proporciona los fundamentos para dar inicio en la definición de qué organismo de la cadena alimenticia puede ser utilizado en futuros estudios para evaluar de manera rápida la toxicidad de la fase de partículas suspendidas en sitios con una problemática similar. El contar con evaluaciones de la toxicidad en la matriz sedimentaria abrirá paso para que las autoridades ambientales promuevan estudios de este tipo y se puedan dar lineamientos para regular las actividades de dragados en México.

5.1 RECOMENDACIONES

Llevar a cabo evaluaciones de bioacumulación en los sitios en donde se obtuvieron correlaciones entre los contaminantes orgánicos, metales pesados y las características granulométricas con los resultados de toxicidad, lo que permitirá complementar la información y de esta manera cuál especie podría ser un mejor indicador de toxicidad.

Incluir un análisis de bioensayos en el que se utilice a un pez para completar la batería de organismos de la cadena alimenticia lo que permitirá obtener un panorama más amplio del comportamiento de la Fase de Partículas Suspensas en estos sistemas.

6. LITERATURA CITADA

- Baudo, R., Giesy, J. P., Muntau, H. (1990). Sediments: chemistry and toxicity of in-place pollutants. Lewis Publishers, Chelsea.
- Beg, R. Giesy, J.P., Muntau, H. (2001) Sediments: chemistry and toxicity of in-place pollutants. Lewis Publishers, Chelsea.
- Blaise, C. (1991). Microbiotests in aquatic ecotoxicology: characteristics, utility and prospects. Environ. Toxicol. Water Qual. 6:145-155.
- Brouwer, H., Murphy T, McArdle L. (1990). A sediment contact bioassay with *Photobacterium phosphoreum*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 9:1353-1358.
- Buikema, A.L., Niederlehner, B. R., Cairns Jr. J. (1992). Biological monitoring. Part IV- Toxicity testing. Water. Res. 16:299-262.
- CCREM. (1996) Canadian water quality guidelines. Task Force in Water Quality Guidelines. Canadian Council of Resource and Environment Ministers. Ottawa, ON, Canada. 118 pp.
- CETESB. (1991). Agua-Teste de Toxicidade com *D. similis* Clauss 1876 (Cladocera, Crustacea), Metodo de ensaio, L5.018, CETESB.
- Chapman, P.M. (1989) Marine Sediment Toxicity Tests; American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA, USA, 391-402.
- Couture, P., Blaise, C., Cluis, D., and Bastien, C. (1989). Zirconium toxicity assessment using bacteria, algae and fish assays. Water, Air, and Soil Pollution, 47, 87-100.

- Davoren, M., O'Halloran, J., Hartl, M.G.J., Sheehan, D. O'Brien, N.M., Van Pelt FNAM, Mothersill, C. (2005). A test battery approach for the ecotoxicological evaluation of estuarine sediments. *Ecotoxicology* 14, 741-755.
- Diario Oficial de la Federación (1996). NMX-AA-112-1995-SCFI. Análisis de agua y sedimento. Evaluación de toxicidad aguda con *Photobacterium phosphoreum*. Método de prueba. Dirección General de Normas, México.
- Diario Oficial de la Federación (1996). NMX-AA-087-1995-SCFI. Análisis de agua. Evaluación de toxicidad aguda con *Daphnia magna* Straus (Crustacea-Cladocera). Método de prueba. Dirección General de Normas, México.
- Diario Oficial de la Federación (1996). NMX-AA-110-1995-SCFI. Análisis de agua. Evaluación de toxicidad aguda con *Artemia franciscana* Kellogg (Crustacea-Anostraca). Método de prueba Dirección General de Normas, México.
- Diario Oficial de la Federación (1996). NOM-001-ECOL-1996. Norma Oficial Mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación. Enero de 1997.
- Do Hong L Chi, Becker-van Slooten K., Sauvain J.J., Tarradellas, J. (2000) Toxicity of sediments from the Ho Chi Minh City canals and Saigon river, Viet Nam. *Journal of Environmental Toxicology* 15(5):469-475
- Emery, F.O. (1938). Rapid Method of Mechanical Analysis of Sands. *Journal of Sedimentary Petrology*. 8(3):105-111.
- EPS (Environmental Protection Series). (2002). Biological Test method: reference method for determining the toxicity of sediment using luminescent bacteria in a solid-phase test. Method Development and Applications Section. Environmental Technology Centre. Environment Canada. Ottawa Notario. Report EPS 1/RM/42. 83 pp.
- Evangelista AJ, Nacimiento IA, Pereira SA, Lopes MB, Martins LK, Fillmann G. (2005). Evaluación del potencial de toxicidad de sedimentos marinos en áreas de

la industria petrolera: Un nuevo método basado en respuestas de postlarvas de camarones. *CienciasMarinas* 31: 43-55

Folk, R.L. (1974). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hempill. Austin, TX. 154 pp.

Forstner, U., Wittmann, G.T.W. (1979). *Marine pollution in the aquatic environment*. Springer-Verlag. Germany. 486 pp.

Fuentes-Aguilar, L. (1983). El puerto industrial de Salina Cruz, Oaxaca, una estrategia de desarrollo sectorial. *Bol. Inst. de Geografía, UNAM., México.* (13): 211-238.

Gaetz, C., Montgomery R., Duke T. (1986). Toxicity of used drilling fluids to Mysids (*Mysidopsis Bahía*). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/J-86/237 (NTIS PB87169579).

Gaughan, P. (1981). Metodología de muestreo de sedimentos para la obtención de datos químicos y biológicos con relación a la contaminación marina. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C. Informe Técnico OC-81-02.

Gobierno del Estado de Oaxaca. (1980). *Ecoplan del Estado de Oaxaca. Desarrollo Urbano*. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, Subsecretaría de Asentamientos Humanos. Dirección General de Ecología Urbana. 261 pp.

González-Lozano, M.C., Méndez-Rodríguez, L., López-Veneroni, D.G., Vázquez-Botello, A. (2006). Evaluación de la Contaminación en Sedimentos del Área Portuaria y Zona Costera de Salina Cruz, Oaxaca. México. *Interciencia.* 31(9):647-656.

González-Macías, M.C., M.C. González-Lozano, García-Vázquez. V.M. (1994). Efectos de los dragados de mantenimiento en el ambiente costero en Coatzacoalcos, Ver. *Oceanología* 1(4):109-126.

González-Macías, C., Schifter, I., Lluch-Cota, D.B. Méndez-Rodríguez, L., Hernández-Vázquez, S. (2006). Distribution, Enrichment and Accumulation of Heavy Metals in Coastal Sediments of Salina Cruz Bay, México. *Environmental Monitoring and Assessment.* 118:211-230.

- González-Macías, C., Schifter, I., Lluch-Cota, D.B. Méndez-Rodríguez, L., Hernández-Vázquez, S. (2007). Environmental Assessment of Aromatic Hydrocarbons – Contaminated Sediments of the Mexican Salina Cruz Bay. Environmental Monitoring and Assessment. DOI. 10.1007/s10661-006-9572-3.
- González-Ramírez, M. (1973). *El Codiciado Istmo de Tehuantepec*. Colección Metropolitana. México. p. 1-117.
- Guilbaut, G. G. (1973). *Practical Fluorescence: Theory, Methods and Techniques*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Gutiérrez E., Lerdo, Huerto A., y Jesús García. (1990) Procedimientos de evaluación tóxica de efluentes industriales líquidos utilizando a *Daphnia magna* Straus (Cladocera : Custacea). IMTA. CNA. México 105 pp.
- Green-Ruiz, C. R. (2000). Geoquímica de metales pesados y mineralogía de la fracción arcillosa de los sedimentos de cuatro puertos del Golfo de California. Tesis de Doctorado (Oceanografía Geológica).UNAM. Mazatlán, Sinaloa. 329 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2001). XII Censo General de Población y Vivienda, 2000. Resumen General. [<http://www.inegi.gob.mx>].
- Ingersoll, C.G. (1995). Sediment test. In: G.M. Rand (ed.), *Fundamentals of Aquatic Toxicology*. Taylor and Francis, USA, pp. 231-255.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1994a). Evaluación de los efectos en el ambiente causados por la depositación de sedimentos dragados de la Dárena de Pajaritos en Coatzacoalcos, Ver. Informe Final, EOE-8149, México.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1994b). Determinación de material orgánico extraíble en sedimento con tetracloruro de carbono por espectroscopía de IR. Método IMP-QA-604. México, D. F.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1994c). Determinación de hidrocarburos aromáticos por espectrofluorimetría. Método IMP-RP-QA-610. México, D. F.

- Instituto Mexicano del Petróleo. (1996). Caracterización fisicoquímica y biológica de la bahía y Estero La Ventosa y las lagunas Superior e Inferior, Salina Cruz, Oax. Proyecto DOC-8151. Diagnóstico Ambiental del Estero La Ventosa. Subdirección de Protección Ambiental, Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad, Área de Control Ambiental, Grupo de Trabajo de Diagnóstico Ecológico. Instituto Mexicano del Petróleo. VIII/96.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1997a). Creación de marcos de referencia ambientales para los dragados de mantenimiento en Terminales Marítimas de Pemex-Refinación (Terminal Marítima de Pajaritos, Ver.). Proyecto DOC-8063. Subdirección de Protección Ambiental. Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Instituto Mexicano del Petróleo. IV/97.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1997b). Creación de marcos de referencia ambientales para los dragados de mantenimiento en Terminales Marítimas de Pemex-Refinación (Terminal Marítima de Cd. Madero, Tamps.). Proyecto DOC-8097. Subdirección de Protección Ambiental. Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Instituto Mexicano del Petróleo. VI/97.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1998a). Creación de marcos de referencia ambientales para los dragados de mantenimiento en Terminales Marítimas de Pemex-Refinación (Terminal Marítima de Salina Cruz, Oax.). Proyecto DOC-8042. Subdirección de Protección Ambiental. Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Instituto Mexicano del Petróleo. V/98.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1998b). Creación de marcos de referencia ambientales para los dragados de mantenimiento en Terminales Marítimas de Pemex-Refinación (Terminal Marítima de Guaymas, Son.). Proyecto DOC-8040. Subdirección de Protección Ambiental. Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Instituto Mexicano del Petróleo. VII/98.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1998c). Creación de marcos de referencia ambientales para los dragados de mantenimiento en Terminales Marítimas de Pemex-

- Refinación (Terminal Marítima de Lerma, Camp.). Proyecto DOC-8041. Subdirección de Protección Ambiental. Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Instituto Mexicano del Petróleo. VII/98.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1999a). Evaluación ambiental del área afectada por el derrame de combustóleo en Salina Cruz, Oax. (Derrame del 9 de mayo de 1999). Informe Final, P.01003, México.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (1999b). Evaluación ambiental del área afectada por el derrame de combustóleo en Salina Cruz, Oax. (Derrames del 9 de mayo y 1 de agosto de 1999). P.01003, México.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2000a). Evaluación ambiental del derrame provocado por la toma clandestina del poliducto Minatitlán-Salina Cruz, Oax., en el Arroyo Igú y Laguna Superior, Oax. Informe Final. P.01350, México.
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2000b). Estudio ambiental integral de la región de Salina Cruz, Oax. Subdirección de Protección Ambiental. Gerencia de Control Ambiental y Sustentabilidad. Informe Final. México. 350 pp.
- Intera Information Technologies. (1992). Estudio de Ordenamiento Ecológico Urbano-Portuario para la región de Salina Cruz, Oaxaca. Ontario Canada. 174 pp.
- Jiménez, J. A. (2001). Sedimentos marinos contaminados y alternativas de actuación con énfasis en la técnica de recubrimiento. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Lakowicz, J. R. (1983). Principles of Fluorescence Spectroscopy Plenum Press, New York.
- Landaeta, C. (1995). Potential environmental impacts generated by dredging and disposal dredged material processes. Colorado, USA, octubre, 1995.
- Long, E.R., MacDonald, D., Smith, S. Calder, F.D. (1995). Incidence of Adverse Biological Effects within Ranges of Chemical Concentrations in Marine and Estuarine Sediments. Environmental Management. 19(1):81-97.

- Long, E.R., MacDonald, D. (1998). Recommended Uses of Empirically Derived, Sediment Quality Guidelines for Marine and Estuarine Ecosystems. *Human and Ecological Risk Assessment*. 4(5):1019-1039.
- MacDonald, D., Carr, R.S., Calder, F.D., Long, E.R., Ingersoll, Ch. G. (1996). Development and Evaluation of Sediment Quality Guide Lines for Florida Coastal Waters. *Ecotoxicology*. 5:253-278.
- Martínez-Jerónimo, F. F. (1995). Autoecología experimental de *Daphnia magna* (CRUSTACEA:CLADOCERA) y su aplicación en estudios de toxicología acuática. Tesis doctoral. E.N.C.B. I.P.N. México, D.F.
- Meigen, E.A. (1991). Molecular biology of bacterial luminiscence. *Microbiological Reviews*. 55:123-126
- Méndez-González, M. E. (1988). Evaluación de los efectos sobre el medio físico-biótico asociados a la construcción de la presa Benito Juárez en el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. Tesis Licenciatura, Fac. Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 72 pp.
- Méndez-Vargas, N.T. (2000). Evaluación de la toxicidad aguada en sistemas base agua y recortes de perforación provenientes de un pozo petrolero empleando *Artemia franciscana* Tesis Licenciatura. Fac. de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. 108 pp.
- Microtox Corp. (1992). *Procedings Manual: Detailed Protocols*. Vol. 3 pp. 201-321.
- Monreal, A., Salas, D. (1998). Dinámica y Estructura Termohalina. En: Tapia-Garcia, M (Ed). *El Golfo de Tehuantepec: el Ecosistema y sus Recursos*. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. S y G editores S.A. de C.V. México, D.F. 2:13-26.
- Moriarty F. (1990). *Ecotoxicology the study of pollutants in ecosystem*. 2nd ed. Ed. Academic Press London.

- Müller, G. (1979). Schwermetalle in Den Sediments Des Rheins-Veränderungen Seit 1971. *Umschau*. 79:778–783.
- Nimmo, D. R., Hamaker, T. L. (1982). Mysids in toxicity testing- a review. *Hydrobiologia*, Vol. 93, pp. 171-178.
- NOAA. (1999). Screening Quick Reference Tables. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D.C.
- Ortiz-Gallarza, S.M., Hernández-Llamas, A., Ortega-Rubio A. (2005). Diseño, construcción y aplicabilidad del índice de evaluación ambiental de ecosistemas acuáticos (IEAEA). *Interciencia*. 30(3):126-133.
- Ortiz-Wadgymar, A. 1971. *Aspectos de la economía del Istmo de Tehuantepec*. UNAM. México. p. 1-114.
- Parga-Lozano, C.H., Marrugo-González, A.J., Fernández Maestre, R. (2002). Hydrocarbon Contamination in Cartagena Bay, Colombia. *Marine Pollution Bulletin*. 44:71-81.
- Parrish, R. P., Macauley, J. M. (1986). Acute toxicity of two generic drilling fluids and six additives alone and combined, to Mysids (*Mysidopsis bahia*). Environmental Research Laboratory, Gulf Breeze, Florida, USA, 415-426
- PEMEX. (1993). Estudio de Impacto Ambiental de la Infraestructura portuaria de Salina Cruz, Oax. Gerencia de Protección Ambiental. México, D.F., México. 146 pp.
- Perkin Elmer. (1976). Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry. Perkin Elmer. USA.
- Pica-Granados, Y. (1994). Diagnóstico Ambiental del Impacto por Actividades Petroleras en el Puerto de Salina Cruz, Oax. Tesis de Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias. UNAM. México. 102 pp.
- Pica-Granados, Y., Vázquez-Botello, A. y Villanueva, S.F. (1994). La Contaminación por Actividades Petroleras en el Puerto de Salina Cruz. Serie. Grandes Temas de la Hidrobiología. Los sistemas litorales. UAM-I, UNAM. (2):127-140.

- Quereshi, A.A., Bulich, A.A., Isenberg, D.L. (1998). Microtox* Toxicity Test Systems- Where They Stand Today. In. *Microscale Testing in aquatic toxicology. Advances, Techniques and Practice*, P. Wells, K. Lee & C. Blaise (eds), CRC. Washington; pp. 185-218.
- Rand, G.M., Wells, P.G., McCarty L.S. (1995). Introduction to aquatic toxicology. In Rand, G. M. Ed. *Fundamentals of aquatic toxicology. Effects, environmental fate and risk assessment*. 2 ed. Taylor & Francis. Washington. P.3-67
- Reyna-Cabrera, I. E. y Ramos-Cruz, S. (1998). La pesquería de camarón de altamar. In: *El golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos* (M. Tapia-García, ed.). Universidad Autónoma Metropolitana, México. Cap. 12: 163-178.
- Rivière D'Arc, H. y M. F. Prévot-Schapira. (1984). Las inversiones públicas y la región: el Istmo de Oaxaca. In: *El Puerto Industrial de Salina Cruz, Oaxaca. Seminario Franco-Mexicano*, julio, 1982. Instituto de Geografía, UNAM/Centro de Investigaciones y Documentación de América Latina (CREDAL/CNRS). México. p. 137-170.
- Rivero-Beltrán, C. y Benítez-Torres, J. A. (1988). Observaciones hidrológicas de Salina Cruz, Oax. y bahías adyacentes (1984-1985). In: *Compendio de Estudios Oceanográficos*. Estación de Investigación Oceanográfica, Dirección General de Oceanografía Naval, Secretaría de Marina. p. 87-191.
- Rodríguez-Grau, J, Esclapés, M.M. (1995). Protocolos estándares para bioensayos de toxicidad con especies acuáticas. Gerencia General de Tecnología. Departamento de Ecología y Ambiente. INTEVEP. PDVSA. 109 pp.
- Rosales-Hoz, L. Carranza-Edwards, A., Santiago-Pérez, S. (1999). Heavy metals in rocks and stream sediments from the Northwestern part of Baja California, México. *Rev. Int. Contam. Amb.* 10: 77-82.
- Rubio, B. Nombela, M.A., Vilas, F. (2000). La contaminación por metales pesados en las Rías Baixas gallegas: nuevos valores de fondo para la Ría de Vigo (NO de España). *J. Iber. Geol.* 26: 121- 149.

- Secretaría de Marina. (1978). Estudio Oceanográfico del Golfo de Tehuantepec. Dirección General de Oceanografía. México. Talleres de la Nación 1 (1).
- Secretaría de Marina. (1980). Estudio Oceanográfico del Golfo de Tehuantepec. Dirección General de Oceanografía. México. Talleres de la Nación 1 (2).
- SEDESOL. (1993). Criterios de Ordenamiento Ecológico para Proyectos Portuarios. Estudio Técnico. INE-ESTADIGRAFIA, S.A.
- Santiago, S., Thomas, R. Larbaigt, R.L., Rossel, G., Echeverria, D., Tarradelas, A. (1993). Suspended matter water elutriate toxicity water and waste. *J. Hydrobiologia* 252, 231-244.
- Sheehan, J.P., Miller, G.C., Butler, G., & Bourdeau, Ph. (1984). Effects on individuals and populations in effects of pollutants at the ecosystem level. John Willey. 19 pp.
- Shiadah, M. A. (1998). Metals pollution in marine sediments of the United Arab Emirates creeks along the Arabian Gulf shoreline. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 60:417-424.
- Shepard, F. (1973). *Submarine geology*. Harper and Row. New York. 517 pp.
- Smith, S.L., MacDonald, D.D., Keenleyside, K.A., Ingersoll, C.G., Field, L.J. (1996). A preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystems. *J. Gt. Lakes Res.* 22: 624–638.
- Sokal, R. R., Rohlf, F. J. (1985). *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, 776 p.
- Soto-Jiménez M Páez-Osuna F (1998) Cd, Cu, Pb, and Zn in Lagoonal Sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California): Bioavailability and Geochemical Fractioning. *Bull. Environ. Contam. Toxicol* 66: 350-356.
- StatSoft. (1998). *Statistica. Software, Release 5.1*. StatSoft Inc. Tulsa, United States of America.

- Stephan, C. (1977). Methods for calculating an LC50. In Mayer F, Hamelink J, eds, Aquatic Toxicology and Hazard Evaluation, (First Annual Symposium). STP 634. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp 65–84.
- Tapia-García, M. (1997). Estructura e interacciones ecológicas de las comunidades de peces de la plataforma continental y la laguna del Mar Muerto, en el Golfo de Tehuantepec al sur del Pacífico mexicano. Tesis Doctoral, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado del Colegio de Ciencias y Humanidades, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México. 135 pp.
- Tapia-García, M. (Ed). (1998). El Golfo de Tehuantepec: El Ecosistema y sus Recursos. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa. S y G editores S.A. de C.V. México, D.F. 239 pp.
- Tapia-Martínez, R.L., Muñoz, C., Cabrera-Mancilla, E. (1995). Prospección ecológica en bahía La Ventosa Municipio de Salina Cruz, Oax. Dictamen Técnico. Centro Regional de Investigación Pesquera de Salina Cruz, Oax. Instituto Nacional de la Pesca. México. 9 pp.
- Taylor, S. R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Acta* 28, 1273-1286.
- Tizol-Correa, R.A., Maeda-Martínez, A.M., Weekers, P.H., Torrentera, L., Maldonado-Montiel, T., Murugan, G. (2006), Phylogenetic relationships of *Artemia* populations from tropical salterns of southern Mexico and Cuba inferred from mitochondrial 16S rRNA and cytochrome oxidase I genes. *Journal of Biogeography*
- Toledo, A. (1994). El Golfo de Tehuantepec. *In: Riqueza y Pobreza en la Costa de Chiapas y Oaxaca*. Centro de Ecología y Desarrollo, A. C. México. p. 33-40.
- Toledo, A. (1995). Geopolítica y Desarrollo en el Istmo de Tehuantepec. Centro de Ecología y Desarrollo. México, D.F., México. 265 pp.

- UNESCO. (1984). Comisión Oceanográfica Intergubernamental. Manual para la Vigilancia del Aceite y de los Hidrocarburos del Petróleo Disueltos o Dispersos en el Agua del Mar y en las Playas. Procedimientos para el Componente Petróleo del Sistema de Vigilancia de la Contaminación del Mar (MARPOL-MON-P). Manuales y Guías 13, 1-37. Place de Fontenoy, París, Francia.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (1999). Procedure for conducting static, acute toxicity test with mysids *Mysidopsis bahia* and drillings fluids. U.S. EPA. Toxicity test variability study. Washington, D.C.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2000). Methods for measuring the toxicity and bioaccumulation of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates, second edition, EPA 600/R-99/064, Washington, D.C.
- Vanhaecke, P., Persoone, G., Claus, C., Sorgeloos, P. (1980). Research on development of a short term standard toxicity test with *Artemia nauplii* in: Persoone G.; P. Sorgeloos; O. Roels and E. Jaspers (Eds.). The brine shrimp *Artemia*. Vol. 1. Morphology, Genetics, Radiobiology, Toxicology. Universa Press, Wetteren, Belgium. pp. 263-285.
- Vázquez-Botello, A.V., Ponce, V.G., Toledo, A., Díaz, G.G., Villanueva S. (1992). Ecología, recursos costeros y contaminación del Golfo de México. Ciencia y Desarrollo. 16(102): 28-47.
- Vázquez-Botello, A.V., Villanueva, S.F., Díaz, G.G., Escobar, E. (1998). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from Salina Cruz Harbor and Coastal Areas, Oaxaca, Mexico. Marine Pollution Bulletin. 36: 554-558.
- Villanueva, F.S., Páez-Osuna, F. (1996). Niveles de metales en el Golfo de México: agua, sedimentos y organismos. En Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benítez JA, Zárate-Lomelí D (Eds.) Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico, y Tendencias. EPOMEX Serie Científica 5. Universidad Autónoma de Campeche. pp. 309-347.

- Weber, C. I. (1993). Methods for measuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms. EPA/600/4-90/027F, 201-269.
- Wedepohl K. H. (1978). Handbook of Geochemistry. Vol. 1. Springer-Verlag, Berlin 325 pp.
- Winger, P. V., Lasier, P.J., White, D. H., Seginak J. T. (2000). Effects of contaminants in dredge material from the lower Savannah river. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 38, 128-136.
- Zapata-Peñasco, I. (1999). Evaluación de la toxicidad de ocho fluidos genéricos de perforación de pozos petroleros con nauplios de *Artemia franciscana* (ANOSTRACA:ARTEMIIDAE). Tesis de Licenciatura. E.N.C.B.- I.P.N. México, D.F.