



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

01177  
UNAM  
POSGRADO

---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN  
INGENIERÍA**

**Dinámica de las partículas suspendidas en la Zona  
Oriente de la Laguna de Términos.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)

**P R E S E N T A**

**Ing. Fernando Jesús De Lorenz Santos**

DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. GEORGINA FERNÁNDEZ VILLAGÓMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F ABRIL DEL 2004

INGENIERÍA  
AMBIENTAL



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



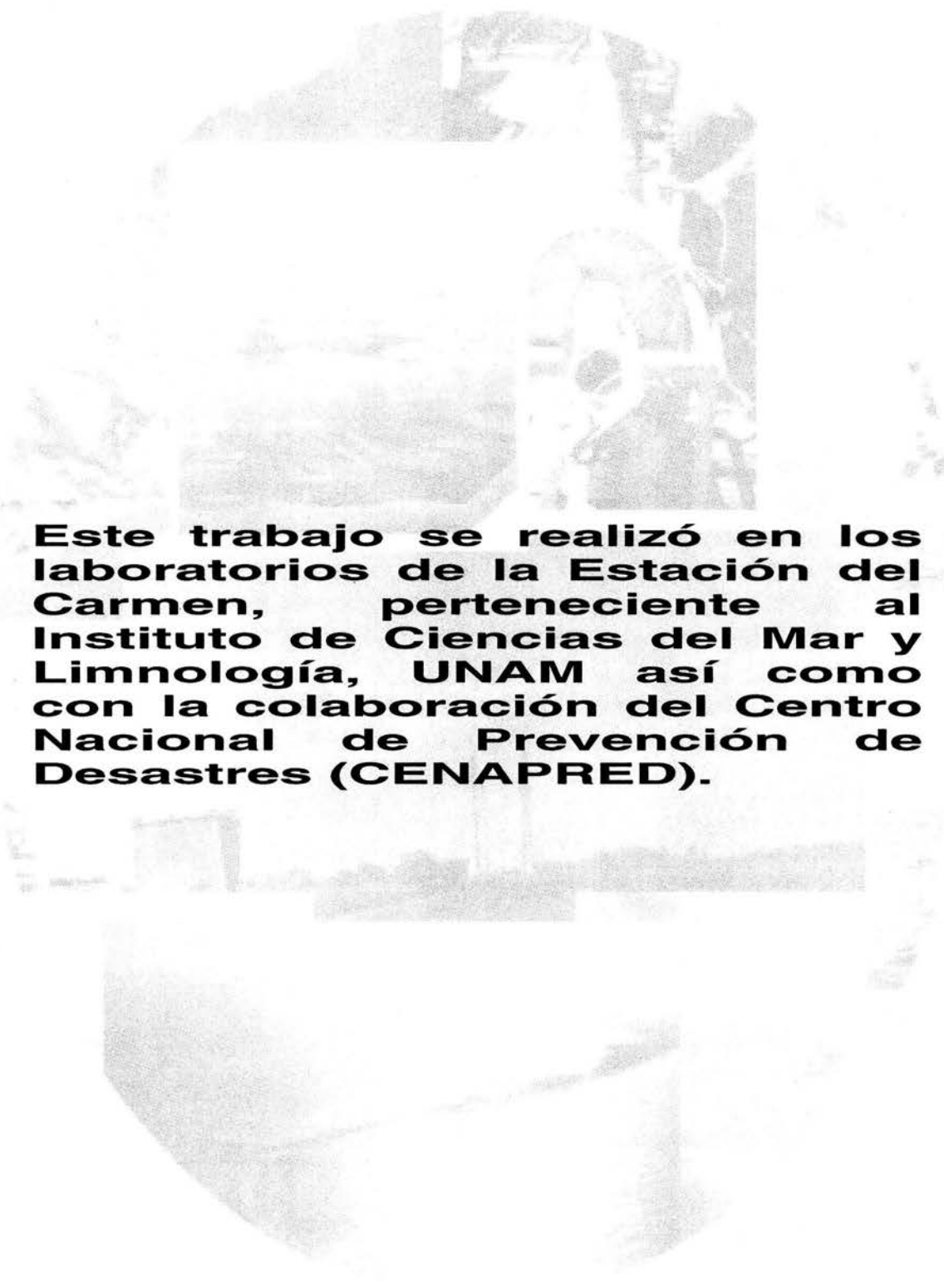
**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

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

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

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

ESTA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA



**Este trabajo se realizó en los laboratorios de la Estación del Carmen, perteneciente al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM así como con la colaboración del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).**



**Se agradece a la Unidad Municipal de Protección Civil de Cd. del Carmen por su apreciable atención y apoyo en el desarrollo de este trabajo.**

**También a la Universidad Autónoma del Carmen, (UNACAR) por brindar sus instalaciones e información de sus investigadores.**

**Y a la Dirección del Área Natural Protegida "Laguna de Términos".**

**Por último le agradezco la atención brindada al Dr. Salles y al M. en I. Espinal del Instituto de Ingeniería por su apoyo y aportación de información.**

Agradezco a mi abuelita por tener la paciencia y creer en mi.

A mis tíos Toño y Clara por ayudarme a concluir este proyecto en mi vida y estar en todo instante a mi lado.

A mis primos Erandi y Toño por compartir esta alegría, junto con Yazmín y Ulises.

A mi amigo Elías por estar apoyándome en esta etapa de mi vida

A la Familia Álvarez Pérez por darme el ejemplo de llegar a la cima de la vida.

Por último, doy muchas gracias a la Dra. Georgina Fernández Villagómez y al Dr. Felipe Vázquez Gutiérrez, por apoyarme hasta el final de la maestría y confiar en mi, Así como a los doctores Jorge De Vitorica Almeida, Armando Aguilar Márquez y al M. en C. Vicente Fuentes Gea por su aportación al presente.



---

---

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS  
LISTA DE FIGURAS  
LISTA DE FOTOGRAFÍAS

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivos Específicos	3
2.2 Limitaciones	3
2.3 Alcance	3
<b>3. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>4</b>
3.1 Medio Físico y Geográfico	4
3.2 Características del Área de Estudio	5
3.3 Batimetría	11
<b>4. MATERIALES Y MÉTODO</b>	<b>15</b>
4.1 Trabajo de campo	15
4.2 Mediciones en el sitio de estudio	16
4.3 Trabajo de laboratorio	16
<b>5. MODELOS HYDRO TRACK™</b>	<b>17</b>
5.1 Ecuaciones que utiliza el modelo Hydro Track™	17
5.2 Aplicación de las ecuaciones de continuidad y Navier-Stokes en el modelo Hydro Track	19
5.3 Datos requeridos para simular en el Modelo Hydro Track™	20
5.4 Condiciones de frontera	20
<b>6. RESULTADOS Y SU EVALUACIÓN</b>	<b>22</b>
6.1 Sólidos suspendidos totales	23
6.2 Coliformes Fecales	26
6.3 Resultados de la simulación	31
6.3.1 Condiciones de frontera para la propagación del oleaje	34
6.3.3 Corrientes generadas por oleaje	34



---

6.4 Transporte de las partículas suspendidas	40
6.5 Resultados del transporte de las partículas suspendidas	41
6.5.1 Condiciones de modelación de las partículas	44
6.6 Resultados de la modelación de coliformes fecales	46
<b>7. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN</b>	<b>47</b>
<b>8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>48</b>
8.1 Conclusiones	48
8.2 Recomendaciones	49
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>50</b>
<b>10. ANEXO A</b>	
<b>11. ANEXO B</b>	



## LISTA DE TABLAS

- 3.1 Descripción general del área de estudios
- 6.1 Resultados obtenidos en el laboratorio
- A.1 Resultados obtenidos en campo

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

- Fotografía 1 y 2 Manglares alrededor de la Laguna de Términos
- Fotografía 3 y 4 Algunas especies de manglares en la zona
- Fotografía 5 Manglar alrededor de la costa de la Laguna
- Fotografía 6 Lirio y pastos en el Sistema Palizada-del Este

## LISTA DE FIGURAS

- 3.1 Vías de comunicación a Cd. del Carmen
- 3.2 Laguna de Términos
- 3.3 Imagen LANDAT del área de estudio
- 3.4 Batimetría de la Laguna de Términos
- 3.5 Batimetría de la Laguna de Términos, realizada por Espinal (2002)
- 3.6 Malla calculada por Espinal para determinar la batimetría
  
- 4.1 Puntos de muestreo
  
- 6.1 Gráfica de los resultados obtenidos para SST
- 6.2 Gráfica que presenta los datos obtenidos en el laboratorio para coliformes fecales
- 6.3 Presencia del NMP de coliformes fecales en cada punto de muestreo en concentraciones variadas de salinidad
- 6.4 Corrientes generadas por oleaje  $H=1$  m, en la Boca del Carmen.
- 6.5 Corrientes generadas por oleaje  $H=1$  m, en la Boca de Puerto Real.
- 6.6 Corrientes generadas por oleaje  $H=3$  m, en ambas bocas.
- 6.7 Corrientes generadas por oleaje  $H=3$  m, en Boca del Carmen.
- 6.8 Corrientes generadas por oleaje  $H=3$  m, Boca Puerto Real.
- 6.9 Muestra de la magnitud y dirección del oleaje en todo el dominio de estudio para una altura de ola inicial de  $H=1$  m.
- 6.10 Muestra la magnitud y dirección del oleaje en todo el dominio de estudio para una altura inicial de  $H=3$  m.
- 6.11 Hidrodinámica durante el flujo de marea con vientos del sureste
- 6.12 Hidrodinámica durante el reflujos de marea con vientos del norte



LISTA DE TABLAS, FOTOGRAFÍAS Y FIGURAS

---

---

- 6.13 Puntos de control para el cálculo de transporte de sedimentos, hecho por Espinal y Salles (2002)
- 6.14 Comportamiento de las partículas (coliformes y SST) provenientes de la Boca de Puerto Real utilizando el software Hydro Track™
- 6.15 Avance de la pluma de partículas de Puerto Real con los vientos del norte
- 6.16 Salida de la pluma de Puerto Real por la Boca del Carmen, demostrando el flujo neto a través de la Laguna de Términos
- 6.17 Malla utilizada para obtener el comportamiento de las partículas suspendidas (SST, contaminantes, coliformes, etc.)
  
- A.1 Presentación de los valores obtenidos para pH en la Laguna de Términos, realizadas en surferd.
- A.2 Representación de los valores de temperatura realizados en surferd.
- A.3 Representación de la salinidad en la Laguna de Términos, realizada en surferd.
  
- 1B Mapa de distribución granulométrica de los sedimentos, según el triángulo de Shepard y Moore (1955). Tomado por Yáñez (1963).
- 2B Distribución del contenido de  $\text{CaCO}_3$  de los sedimentos en porcentaje.
- 3B Bocas de los ríos Palizada Vieja, Atasta y Chica.



---

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de encontrar alternativas de desarrollo económico para el país, ha determinado el avance acelerado de centros demográficos costeros sin planificar. Los cambios en las actividades productivas; el desarrollo urbano sin consideración de la carga natural del ambiente, los asentamientos humanos sin servicios urbanos adecuados y las obras de infraestructura que alteran el orden y funcionamiento ecológico, han dado como resultado severos daños ambientales.

Las zonas costeras y en particular el litoral mexicano, los estuarios y sistemas lagunares son entidades comunes. Estos sistemas se comunican con el mar a través de una o más bocas por las cuales circulan partículas como son los sedimentos, SST, y contaminantes (materia orgánica, y coliformes fecales), realizándose un intercambio y renovación del agua que alimenta a dichos sistemas.

Estos hechos hacen ver la urgencia de evaluar los efectos de las actividades humanas sobre los ambientes del Golfo de México, principalmente sobre aquellos considerados como críticos, con la finalidad de diseñar y poner en marcha estrategias para su protección, conservación y manejo prudente.

Un análisis actualizado de las condiciones ecológicas y de las tendencias del deterioro ambiental en esta región, permite predecir posibles impactos futuros y establecer alternativas de solución. Esto es importante en análisis ecológicos orientados a un mejor manejo costero, buscando la sostenibilidad del ecosistema y la explotación de sus recursos, para preservar los hábitat críticos y proteger la biodiversidad existente (A. Benítez, Zárate L., Rojas G. y Yáñez Arancibia, 1992)

Esta vulnerabilidad se encuentra en la Laguna de Términos, la cual es el más importante sistema fluvio-lagunar de Campeche de gran importancia ecológica y oceánica, ya que es el hábitat de un gran número de especies de importancia comercial (Yáñez-Arancibia y Day, 1982; Yáñez-Arancibia, 1982).

Se localiza en la porción sureste de la Bahía de Campeche. Está comunicada con el mar por dos bocas de cerca de 3 km de ancho y un máximo de 12 m de profundidad. Su forma se semeja a una elipse con su eje mayor de 70 km y uno menor de 25 km, con una profundidad máxima de 4.4 m cerca del centro (Mancilla y Vargas, 1980).

El aporte de agua dulce a la laguna, se hace principalmente a través de 4 ríos; el río Candelaria, el río Chumpán, el río Palizada y la boca de la Laguna de Atasta.



Los desechos de las zonas ganaderas, así como las corrientes de aguas negras de las poblaciones ribereñas, constituyen una fuente potencial de contaminación orgánica. Por ello este estudio se enfocará a la Zona Occidente de la Laguna de Términos, donde se encuentran los principales asentamientos humanos.

A pesar que en la Laguna de Términos se han realizados una inmensa cantidad de estudios e investigaciones, no se ha logrado reducir la contaminación del cuerpo, proponiendo alternativas de solución que permitan un impacto ambiental irreversible, consecuencia de la falta del tratamiento y control de las aguas residuales, así como de la falta de evaluación de las corrientes que alimentan al cuerpo de agua.

Por ello, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), junto con el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, realizan una evaluación de la Laguna, llevando a cabo una caracterización de los principales afluentes y descargas de aguas residuales (provenientes de los asentamientos humanos y ciudades), para determinar los Sólidos Suspendidos Totales y coliformes que están influyendo en la contaminación de la Zona Occidente de la Laguna de Términos.





---

---

## 2. OBJETIVOS

Estudiar la dinámica de las partículas suspendidas en la Zona Oriente de la Laguna de Términos, empleando un modelo matemático.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para lograr dicho objetivo, se plantea el siguiente objetivo específico.

- a) Identificar la zona más impactada en la Laguna de Términos, tomando en cuenta las corrientes superficiales que la alimentan, y las actividades antrópicas que inciden sobre la laguna.

### 2.2 LIMITACIONES

- I. Las partículas suspendidas que se considerarán serán los Sólidos suspendidos Totales y los Coliformes Fecales.
- II. Las mediciones se realizarán en épocas de lluvia y sequía.

### 2.3 ALCANCE

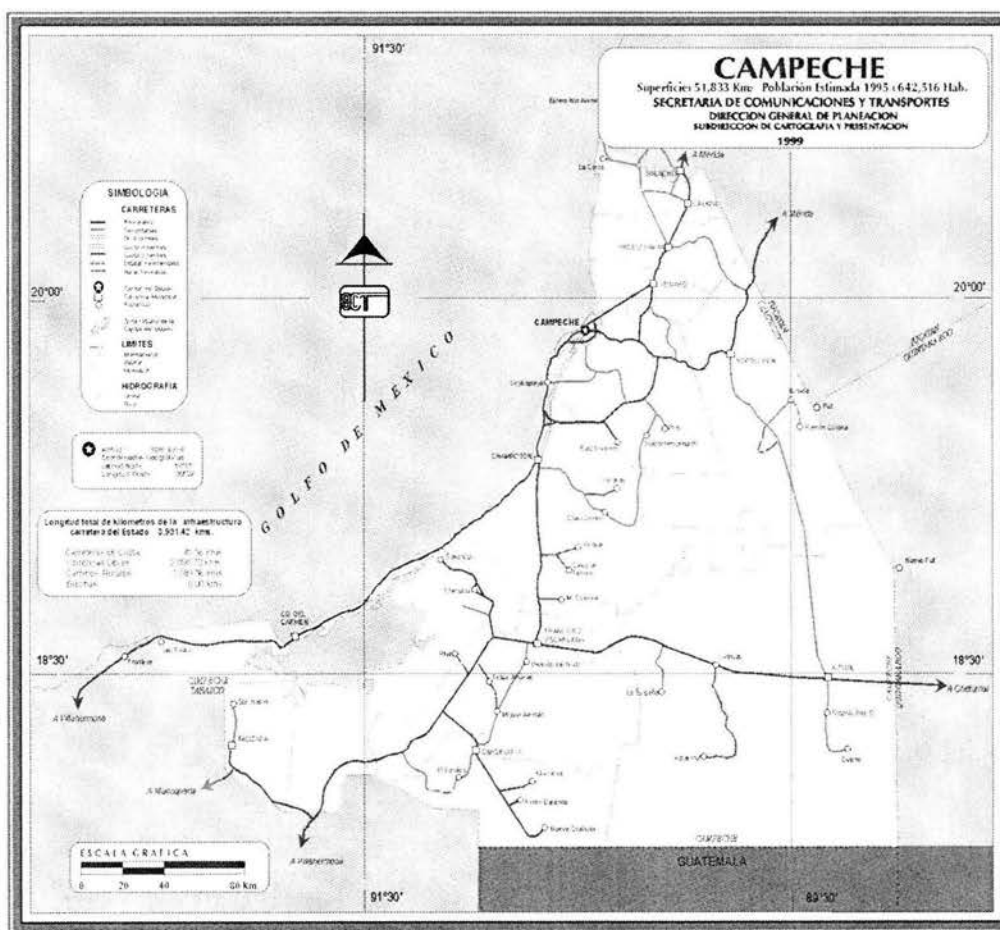
Se propondrán alternativas de solución para el control de la contaminación del cuerpo de agua, basadas en los resultados obtenidos por la modelación en el área seleccionada de la Laguna de Términos.



### 3. ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 MEDIO FÍSICO Y GEOGRÁFICO

La Isla está ubicada entre los paralelos 18° 38' – 18° 16' latitud N y en los meridianos 91° 30' – 91° 50' longitud W, ubicándose Cd. del Carmen en su extremo suroeste. (Figura 3.1).



Campeche, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 1999.

**Figura 3.1. Vías de comunicación a Cd. Del Carmen.**



### 3.2 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna de Términos se localiza en la porción sureste de la Bahía de Campeche. Su forma se asemeja a una elipse con su eje mayor de 70 km y uno menor de 30 km, con una profundidad máxima de 4.4 m cerca del centro (Mancilla y Vargas, 1980) (Figura 3.2). El área aproximada es de 2500 km<sup>2</sup> y está separada del Golfo de México por la Isla del Carmen.

Está comunicada hacia el mar por dos bocas de cerca de 3 km de ancho y un máximo de 12 m de profundidad las cuales son permanentes y se llaman El Carmen y Puerto Real (Amescua y Yañez-A, 1980 (Figura 3.3).

La región presenta un clima tropical con lluvia principalmente de mayo a octubre. La precipitación media anual es de 1,378 mm y la temperatura media anual es de 27°C. Los vientos reinantes soplan del sureste; en invierno, sin embargo, ocurre a menudo los “nortes” que son vientos fuertes de duración corta relativamente (1 a 2 días).

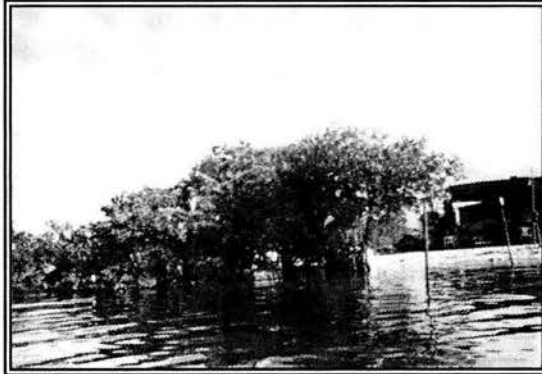
El aporte de agua dulce a la laguna, se hace principalmente a través de 4 ríos el río Candelaria, el río Chumpán, el río Palizada y la boca de la Laguna de Atasta.

El tipo de mareas es mixto diurno con una amplitud media de 0.4 m. La onda de marea penetra por ambas bocas produciéndose un encuentro de ambas ramas en el interior de la laguna (Grivel, 1969; Grivel y Arce, 1977).

Los desechos de las zonas ganaderas, así como las corrientes de aguas negras de las poblaciones ribereñas, constituyen una fuente potencial de contaminación orgánica.

Esta zona va desde el río Palizada, la boca de la Laguna de Atasta, el estero Pargo y la estación del Instituto de Ciencias del Mar en la Ciudad de Carmen. La vegetación que se encuentra en los márgenes del área de estudio es formada principalmente por mangle (*Rhizophora mangle*) y asociaciones de *Avicenia Germinans* y *Laguncularia Recemosa*, que aportan una gran cantidad de materia orgánica a la parte occidental de la laguna.

La vegetación es costera emergente en los márgenes de la laguna, están casi por completo cubiertos de manglares y los sistemas fluvio-lagunares, esteros, canales y pequeñas lagunas asociadas no son la excepción (Véase fotografías 1 y 2).



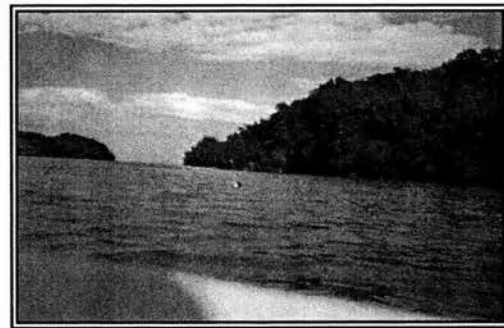
**Fotografía 1 y 2. Manglares alrededor de la Laguna de Términos.**

La importancia del mangle dentro de la Laguna ha sido reconocida desde los estudios de Zarur (1961), quien reconoce estas asociaciones como fijadoras del suelo que permiten una posterior implantación de flora terrestre.

Además se ha visto que en otros lugares de características similares es muy significativo que el aporte de materia orgánica al sistema, proviene de manglares; Helad (1960 y 1970), Helad *et al.* (1974), Odum y Helad (1972 y 1975), Odum *et al.* (1973), Snedaker y Lugo (1973).

Las especies más abundantes en los manglares es *Rizophora mangle*; sin embargo se encuentra asociada con *Avicenia germinais* y *Laguncuaria racemosa* (Véase fotografías 3 y 4).

Sobre la Isla del Carmen existen conjuntamente con manglares, grandes cocotales, junto con matorrales de *Acacia sp.* *Randia acubate* y *cocoloba uvifera* (Véase fotografías 5).



**Fotografía 3 y 4. Algunas especies de manglares en la zona.**

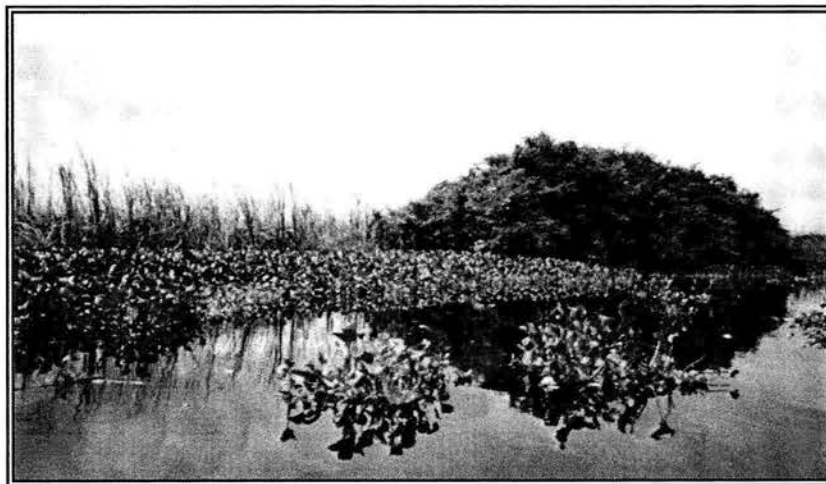


**Fotografía 5. Manglar alrededor de la costa de la Laguna.**

La vegetación sumergida está formada por grandes praderas de *Thalassia testudinum* y en las bocas de algunos sistemas fluvio-lagunares micro-algas de la familia *Phaeophyceae*, como *Gracilaria* sp (Francisco Vera, comunicación personal).

También se ha encontrado *Ruppia marítima* en el interior del Candelaria-Panlau. Así mismo existen grandes extensiones cubiertas de macroalgas del tipo *Phaeophyceae* como *Gracilaria* sp y otras en la comunicación de estos sistemas con la Laguna de Términos.

El lirio acuático *Eichhornia crassipes* se encuentra cubriendo grandes extensiones en la porción alta del sistema Palizada-del Este (Véase fotografía 6).



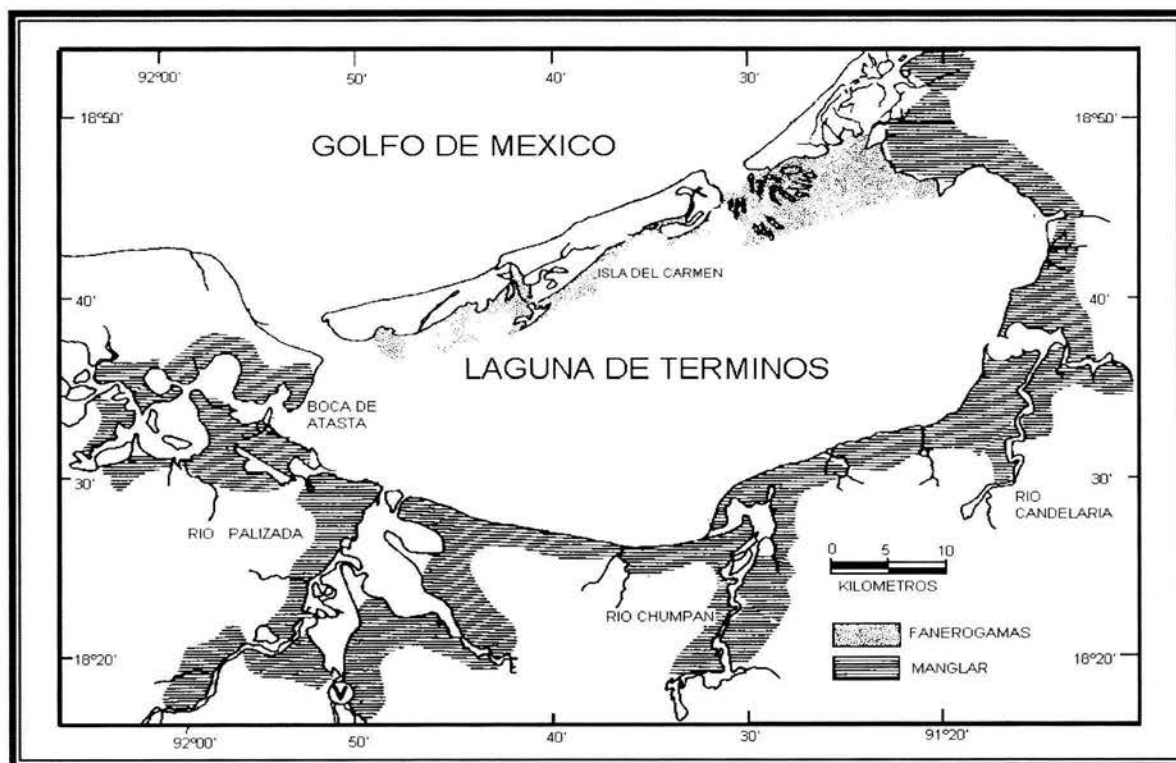
**Fotografía 6. Lirio y pastos en el Sistema Palizada-del Este.**



También existen abundantes pastos de pantanos del tipo “juncos” (*Typha sp*) y “carrizales”, lo mismo se puede observar en los demás sistemas pero en menor proporción.

La tabla 3.1, contiene información general del área de estudio, la cual se puede observar en las fotografías numeradas de la 1 a la 6.

La Figura 3.2 muestra un acercamiento el área de estudio y la imagen LANDAT (Figura 3.3) presenta un panorama general de la zona de estudio.



Mancilla y Vargas, 1980.

**Figura 3.2. Laguna de Términos.**





### 3. ÁREA DE ESTUDIO



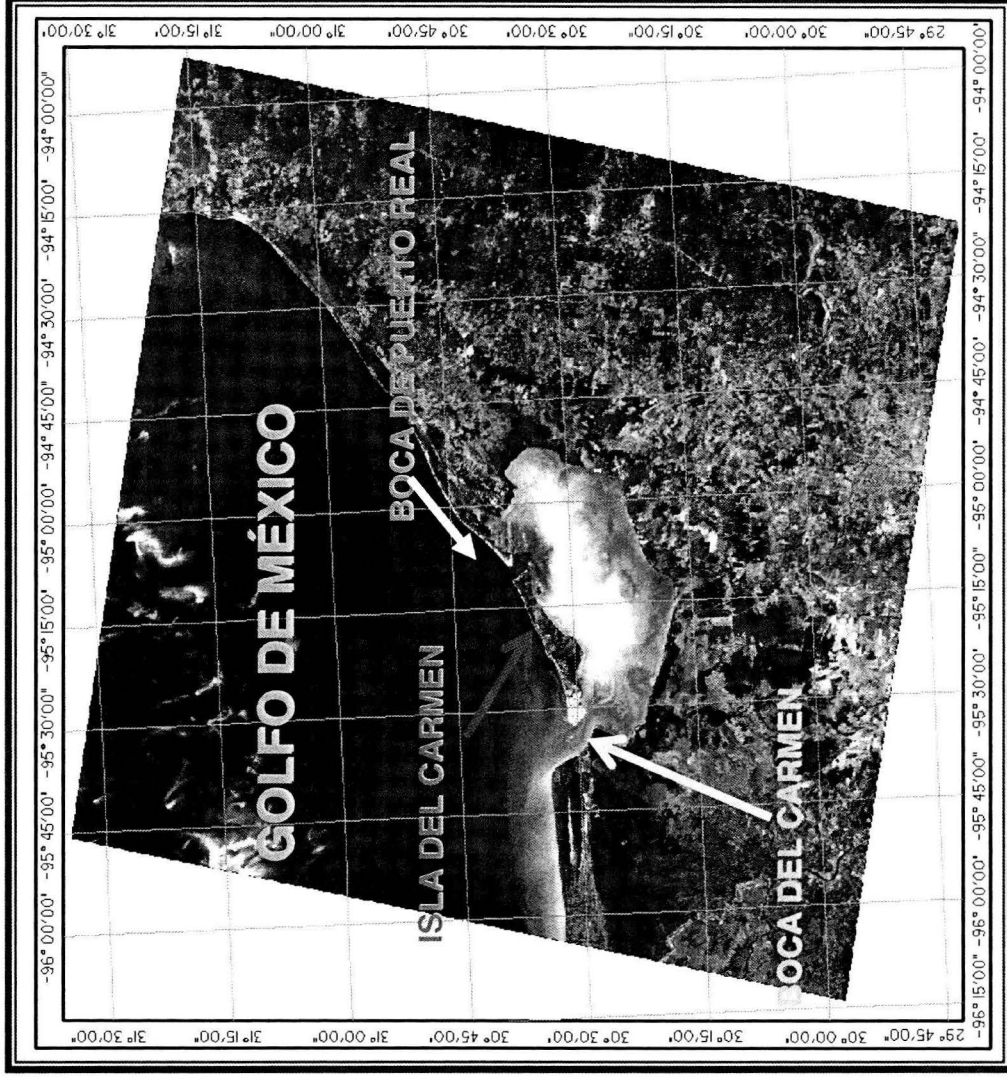
Tabla 3.1. Descripción general del área de estudio.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
Clasificación y uso de suelo	<p>Existen cinco clases de suelo y son: gleysol, sálico, vertisol pólico, rendzinas líticas, luvisoles gleycos y regosoles eútricos.</p> <p>REGOSOLES EÚTRICOS.- Son suelos marinos de alta concentración de sal sódica y se caracterizan por ser arenosos y salinos.</p> <p>GLEYSOL SÁLICO.- Se encuentran en la zona ístmica, formado por suelos de acumulación de materias orgánicas, es arcilloso y pesado, por lo que conserva su humedad.</p> <p>VERTISOL PÓLICO.- Al este del municipio en término medio de Norte a Sur, corre una franja de suelo vertisol pólico, conocido en maya como Akalchó. Es profundo y compuesto de arcilla y capa orgánica.</p> <p>RENDZINA LÍTICA.- Se encuentra en los límites del municipio, que colindan con Champotón y Guatemala. Son suelos jóvenes poco profundos.</p> <p>LUVISOL GLEYCO.- Al este del municipio se encuentra una pequeña franja de suelo luvisol gleyco</p> <p>Cuenta con los siguientes ríos:</p> <p>SABANCUY.- Se encuentra al extremo oriental junto con los arroyos Colax, Lagartero, Chivojá Chico y Chivojá Grande.</p> <p>CANDELARIA.- Que viene desde Guatemala, pasando por la población de Candelaria, formando río abajo, varias caídas de agua como son: Salto el Muerto, Salto Grande, Salto el Toro y otros más. Su cuenca principal se encuentra en la Península de Yucatán. Se calcula que su aporte con sus afluentes es de 21.5m<sup>3</sup>/s (S.R.H., 1976). Junto con el Río Mamantel forman la Laguna de Panlau que está comunicada a Términos por la Boca de los Pargos.</p> <p>CHUMPAN.- que nace en Tabasco, atravesando la población de Florida. Este río se forma en la planicie costera por los ríos Satispuedes y San Joaquín desembocando en la Laguna de Términos a través de la Boca de Balchacah. Su cauce tiene un área de 1874m<sup>2</sup> y un volumen de escurrimiento anual de 1368 millones de m<sup>3</sup>. El río y la laguna forman en Sistema Chumpan-Balchacah.</p> <p>PALIZADA.- Este río forma parte de la Red Hidrológica de los Ríos Mexcalapa, Grijalva y Usumacinta. Sus ramales junto con otros ríos menores dan origen a lagunas interiores; del Vapor, el Este y San Francisco que en conjunto constituyen el Sistema Palizada-del Este, y por el occidente el Sistema Pom-Atasta con varias lagunas menores anexas.</p>
Hidrografía	<p>Tiene dos climas, el cálido húmedo o trópico de la costa con una temperatura media anual de 26°C. En invierno la temperatura mínima es de 6°C y por último, entre abril y mayo la máxima temperatura es de 45°C. El Subhúmedo intermedio, que en la parte E del municipio tiene la variante más húmeda.</p> <p>Prácticamente el municipio es plano, ya que solo se encuentran pequeñas lomas aisladas de 10 a 50m de altura.</p>
Clima	<p>El municipio se caracteriza por rica flora consistente en tularares y manglares en su costa, y selvas bajas, medias y altas, saturadas de vegetación secundaria, pastizales y sabanas.</p> <p>La fauna consiste entre otras especies: venado, jabalí, mapache, nutria, jaguar, guacamaya, loro, lechuza, codorniz y chachalaca.</p>
Orografía	<p>Prácticamente el municipio es plano, ya que solo se encuentran pequeñas lomas aisladas de 10 a 50m de altura.</p>
Flora y Fauna	<p>El municipio se caracteriza por rica flora consistente en tularares y manglares en su costa, y selvas bajas, medias y altas, saturadas de vegetación secundaria, pastizales y sabanas.</p> <p>La fauna consiste entre otras especies: venado, jabalí, mapache, nutria, jaguar, guacamaya, loro, lechuza, codorniz y chachalaca.</p>

Anuario estadístico del estado de Campeche, INEGI, 1999.  
 Amezcu-Linarez y Yáñez-Arancibia, 1980.



### 3. ÁREA DE ESTUDIO



Vázquez Gutiérrez, 2002.

Figura 3.3. Imagen LANDAT del área de estudio.



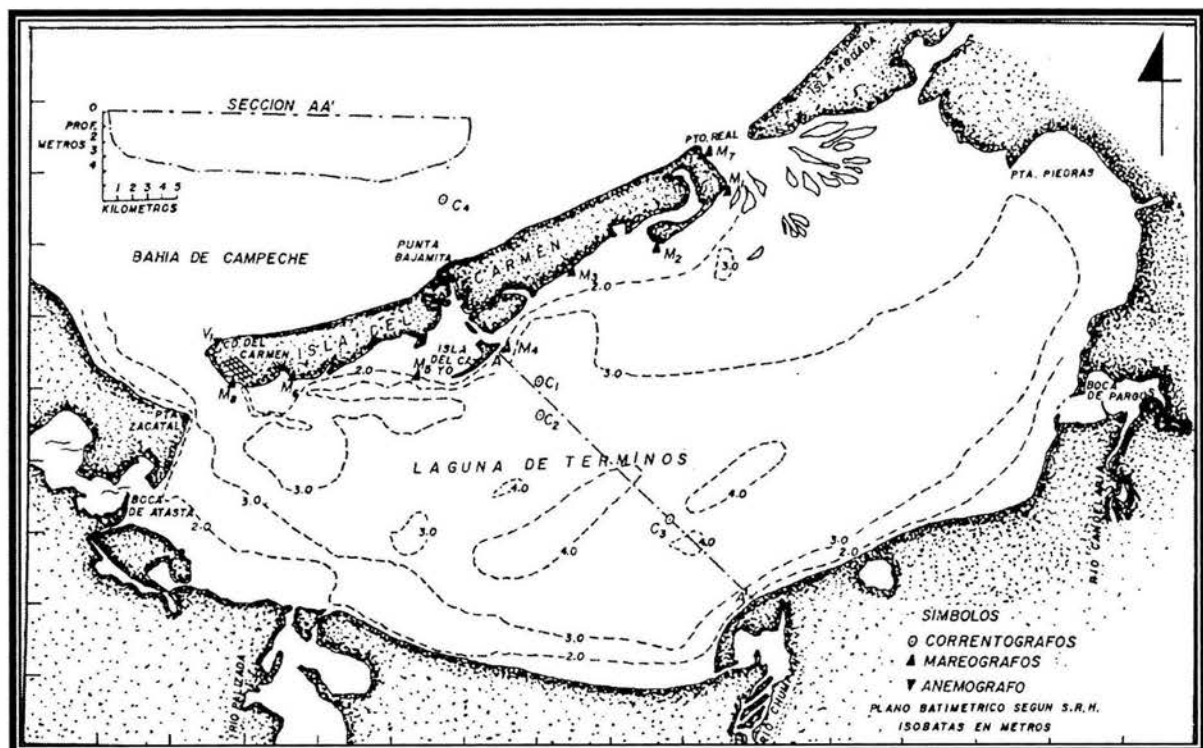


### 3.3 BATIMETRIA

La Laguna de Términos es un gran vaso de agua semi-cerrada y comunicado con el mar por dos bocas.

El aporte de agua dulce a la laguna se hace principalmente a través de 4 ríos de los cuales el río Candelaria, es el más importante. Con un escurrimiento medio anual de 15777 millones de  $m^3$ , este río desemboca en la porción este de la laguna. El río Chumpán desemboca en la parte sur y aporta un promedio anual de 1368 millones de  $m^3$ . También hay dos ramales del río Usumacinta, el río del este, que tiene acceso a la laguna a través de la Boca de Atasta y el río Palizada, que desemboca en las porciones oeste y suroeste de la laguna, respectivamente. De estos ríos no existen aforos.

El tipo de mareas es mixto diurno con una amplitud media de 0.4 m. La onda de marea penetra por ambas bocas produciéndose un encuentro de ambas ramas en el interior de la laguna (figura 3.4) (Grivel, 1969, Grivel y Arce, 1977).



Mancilla y Vargas, 1980.

Figura 3.4. Batimetría de la Laguna de Términos.



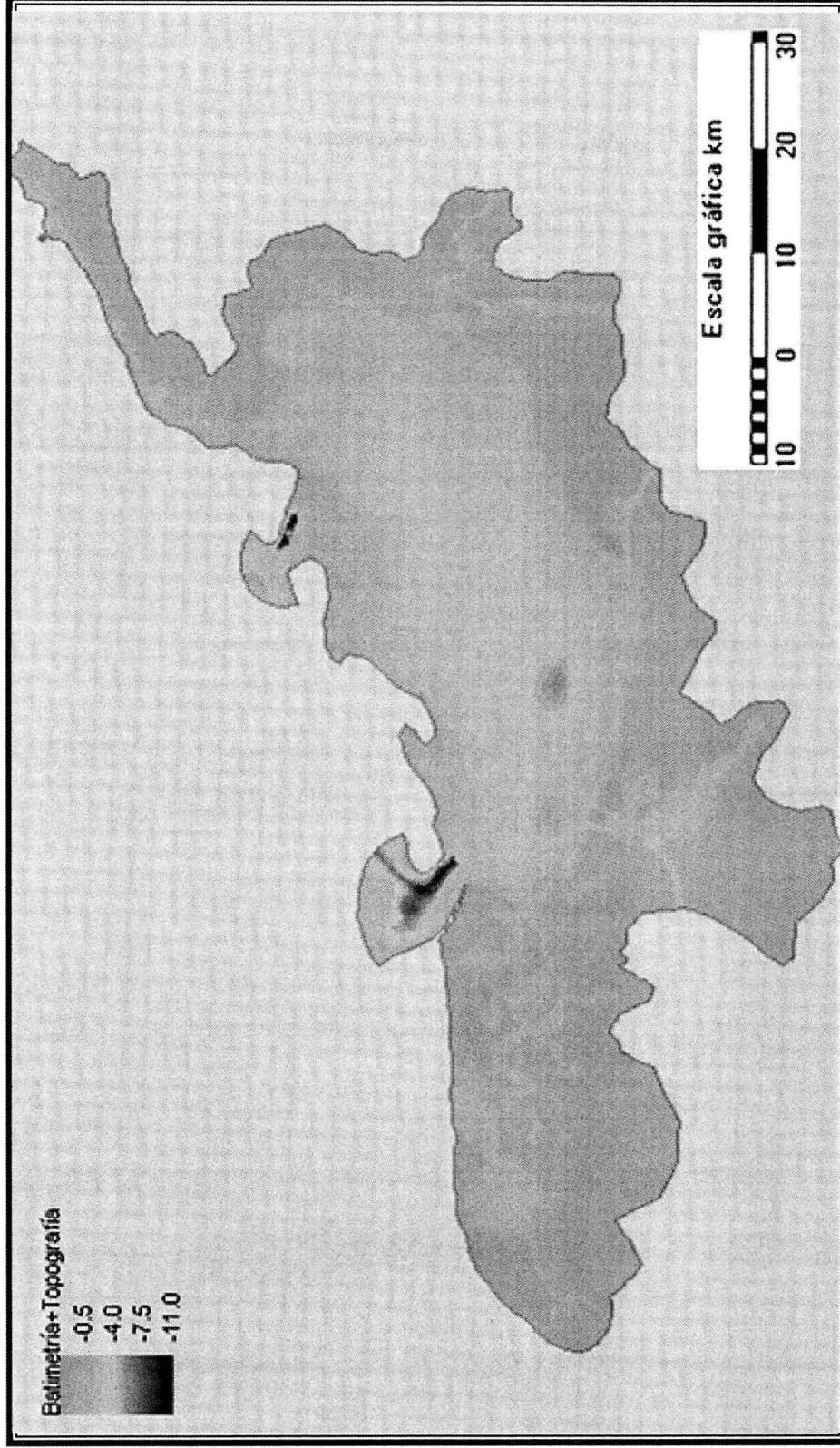
Con base en una visita al área de estudio se planteó la hipótesis de la existencia de un flujo neto de las agua marinas entrando por una boca y saliendo por la otra; lo que viene a ser un factor importante para entender el régimen Hidrológico de la laguna (Mancilla y Vargas, 1980), siendo por ello su evolución muy importante para el propósito del proyecto global.

Por otra parte, y en virtud de la existencia de las dos bocas, la onda de marea al avanzar hacia el interior de la laguna produce una configuración compleja de nodos y encuentros en su interior (remolinos). Por esta peculiaridad de la marea, es necesario escoger lugares dentro del área abierta de la laguna en donde la perturbación por la corriente de marea sea mínima, lo que debía suceder en el encuentro principal entre las dos ramas de la onda.

La batimetría utilizada para este trabajo, fue la que realizó Espinal (2001), donde se conformó una malla de cálculo capaz de describir de forma adecuada las principales características de la Laguna de Términos, lagunas satelitales y cuerpos de aguas adyacentes, así como los ríos y esteros más importantes que influyen en la hidrodinámica de todo el cuerpo de agua. En la figura 3.5 se presenta la batimetría final realizada por Espinal (2001) y en la figura 3.6 se observa la malla calculada.



3. ÁREA DE ESTUDIO



Espinal, 2002.

Figura 3.5. Batimetría de la Laguna de Términos. Realizada por Espinal (2002).



3. ÁREA DE ESTUDIO

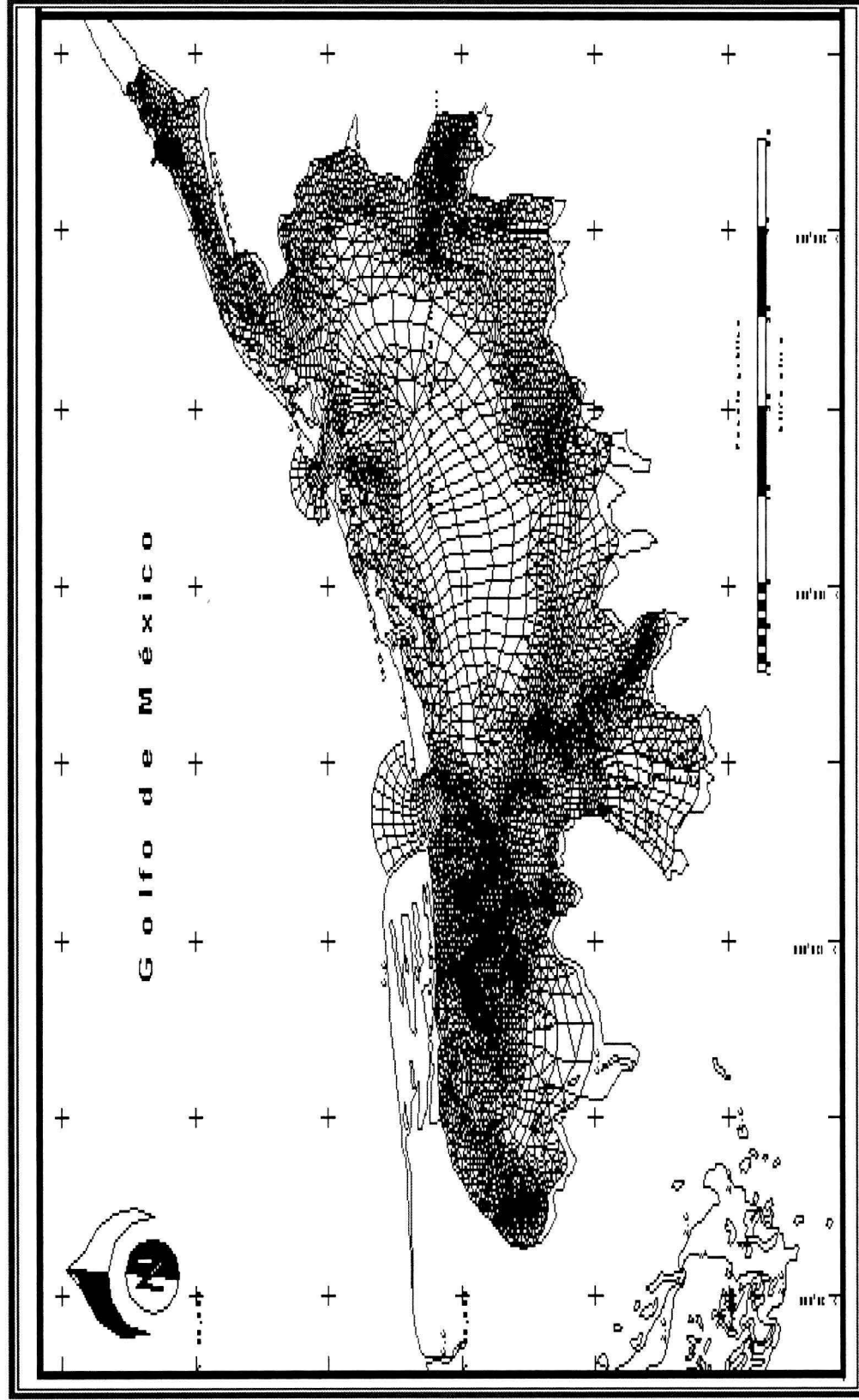


Figura 3.6. Malla calculada por Espinal para determinar la batimetría.



## 4. MATERIALES Y MÉTODO

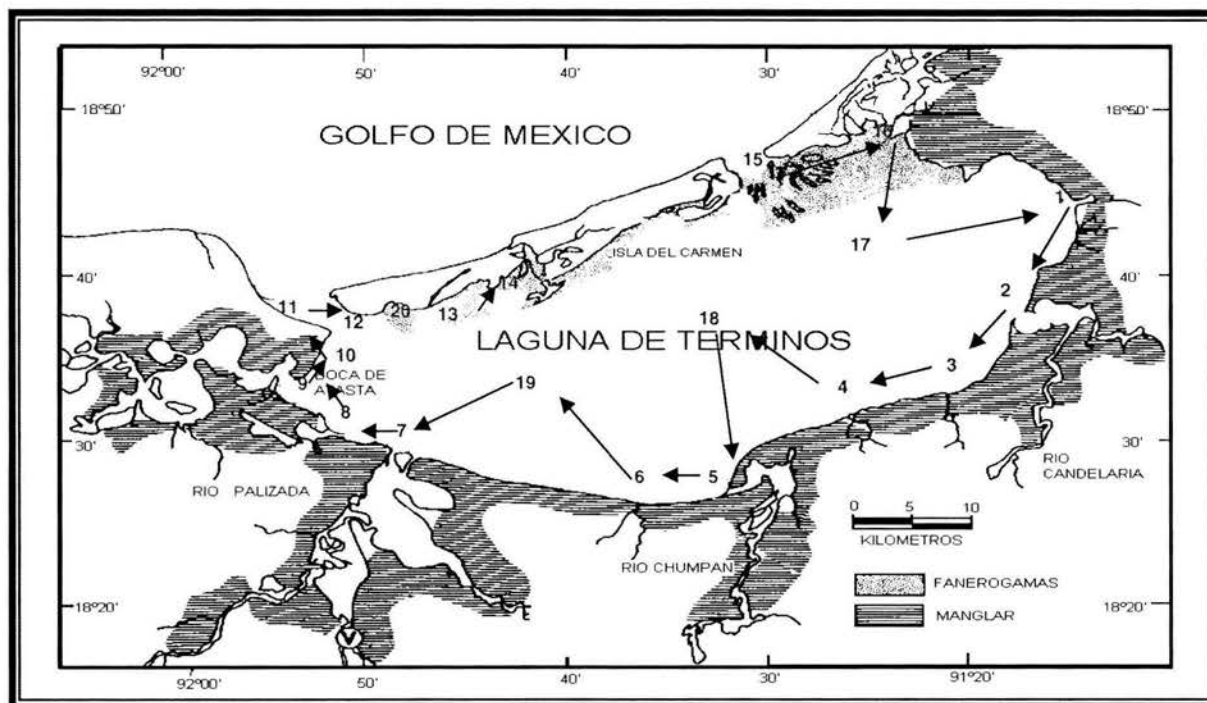
### 4.1 TRABAJO DE CAMPO

#### 4.1.1 MUESTREO

El muestreo se realizó tomando como base la **NMX-AA-003-1980**, la cual propone la técnica que debe aplicarse para llevar a cabo el muestreo en cuerpos de agua así como descarga de aguas residuales.

El muestreo se llevó a cabo siguiendo el recorrido que muestran las flechas de color rojo, como se observa en la figura 4.1. Por ser un Estuario, cabe mencionar que las muestras fueron superficiales de tipo simple, tomadas en períodos cortos para obtener el volumen de 1 L.

Basándose en una visita previa a la Laguna de Términos, Camp., se propusieron puntos de muestreo distribuidos en los alrededores del Río Candelaria, Río Palizada y la descarga de la Laguna Pom Atasta. (Boca del Carmen). Finalmente fueron 17 puntos de muestreo ubicados en el perímetro de la Laguna, incluidas las bocas que la alimentan así como 3 puntos en el centro del cuerpo (Ver Figura 4.1).



De Lorenz, 2002.

Figura 4.1. Puntos de muestreo.



---

## 4.2 MEDICIONES EN EL SITIO DE ESTUDIO

También se realizaron mediciones en el sitio de estudio. Los parámetros que se determinaron fueron pH, temperatura, salinidad, conductividad y sólidos disueltos.

Para realizar la determinación de dichos parámetros, se utilizaron las técnicas que recomienda la **NOM-001-ECOL-1996** así como las que se encuentran en **APHA (2001)**.

## 4.3 TRABAJO DE LABORATORIO

### 4.3.1 SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

La determinación de los Sólidos Suspendidos Totales se realizó aplicando la técnica que recomienda la **NOM-001-ECOL-96**, la cual se encuentra en la norma mexicana **NMX-AA-034-1981**.

### 4.3.2 COLIFORMES FECALES

Los coliformes fecales se determinaron utilizando el equipo de campo llamado COLI-COUNT, que por su precisión y exactitud produce resultados confiables.





## 5. MODELO HYDRO TRACK™

Para modelar la hidrodinámica de la Laguna de Términos bajo diferentes condiciones ambientales, así como las plumas de dispersión de los sólidos suspendidos totales y los coliformes fecales, aportados por los escurrimientos superficiales y descargas de aguas residuales, se empleará el software denominado Hydro Track™, elaborado por García-Martínez y Rodríguez-Molina (1997).

El modelo Hydro Track™ es un software que permite determinar la distribución de los sólidos suspendidos y algunos contaminantes en cuerpos de aguas costeros, como son los estuarios.

Este modelo ya a sido aplicado para determinar el comportamiento de las partículas suspendidas en otros cuerpos costeros, como es el caso de la Laguna de Mecoaacán, que es un estuario ubicado en el sureste de México (Tabasco), con condiciones muy similares a la Laguna de Términos (Vázquez, PEMEX-UNAM, 2001).

Este software consta de dos modelos; el primero es un modelo bidimensional barotrópico de corrientes hidráulicas, que emplea el método de solución de diferencias finitas, el cual resuelve las ecuaciones de conservación de masa y de momentum conocidas también respectivamente como ecuaciones de continuidad y de Navier–Stokes. El modelo calcula la magnitud y dirección de las corrientes hidráulicas, cuyos campos vectoriales de velocidad son mostrados en representación Euleriana.

El segundo es un modelo de transporte de contaminantes que, partiendo de los campos de velocidades generados por el modelo hidrodinámico, calcula y describe las trayectorias de sustancias conservativas (no reactivas) disueltas y suspendidas. El modelo permite además dibujar el dominio o área de integración y definir sobre ésta la batimetría, tipos de fronteras y condiciones de las mismas.

### 5.1 ECUACIONES QUE UTILIZA EL MODELO HYDRO TRACK™

Las ecuaciones hidrodinámicas que gobiernan el modelo son las resultantes de la integración vertical de las ecuaciones de continuidad y Navier–Stokes (Mantilla y Salle, 2002). Se consideró aquí el efecto del viento sobre la superficie del agua, el efecto de la fuerza de coriolis debido a la rotación de la tierra, los aportes de agua a través de canales naturales y el efecto de la onda de marea, así como el desfase y amortiguamiento que esta onda sufre debido a la fricción de fondo.

Lo anterior se puede desarrollar de diferentes formas, las cuales son: realizar una medición sistemática de la velocidad de la corriente en diferentes puntos del cuerpo; la



segunda es mediante la aplicación de un modelo matemático, que simule a escala el movimiento de las partículas en un flujo de un embalse y la tercera, resolviendo las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento del flujo y las partículas que viajan en el cuerpo de agua (Sánchez B. y Fuentes M., 1992; De Vitorica, 1983).

Para el caso de éste estudio, se utiliza el paquete Hydro Track<sup>TM</sup> en el que se resuelve las ecuaciones de Navier–Stokes y de Continuidad, definidas respectivamente como:

$$\rho \frac{du}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 5.1$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 5.2$$

$$\rho \frac{dw}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad 5.3$$

y

$$\iint \rho (v \cdot n) dA + \iiint \rho dV = 0 \quad 5.4$$

Donde

$\rho$  = densidad del flujo

$V$  = velocidad

$\mu$  = viscosidad

$g$  = gravedad de la Tierra

De acuerdo con Kjerfve (1988), para el modelo Hydro Track<sup>TM</sup> las ecuaciones hidrodinámicas para las componentes  $x$  y  $y$  de la velocidad son las siguientes:

$$\frac{\partial uz}{\partial t} + \frac{\partial u^2 z}{\partial x} + \frac{\partial uvz}{\partial y} - fvz + gz \frac{\partial \eta}{\partial y} = \xi_x - ku (u^2 + v^2)^{1/2} \quad 5.5$$

y

$$\frac{\partial vz}{\partial t} + \frac{\partial vuz}{\partial x} + \frac{\partial v^2 z}{\partial y} + fuz + gz \frac{\partial \eta}{\partial y} = \xi_y - kv (u^2 + v^2)^{1/2} \quad 5.6$$

donde  $u$  y  $v$  representan el campo de velocidades en “ $x$ ” y “ $y$ ”.





Para simular el comportamiento de las partículas suspendidas es necesario definir las condiciones iniciales y de frontera, así como los parámetros del cuerpo de agua tomando los límites de integración desde el fondo ( $z = -h$ ) hasta la superficie libre ( $z = h + \eta$ ). Estos parámetros se presentan a continuación:

$z (h, \eta)$ :	Espesor instantáneo de la columna de agua dado por $z = h + \eta$
$h$ :	Profundidad referida al nivel medio del mar.
$\eta$ :	Elevación de la marea referida al nivel medio del mar.
$f(\alpha, \Omega)$ :	Parámetro de coriolis dado por $f = 2\Omega \text{sen}\alpha$ , donde $\alpha$ es la latitud y $\Omega$ es la velocidad angular de la rotación terrestre ( $7.29 \times 10^{-5} \text{ rad/s}^2$ ).
$g$ :	Constante de aceleración gravitacional terrestre ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ).
$k$ :	Coefficiente de fricción adimensional agua-fondo ( $2.5 \times 10^{-3}$ ).
$\xi$ :	Esfuerzo del viento sobre la superficie del agua, con un coeficiente de fricción adimensional entre estos dos fluidos de $3.6 \times 10^{-3}$ .

Considerando ahora que la Laguna de Términos es somera y que su batimetría es relativamente uniforme, es válido suponer que la velocidad del agua en ésta no se ve afectada por la presión hidráulica (fluido incompresible).

## 5.2 APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CONTINUIDAD Y NAVIER-STOKES EN EL MODELO HYDRO TRACK™.

Aplicando las ecuaciones 5.5 y 5.6 a las condiciones de la Laguna de Términos y las condiciones iniciales y de frontera, además de considerar que la densidad del agua se mantiene uniforme en la vertical, se está suponiendo también que no existen cambios importantes de salinidad respecto a la profundidad. Ahora, para incluir en la modelación la dispersión de un constituyente conservativo ( $c$ ), se requiere incluir la concentración de este constituyente en la ecuación de continuidad (ecuación 5.4), la cual queda expresada como sigue:

$$\frac{\partial cz}{\partial t} + \frac{\partial uzc}{\partial x} + \frac{\partial vzc}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (zk_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (zk_y \frac{\partial c}{\partial y}) + F\eta(x, y, \eta) - F_{-h}(x, y, -h) \quad 5.7$$

En donde  $F$  es el flujo total del constituyente delimitado por la interfase aire-agua ( $F_\eta$ ) y la interfase agua-fondo ( $F_{-h}$ ). En este caso se está asumiendo, que el sedimento suspendido se comporta como una sustancia conservativa, o sea no reactiva, por lo que el cambio en su concentración se debe solamente a su dilución; y que los coeficientes  $k_x$  y  $k_y$  son función cuadrática de la velocidad hidráulica, los cuales dependen también de las propiedades de las partículas suspendidas.



Los términos que se encuentran hacia la izquierda del signo de igualdad representan la ecuación de continuidad, que calcula la dirección de las partículas; los términos intermedios sirven para el cálculo de la dispersión de partículas y los dos últimos términos son los flujos totales en superficie y fondo del cuerpo de agua, para obtener el transporte de las partículas suspendidas en la superficie y el fondo del cuerpo de agua.

### 5.3 DATOS REQUERIDOS PARA SIMULAR EN EL MODELO HYDRO TRACK™

Este modelo requiere la siguiente información:

- ◆ Batimetría.
- ◆ Tiempo de simulación hidrodinámico ( $\Delta T$ ).
- ◆ Tiempo y límites de altura de las olas.
- ◆ Velocidad del viento a 10 m de altura.
- ◆ Coeficiente de rugosidad o resistencia en el fondo del estuario.
- ◆ Coeficientes de Manning en el fondo del cuerpo.
- ◆ Latitud de la región geográfica en estudio.

Para la parte del modelo de transporte de contaminantes, se requiere:

- ◆ Concentración total del contaminante.
- ◆ Densidad del contaminante y del agua
- ◆ Duración de la descarga
- ◆ Coordenadas de la descarga (x, y, z).
- ◆ Coeficientes de difusión.
- ◆ Velocidad de la corriente del agua.

Esta información se introduce en el software siguiendo el procedimiento para completar una nueva sesión de modelación, la cual calcula el campo de velocidad del área de estudio (García-Martínez y Rodríguez-Molina, 1997).

### 5.4 CONDICIONES DE FRONTERA

Dos tipos de condición de frontera fueron aplicadas para el modelo: 1) condición de frontera abierta, aplicadas en las bocas oceánicas, donde se prescribió la serie de tiempo de la marea, y 2) condición de frontera de flujo paralelo (o cerrado) para los nodos que definen los límites de la malla de cómputo. La condición de frontera para los nodos en los bordes y límites de la malla de cálculo prescribe cero velocidades perpendiculares a la frontera y a una condición de deslizamiento en la dirección paralela a la frontera.



La condición de frontera aplicada a los bordes abiertos de la malla consiste de los niveles de variación del agua y el correspondiente forzado de marea que conduce el flujo y reflujo de la Laguna. El forzado de marea aplicado para determinar el tiempo de estabilización correspondió a una marea monocromática (armónico simple) con período de  $S_2$  (Componente solar semi-diurno), y amplitud correspondiente a la suma de las componentes diurnas principales en la zona ( $K_1$  componente diurno luni-solar de declinación;  $O_1$  componente diurno luni-solar de declinación;  $P_1$ ), para poder comparar los resultados del modelo para ciclos consecutivos de marea. Para las simulaciones, se utilizaron mareas reales, vivas y muertas. Por otro lado, en las fronteras del modelo correspondientes a las secciones transversales de los ríos principales (Palizada, Chumpán, Candelaria y Mamantel), se prescribieron gastos de estiaje y avenidas.

Dado que las condiciones iniciales en el sistema no están disponibles, el inicio de las simulaciones se realiza con asignaciones arbitrarias de a) un nivel artificialmente alto de la superficie libre del agua, uniforme en toda la malla, para garantizar que todos los elementos inician “mojados” y que los efectos combinados del esquema de porosidad de manglar no son importantes, y b) de cero velocidad en todo el sistema.

Los tiempos cortos suelen no son prácticos en escenarios donde hay largos periodos de simulación, y pasos de tiempo demasiado largos pueden acarrear errores de redondeo y estabilización importantes. De acuerdo con Espinal (2002) las soluciones implícitas permiten pasos de tiempo de 10 a 30 minutos mayores que las soluciones explícitas. En este estudio, y siguiendo las recomendaciones de Salles (2000), los tiempos fueron seleccionados de 30 minutos, tanto para las simulaciones con marea real, como para las simulaciones con marea monocromática.

El modelo debe correr lo suficiente para estabilizarse y para que la solución sea independiente de las condiciones iniciales, i.e., hasta que los efectos transitorios sean despreciables.

El tiempo de estabilización se define como el tiempo requerido por el modelo para que la solución (velocidad y elevación de la superficie libre del agua) se repita entre dos ciclos de marea idénticos.



## 6. RESULTADOS Y SU EVALUACIÓN.

Los resultados que se obtuvieron en el laboratorio, para determinar los sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes se presentan en la tabla 7.1.

Tabla 6.1. Resultados obtenidos en el laboratorio.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO DE MUESTREO	SST (mg/L)	COLIFORMES FECALES (NMP)
A un costado de la Boca de Puerto Real	P1	19.2840	≤0.2
Boca del río Candelaria	P2	43.9760	≤0.2
Riachuelo seco, a un lado del río Candelaria	P3	35.6840	≤0.2
Riachuelo seco entre el río Candelaria y el Chumpan	P4	23.5760	8
Boca del río Chumpán	P5	98.3200	18
Corriente seca entre el río Chumpan y Palizada	P6	45.5840	16
Boca del río Palizada	P7	31.2080	38
Boca de brazo del río Palizada	P8	32.7080	30
Boca del sistema lagunar Pom-Atasta	P9	49.8760	60
Puente que comunica Frontera con Cd. Del Carmen	P10	50.8000	64
Parte exterior de la Boca del Carmen	P11	46.1880	83
Mercado	P12	34.9280	95
Salida del canal de la Estación del Carmen, UNAM	P13	39.5960	163
Canal entre Boca del Carmen y Puerto Real	P14	45.8560	254
Parte exterior de la Boca de Puerto Real	P15	28.0440	10
Asentamientos humanos en la Boca de Puerto Real	P16	28.5720	17
Centro de la Laguna, entre la Boca de Puerto Real y río Candelaria	P17	28.7660	≤0.2
Centro de la Laguna entre la Isla del Carmen y el río Chumpan	P18	26.7440	≤0.2
Centro de la Laguna entre el canal de salida de la estación del carmen (UNAM) y río Palizada	P19	23.1680	20
Descarga de las agua residuales del Rastro	P20	31.1680	362



El comportamiento de los datos que contiene en la tabla 6.1, se presentan en las figuras 6.1 y 6.2.

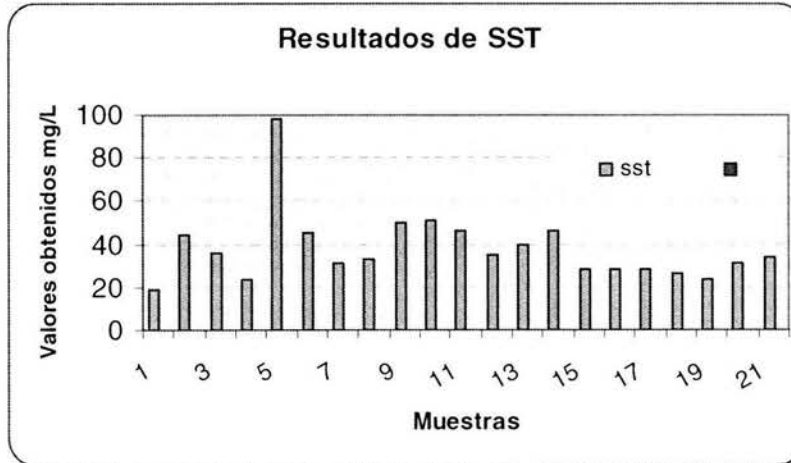


Figura 6.1. Gráfica de los resultados obtenidos para SST.

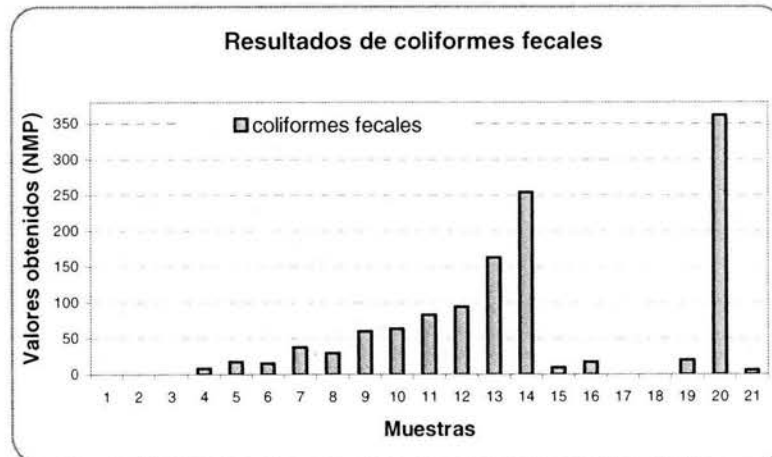


Figura 6.2. Gráfica que presenta los datos obtenidos en el laboratorio para coliformes fecales.

### 6.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

El contenido orgánico y restos de plantas son muy importantes y significativos en los sedimentos depositados en el cuerpo de agua, los cuales se encuentran en la desembocadura de los ríos a la Laguna de Términos (Yáñez, 1963).





Litológicamente, se pueden caracterizar por su abundancia de material fino ( $<62\mu$ ), formado por partículas arcillosas acarreadas en suspensión de las aguas de los ríos y precipitados por el efecto coagulante de las sales disueltas en el agua de mar. La parte gruesa ( $>62\mu$ ) menos abundante de estos sedimentos, está formada casi exclusivamente por fragmentos de ostras y granos de material terrígeno, compuestos principalmente por minerales de cuarzo, feldspatos y ferro magnesianos.

Al ver la tendencia de los resultados obtenidos en el laboratorio, que corresponden a la determinación de SST, se puede observar que en los puntos a un costado de la Boca de Puerto Real (P1), parte exterior de la Boca de Puerto Real (P15), asentamientos humanos en la Boca de Puerto Real (P16) y Centro de la laguna, entre la Boca de Puerto Real y desembocadura del río Candelaria (P17), la concentración de los sólidos suspendidos totales aumenta (va de 19.28 a 28.74 mg/L), lo cual puede ser por la influencia de la boca de Puerto Real, la que alimenta a la Laguna con agua del Golfo. Cabe mencionar que en la Boca de Puerto Real se ve la propagación de la marea del Noreste al Suroeste, que permite a la marea un retraso de manera aún más importante al propagarse dentro de la Laguna. Sin embargo, también puede existir una posible influencia de la descarga del Río Candelaria con respecto al asolvamiento de la zona oeste del mismo cuerpo, que es un fenómeno facilitado por el movimiento de las mareas, y por los biostromas (colonias de ostras) forman diques irregulares en las desembocaduras de los ríos, permitiendo que los estuarios actúen como verdaderos vasos de decantación, similar a lo encontrado por Yáñez (1963).

El gran impacto de los sedimentos que arrastra el Río Candelaria no afecta el asolvamiento a la Laguna, debido a las lagunas deltáicas del mismo río, las cuales funcionan como frenos del mismo flujo. Aunque se presentan concentraciones de los SST en la Boca del río Candelaria (P2), que es de 43.97 mg/L, casi el doble que los puntos de muestreo ubicados en la zona oeste de la Laguna de Términos, lo cual se debe a la fuerte influencia de la corriente proveniente de la Boca de Puerto Real, pudiendo corroborar esta influencia en la descarga de un riachuelo entre el río Candelaria y Chumpan (P3), donde se obtuvo una concentración de 35.68 mg/L.

Pero también se observa un decremento en las concentraciones de los SST, hacia la parte central de la laguna (P18 y P19) con valores de 26.77 y 23.16 mg/L respectivamente, así como en el riachuelo que se encuentra entre el río Candelaria y Chumpan (P4), donde la concentración es de 23.57 mg/L. Esto se puede justificar, por la auto-limpieza natural de la Laguna que las corrientes que entran por la Boca de Puerto Real, ocasionan. El gran asolvamiento y los



biostromas de ostras que se encuentran en las descargas de los ríos dentro de la Laguna, producen direcciones alternas en las corrientes, provocando una fuerza mayor en el centro del cuerpo.

En el área donde desemboca el Río Chumpán, las concentraciones aumentaron considerablemente, teniendo valores de 95.32 mg/L en la boca de dicha descarga (P5), lo cual puede ser resultado del gran cauce que corre por ese río en épocas de avenidas, aunque se puede observar un equilibrio para la estabilidad morfológica general del sistema, ya que el material fino que entra a la Laguna de Términos por los cauces de los ríos, es expulsado hacia el mar por la Boca del Carmen.

Por otra parte entre el río Champán y Palizada (P6) hay una concentración de 45.58 mg/L, lo cual confirma que la depositación de sólidos o partículas conforme se avanza hacia la zona occidente es más crítica, lo cual describe generalmente, la dirección de las corrientes internas de la Laguna y su auto limpieza natural.

Esto se puede corroborar con las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$ , ya que en las zonas donde están dichas descargas (Río Candelaria, Chumpan y Palizada), se observa un porcentaje del 20 a 30%, pero que aumenta considerablemente hacia la Isla del Carmen, como lo observa Yañez (1963) en su trabajo. Esto puede ser por el arrastre de sedimentos carbonatados, procedentes de los Ríos Candelaria y Chumpan, que atraviesan la península de Yucatán, la cual está compuesta en su mayoría por carbonatos.

Los puntos que se encuentran ubicados en la Zona Occidente de la Laguna de Términos, tienen concentraciones que aumentaron considerablemente. Estos puntos son la boca del río Palizada (P7), brazo del río Palizada (P8) y boca del Sistema lagunar Pom-Atasta (P9), los cuales presentan concentraciones de 31.20, 32.70 y 49.87 mg/L respectivamente.

La concentración en la boca del sistema lagunar Pom-atasta (P9) es muy alta, ya que descarga sedimentos al cuerpo impactando la Boca del Carmen, aunque se puede decir, que las mismas corrientes internas de la Laguna limpian la Boca, evitando que la profundidad disminuya. Este fenómeno, no se observa a la orilla de la Isla, pero si en los ríos que descargan en la Laguna los cuales tienen problemas de profundidad, principalmente en la Zona Occidente.

Esto también se puede observar alrededor de la isla, donde no se pudo hacer el muestreo por problemas de asolvamiento.

En cuanto a las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  se observa este fenómeno como lo detecta Yáñez (1963), ya que alrededor se depositan la mayor cantidad de



sedimento, obteniéndose lecturas mayores de carbonatos, las cuales se encuentran entre el 60 y 70% de dichas sales.

La misma tendencia siguen los sitios bajo puente que comunica al poblado de Frontera con la Isla del Carmen (P10), parte exterior de la Boca del Carmen (P11), ubicación del Mercado de Cd. del Carmen (P12), salida del canal de la estación El Carmen, UNAM (P13), Canal entre las Bocas Del carmen y Puerto Real (P14) y Descarga de aguas residuales del rastro (P20), los cuales se encuentran ubicados en la Boca del Carmen, así como a la orilla de la Isla donde está situada la ciudad. Las concentraciones de SST están entre 34.39 y 50.80 mg/L, lo cual puede ser resultado de la descarga del Sistema Lagunar Pom-Atasta así como de los arrastres que lleva la corriente interna de la Laguna de Términos. No hay que descartar las descargas de aguas residuales que se encuentran en esa zona, producto de las actividades cotidianas de Cd. del Carmen.

Por último, en términos de  $\text{CaCO}_3$ , se ve claramente que esa zona es en donde se encuentran las mayores concentraciones de dichas sales (entre 60 y 70%), lo que sustenta los resultados obtenidos al determinar los Sólidos Suspendidos Totales (SST).

La evaluación del comportamiento y simulación aplicando el modelo Hydro Track™ de los SST en la Laguna de Términos, que son arrastrados por las descargas superficiales existentes en la zona así como por los sistemas lagunares aledaños, así como los provenientes de las descargas directa de aguas residuales, concuerda con la batimetría obtenida por Espina y Salles (2001 y 2003). Además el transporte de dichas partículas concuerda con el comportamiento de las corrientes internas del cuerpo de agua lo cual reporta Yáñez (1963) en su trabajo.

## 6.2 COLIFORMES FECALES

La región en que se encuentra la Laguna de Términos ha presentado durante su historia, un incipiente desarrollo. Los asentamientos humanos en las márgenes de la laguna son pequeños. Sin embargo, la agricultura y la ganadería son actividades de suma importancia comercial para el estado de Campeche (Lizarraga-Partida, 1988).

La tendencia actual ha condicionado que los estudios bacteriológicos relacionados con la contaminación, se enfoquen hacia la cuantificación de bacterias entéricas, utilizando a estos grupos como indicadores de contaminación orgánica, tal como lo detectó Lizarraga-Partida (1988).





Los resultados que se obtuvieron al realizar el muestreo en la Laguna de Términos para la evaluación microbiológica, expresan que si hay Coliformes Fecales. Para los puntos P1, P2 y P3 que están a un costado de la boca de Puerto Real, Boca del río Candelaria y un riachuelo seco a un lado del mismo río respectivamente, se obtuvieron lecturas en el laboratorio  $\leq 0.2$  como NMP de coliformes fecales, lo cual puede deberse a que no existen asentamientos humanos en la zona oriente de la Laguna de Términos, por tanto, no hay un impacto por descargas de aguas residuales. Para los puntos P17 y P18 (Centro de la laguna entre la Boca de Puerto Real y centro de la Laguna entre la Isla del Carmen y río Champán), que tienen gran inclinación hacia la zona oriente, se observa un comportamiento similar, con concentraciones  $\leq 0.2$  como NMP de coliformes fecales.

Cabe mencionar que en la descarga del Río Candelaria, el cual está ubicado en esa zona y que, tiene una gran influencia para estos puntos, no se obtuvieron lecturas de este parámetro. Puede ser por el gran caudal que tiene el río o bien, porque en realidad no hay asentamientos humanos o descargas de aguas residuales a varios kilómetros, que puedan ocasionar un gran impacto al cuerpo y la gran corriente interna de la Laguna que, arrastra todas las partículas hacia el occidente de la misma, impactando esa zona con coliformes fecales.

Para los puntos 4, 15 y 21, las concentraciones de coliformes estuvieron en 8, 10 y 6 como NMP respectivamente. Para el punto 4 se puede deber a la gran influencia de la corriente interna de la Laguna, la cual transporta todas las partículas hacia la zona occidente, así como la concentración de la salinidad en el área.

Sin embargo en la zona donde se ubica el punto, hay asentamientos humanos, por lo que tal vez, se deba a un impacto ocasionado por las aguas residuales que provienen de las casas habitación que se encuentran en la zona. Para el punto P15, que se ubica en la Boca de Puerto Real, donde la corriente proveniente del Golfo que alimenta a la Laguna influye para que no haya grandes concentraciones de Coliformes, por la alta concentración de la salinidad, sin embargo, al existir asentamientos humanos, hay descargas de aguas residuales, lo cual puede influir en la presencia de estos microorganismos.

Esto coincide con lo reportado por Rodríguez y Romero en 1981. Para el punto 21, dentro del Río Chumpán, se considera el gran caudal que, aunque con poca profundidad, influye considerablemente, diluyendo la salinidad en esa zona.

En la boca del Río Champán y la corriente seca ubicada entre el río Chumpán y Palizada (P5 y P6) con 18 y 16 como NMP de coliformes fecales respectivamente, se comienza a ver el gran impacto de las corrientes internas de la Laguna, además de las grandes descargas de los Ríos Candelaria y Chumpán, donde en



sus descargas disminuyen la salinidad, produciendo un ambiente óptimo para el desarrollo de los coliformes. Esto se debe al nacimiento de islotes evitando que las corrientes homogenicen el transporte, ocasionando que en algunos lugares de la Laguna, se encuentren concentraciones mayores de partículas, entre los cuales están lo coliformes.

Este mismo fenómeno se observa en el punto P16 (Asentamientos humanos en la Boca de Puerto Real), donde hubo una lectura de 17 NMP de coliformes fecales. Esto es debido a la ubicación del punto, donde la corriente no puede impactar directamente, ocasionando que la limpieza en la zona occidente del cuerpo, sea menor, a causa del gran asolvamiento que hay, resultado de las avenidas de los ríos y del mismo Golfo.

En la boca del Río Palizada, el brazo del mismo, boca del Sistema Lagunar Pom-Atasta, bajo el puente que comunica al poblado de Frontera con la Isla, parte exterior de la Boca del Carmen, ubicación del mercado, salida del canal de la Estación del Carmen y el canal ubicado entre la Boca del Carmen y Puerto Real (P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13 Y P14 respectivamente), con lecturas de 38, 30, 60, 64, 83, 95, 163 y 254 NMP de coliformes fecales, demuestran el gran impacto de las corrientes internas de la Laguna, que transportan a las partículas hacia la Boca del Carmen, lugar donde se encuentran ubicados los puntos mencionados. Además cabe mencionar, que en esta zona de la Isla, se encuentra ubicada Cd. del Carmen, ciudad industrializada por PEMEX. Como resultado, se observa una zonificación definida entre los puntos de muestreos cercanos a la isla del Carmen.

Por lo anterior, se puede intuir que las aguas residuales de la misma ciudad, junto con la gran influencia de las corrientes internas, ocasionan un impacto que está tendiendo a ser irreversible, por la gran concentración de contaminantes y sedimentos al área occidente de la Laguna de Términos.

Al observar la concentración de coliformes que se obtuvo en la zona occidente de la Laguna, se ve un incremento considerable de los mismos, lo que presenta la gran contaminación que existe y la cual, va en aumento.

Los puntos P13 y P14 que corresponden a la salida del canal de la estación del Carmen del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y canal entre este y la Boca de Puerto Real, que presentan unas de las concentraciones más altas de todas las mediciones realizadas en la Laguna, expresan la falta de drenaje en Cd. del Carmen, así como la falta de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, que puedan contrarrestar, la gran contaminación que ocasionan las descargas de aguas residuales hacia la Laguna.



Para el punto P19 (Centro de la laguna entre el canal de salida de la Estación del Carmen del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y el río palizada), influenciado considerablemente por la corriente del cuerpo de agua, presenta una concentración de 20 como NMP de coliformes fecales, lo que puede ser por la circulación existente de la Laguna, evitando que se estanque el agua.

Para el punto P20, que está ubicado en la descarga del rastro de la ciudad, se encontraron 362 como NMP de coliformes fecales. Estos valores son similares a los que reporta Romero (1986) en su trabajo.

Esto puede ser consecuencia del pésimo control que hay en las descargas de aguas residuales y la falta de tratamiento de las mismas. Además por el lugar donde está este punto, la corriente es menor, y esto puede ser debido al gran asolvamiento que se encuentra en la orilla de la Isla produciendo que la corriente busque direcciones alternas, evitando una circulación homogénea en la zona. Esto concuerda con lo reportado por V. Botello (1978).

Es importante mencionar que la población de coliformes fecales en la Laguna de Términos presentó una variación considerable, por la ubicación de los puntos y la época en que se realizaron las mediciones.

Se observa una diferencia en las estaciones climáticas, la cual es influenciada por las concentraciones de salinidad que se han encontrado en estudios anteriores al presente (Lizarraga-Partida, 1988; Romero, 1986 y V. Botello, 1978).

Cuando aumenta la salinidad en la Laguna de Términos, que es en la época de sequía, se presenta la inhibición del crecimiento y permanencia de los coliformes fecales, tal como lo observó Romero (1986).

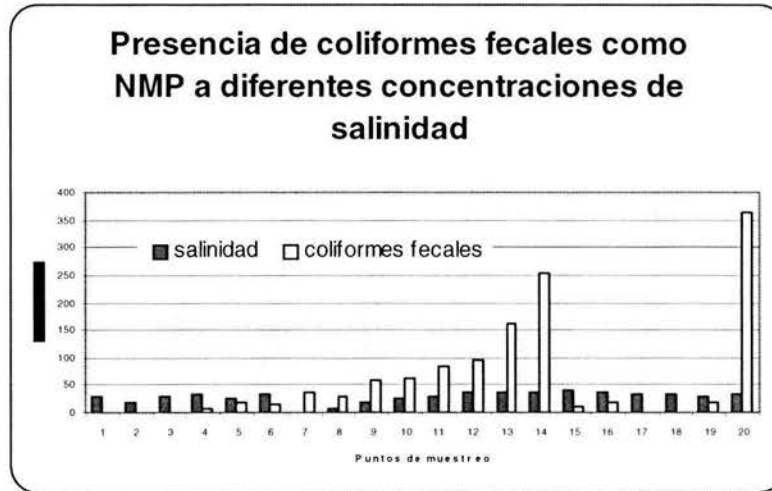
Sin embargo durante la época de lluvias existe un decremento de la salinidad, ocasionando un aumento en el número y permanencia de los coliformes fecales; esto se observa en la figura 6.2 de este capítulo.

Por último en época de nortes, donde la salinidad no sufre un incremento considerable, la población de coliformes disminuye debido al desplazamiento de la capa superficial del agua por los fuertes vientos.

En la figura 6.3 se muestra la relación que existe entre la concentración de la salinidad y el NMP de coliformes en la Laguna de Términos, permitiendo distinguir que en los puntos cercanos a la Isla del Carmen, contienen concentraciones mayores de coliformes, posiblemente por la influencia de las descargas directas de aguas residuales a la laguna.



De acuerdo a Romero (1986), la disminución de coliformes fecales se debe al período tan corto de supervivencia de dichas bacterias en aguas salobres (Romero, 1986).



**Figura 6.3. Presencia del NMP de coliformes fecales en cada punto de muestreo en concentraciones variadas de salinidad.**

Por ello se encontró mayor número de coliformes fecales en las descargas de los ríos Palizada, Chumpan y el sistema Pom-Atasta, así como en los puntos más cercanos a la Isla del Carmen, ya que la salinidad disminuye considerablemente.

En general se puede observar que hacia la zona occidente la laguna presenta valores más o menos altos, que hacia el oriente y bocas de los ríos. Partiendo de lo anterior, se puede inferir que la salinidad es un factor limitante para el desarrollo de coliformes fecales.

Sin embargo, a pesar de la influencia de la salinidad como controlador natural en las poblaciones de coliformes, el nivel encontrado rebasa el número permisible en el Código Sanitario Internacional para aguas dedicadas a la Acuicultura, lo que permite decir que el aporte de aguas negras a la laguna es muy alto.

Para este trabajo los coliformes fecales solamente son una variable explicativa del comportamiento de sistema lagunar, ya que siendo un parámetro no conservativo, el modelo no determina su decaimiento a través que avanzan dentro de la Laguna de Términos.

Por último, es importante recalcar que a pesar de la diferencia que hay entre el último estudio de coliformes fecales realizado por Romero (1986) y la evaluación actual, no hay grandes cambios en los resultados obtenidos.



### 6.3 RESULTADO DE LAS SIMULACIONES.

Las simulaciones permitieron obtener datos de velocidades y niveles de la superficie libre del agua en todos los nodos de la malla. Como primera observación, es importante decir que las curvas de gastos son casi idénticas a las curvas de velocidades.

Es sabido que en un canal (sea éste de una boca o de un río), tanto el gasto, la velocidad y el área de la sección transversal, son funciones del tiempo y dependen de la variación temporal de la elevación de la superficie libre del agua o del gasto.

Sin embargo, en el caso de las bocas oceánicas de Laguna de Términos, la amplitud de la marea es de tres a cuatro ordenes de magnitud inferior al radio hidráulico (área dividida por el perímetro mojado) de dichas bocas.

Por lo tanto las fluctuaciones verticales de la marea no afectan significativamente el área y por lo tanto la relación entre gasto y velocidad es casi lineal. Así mismo, y dado que se prescribieron en cada simulación gastos constantes en los ríos durante todo el intervalo de modelación (el gasto no varía desde el principio hasta el fin de la simulación), las áreas de las secciones transversales de las desembocaduras de los ríos tampoco variaron significativamente.

#### **SIMULACIÓN DE LA MAREA MONOCROMÁTICA Y GASTOS MÍNIMOS (ÉPOCA DE SEQUÍA).**

Los resultados de esta simulación muestran que el sistema distorsiona fuertemente la marea, al momento que ésta entra y se propaga en la laguna.

Dicha distorsión se da no sólo en la reducción de la amplitud de la marea sino también en el retraso de la misma, similar a lo que reporta Espinal (2002).

En el caso de Laguna de Términos, un factor que incrementa la complejidad de la distorsión de la marea es el aporte de agua a través de los ríos, el cual es "externo" al intercambio entre la laguna y el mar.

En otras palabras, el volumen de agua introducido al sistema por los ríos, el cual se traduce en la formación de gradientes no linealmente distribuidos en el dominio del sistema, hace que la señal de la marea sea altamente compleja.





Otros resultados importantes son:

- ✦ La marea de flujo es aproximadamente 50% mayor que el de reflujo en Boca del Carmen ( $3.130 \cdot 10^8 \text{ m}^3$  contra  $2.121 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ ). A primera vista, ese desequilibrio es debido a la relativa proximidad del Río Palizada, el cual en épocas de estiaje conduce un gasto importante. Sin embargo, dicho gasto representa durante un ciclo de marea únicamente  $9.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ , es decir menos del 10% de la diferencia entre las mareas de flujo y reflujo de dicha boca. Por lo tanto, el 90% de dicha diferencia debe provenir de otras fuentes, como pueden ser los otros ríos y en particular la Boca de Puerto Real.
- ✦ Al analizar la curva de gastos para la Boca de Puerto Real, se puede observar que el fenómeno es inverso, es decir, entra más agua de la que sale.
- ✦ Por lo tanto, los resultados del modelo confirman las conclusiones presentadas en otros estudios, que la Boca de Puerto Real es “importadora” de agua al sistema, en tanto que la boca de Carmen es más bien “exportadora”.
- ✦ Cabe señalar que la entrada neta de agua por Puerto Real, sumada al aporte de agua dulce de los ríos no explica en su totalidad la enorme diferencia que existe entre los volúmenes de flujo y reflujo en la boca del Carmen. Eso se debe a que las extensas zonas de manglar al sur y suroeste de la Boca del Carmen, las cuales tenían un nivel de agua de +1.0 metros al inicio de la simulación, no han terminado de vaciarse. Lo anterior podría verse como un factor para que el intervalo de modelación fuera mucho mayor, pero de hecho demuestra que los tiempos de residencia en las zonas altas y remotas del suroeste del sistema son muy elevados.
- ✦ Es necesario realizar un análisis más minucioso para estimar con mayor precisión el tiempo de residencia en las diferentes zonas de la Laguna. Sin embargo, dada la falta de datos hidrodinámicos para calibrar con precisión el modelo, la falta de un detalle de los diferentes ambientes vegetales de las zonas y de una batimetría de alta resolución, es poco confiable y con precisión los tiempos de residencia.
- ✦ En cuanto a los gastos en las desembocaduras de los ríos, el volumen transportado por Palizada es suficientemente grande para contrarrestar en cierto momento el gradiente generado por la marea entrante.





- ✦ Las velocidades son extremadamente bajas, del orden de  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  o menores. En efecto, con dichas velocidades es que las partículas finas (limos y arenas) llegan a sedimentarse. Ese resultado es indicativo de que la tasa de sedimentación de partículas suspendidas, incluyendo contaminantes procedentes de las descargas de aguas residuales en dichas zonas puede ser importante en época de estiaje, lo cual acarrea sin duda problemas diversos desde varios puntos de vista: morfológicos, biológicos, social y ambiental.

### **SIMULACIÓN DE LA MAREA VIVA Y GASTOS MÍNIMOS (ÉPOCA DE SEQUÍA)**

En los resultados entre las condiciones de la primera simulación y la segunda, no existe una diferencia significativa entre la hidrodinámica. De hecho ambas tienen gastos mínimos de los ríos y la marea monocromática utilizada no difiere mucho (ni en amplitud ni en período) de la marea viva. Por lo tanto las observaciones son básicamente las mismas.

### **SIMULACIÓN DE LA MAREA MUERTA Y GASTOS MÁXIMOS (ÉPOCA DE AVENIDAS)**

La observación principal en esta simulación es que el aporte de los ríos, en particular Palizada y Candelaria, es tan alto que no se presentan gastos aguas arriba por la acción de la marea entrante.

Las velocidades en las desembocaduras no varían mucho, salvo en Boca de San Francisco y Boca Chica, donde el aumento de velocidad es apreciable. Por lo tanto, resulta que los gastos de avenidas en los ríos Chumpán, Candelaria y Mamantel no favorecen el aumento de transporte de sedimentos, coliformes fecales o contaminantes que se encuentran en el cuerpo de agua.

Lo anterior se debe a que las lagunas deltáicas de esos ríos funcionan como frenos para el flujo. De hecho, al aumentar abruptamente la sección transversal del cauce y expandirse en dichas zonas anteriores a la Laguna de Términos, la velocidad del flujo disminuye, y parte de las partículas suspendidas y contaminantes acarreados por los ríos, sedimentan.

Por otro lado dada la magnitud del aporte de agua dulce en época de avenidas, la marea de reflujos es invariablemente mayor que la de flujos en las bocas oceánicas.

En este caso, el comportamiento es favorable para la estabilidad morfológica general del sistema, ya que las partículas suspendidas finas que entran a Laguna de Términos por los ríos pueden ser expulsadas hacia el mar fácilmente.



## **SIMULACIÓN DE LA MAREA VIVA, GASTOS MÁXIMOS (ÉPOCA DE AVENIDAS) Y SOBRE ELEVACIÓN POR TORMENTA.**

Al igual que la simulación anterior, no se presentan gastos aguas arriba por la acción de la marea entrante. Las velocidades en las desembocaduras presentan una variación importante. Por lo tanto, resulta que los gastos de avenidas en los ríos Chumpán, Candelaria y Mamantel, favorecen el aumento de transporte de partículas suspendidas y contaminantes (coliformes y materia orgánica).

Por otro lado, dada la magnitud del aporte de agua en esta simulación, la marea de reflujo es aún un poco mayor que el de flujo en las bocas oceánicas. Por lo tanto aún bajo condiciones de marea de tormenta, el comportamiento es favorable para la estabilidad morfológica general del sistema.

### **6.3.1 CONDICIONES DE FRONTERA PARA LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE**

La propagación de oleaje tiene como fin incorporar los efectos de las corrientes generadas por oleaje de 1 y 3 metros de altura de ola respectivamente, tomando como punto de partida la frontera norte, las fronteras restantes son no reflejantes.

Para el caso de laguna de Términos esta propagación se lleva a cabo desde aguas profundas (aproximadamente desde la cota -15 metros), hasta el interior de Laguna de Términos.

### **6.3.2 CORRIENTES GENERADAS POR OLEAJE**

Uno de los principales objetivos es evaluar el efecto de las corrientes generadas por el oleaje, y a su vez cuantificar el efecto de las corrientes en el transporte de partículas y contaminantes a través de las bocas del Carmen y Puerto Real; para llegar a dicho objetivo es necesario hacer la propagación de oleaje desde aguas profundas hasta el punto de interés que en este caso son las bocas antes citadas.

Los resultados que a continuación se presentan, muestran el comportamiento de las corrientes generadas por oleaje y es evidente que el efecto de las bocas sobre el oleaje se ve disminuido en lo que respecta a la altura de ola, mientras que en lo que corresponde al cambio de dirección por efecto de refracción y difracción se ve muy acentuado, sobre todo al entrar el oleaje a través de las bocas teniendo con esto cambios muy fuertes (figuras 6.4 a la 6.8). Este comportamiento es similar a lo que reportan Espinal y Salles en su trabajo (2002).

Por otro lado es de esperarse que el transporte de partículas hacia el interior de la laguna sea alto, dado que las corrientes también los son.



Aunque se ve disminuido el oleaje al pasar a través de las bocas, justo después de ellas hacia el interior las corrientes pierden su capacidad de transportación de partículas y contaminantes suspendidos, jugando un papel importante por que de no ser así, la laguna terminaría por asolarse y alterarse por dichos contaminantes.

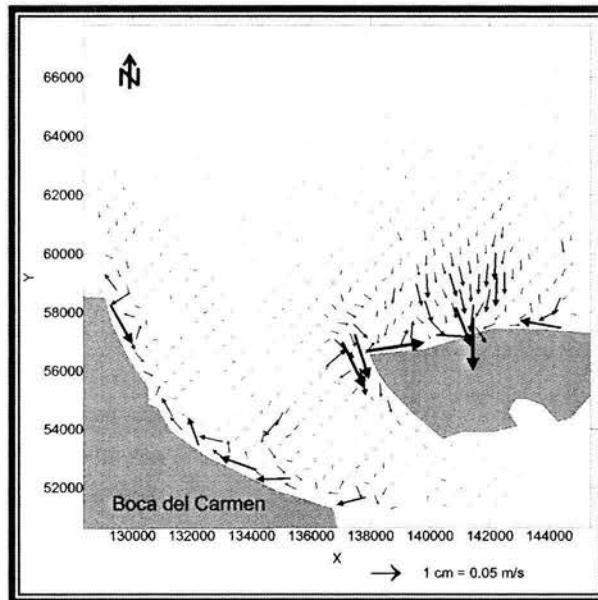


Figura 6.4. Corrientes generadas por oleaje  $H=1$ , m en Boca del Carmen.

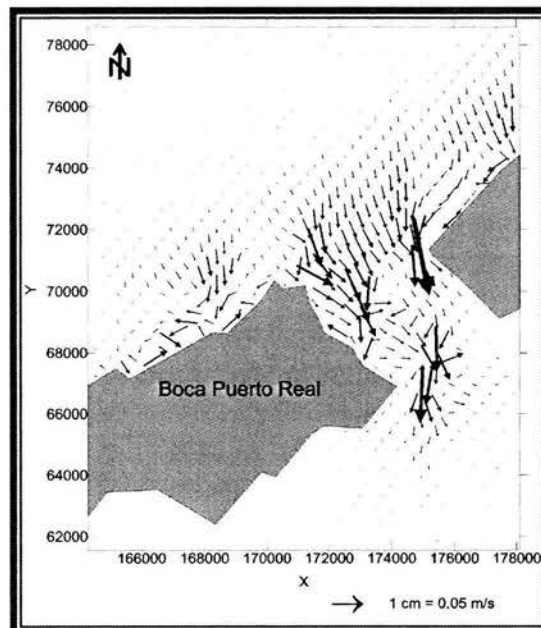


Figura 6.5. Corrientes generadas por oleaje  $H=1$ , m en Boca Puerto Real.

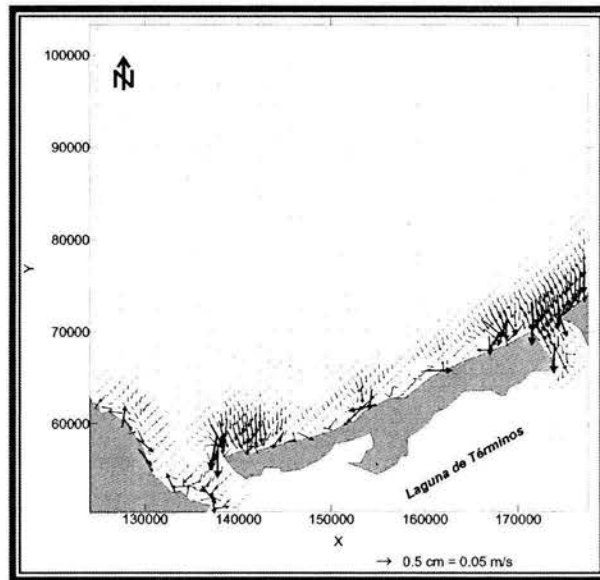


Figura 6.6. Corrientes generadas por oleaje H= 3 m, en ambas bocas.

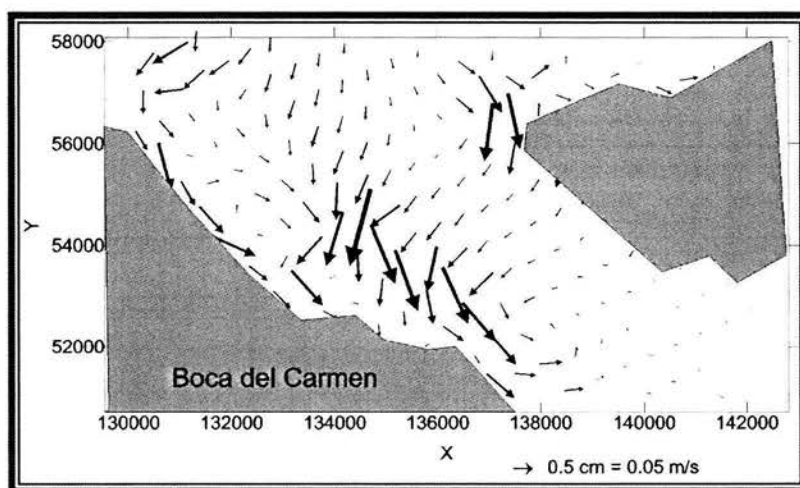
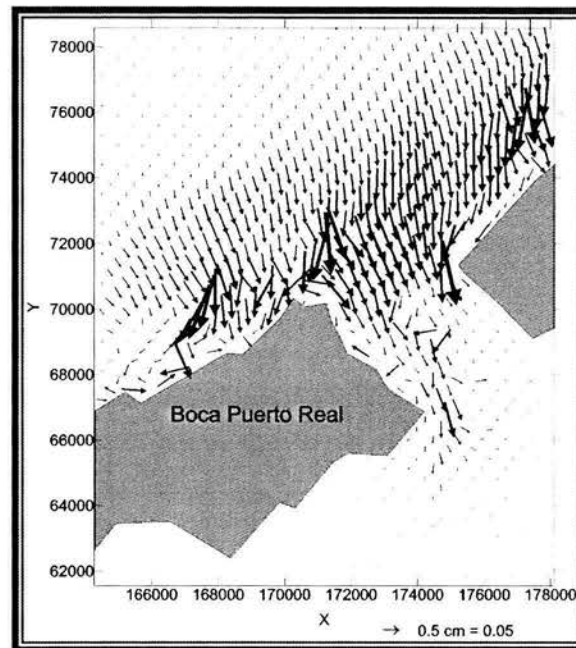


Figura 6.7. Corrientes generadas por oleaje H= 3m, boca del Carmen.



**Figura 6.8. Corrientes generadas por oleaje  $H= 3m$ , boca Puerto Real.**

En las figuras anteriores se pueden apreciar el patrón de las corrientes para olas de 1 y 3 metros de altura correspondientes a las bocas del Carmen y Puerto Real; cabe aclarar que la propagación se hizo desde la frontera norte de la malla de cálculo, sin embargo para poder apreciar con mayor detalle el orden de magnitud y dirección de las corrientes que se presentan en las bocas se hace un acercamiento.

Otro de los parámetros importante obtenido en la propagación del oleaje, es la dirección del frente de ola; a continuación en las Figuras 6.9 y 6.10 se muestra las direcciones de los frentes de onda del oleaje para 1 y 3 metros de altura de ola respectivamente en todo el dominio de cálculo.

El ángulo formado por el frente de oleaje y las corrientes generadas por el oleaje es un parámetro necesario en la estimación del transporte de partículas y contaminantes en fondo y en suspensión a través de las bocas.

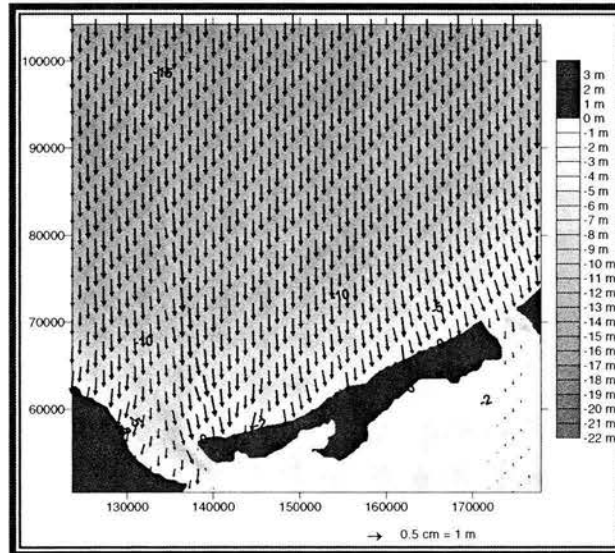


Figura 6.9. Muestra la magnitud y dirección del oleaje en todo el dominio de estudio para una altura de ola inicial  $H=1$  m.

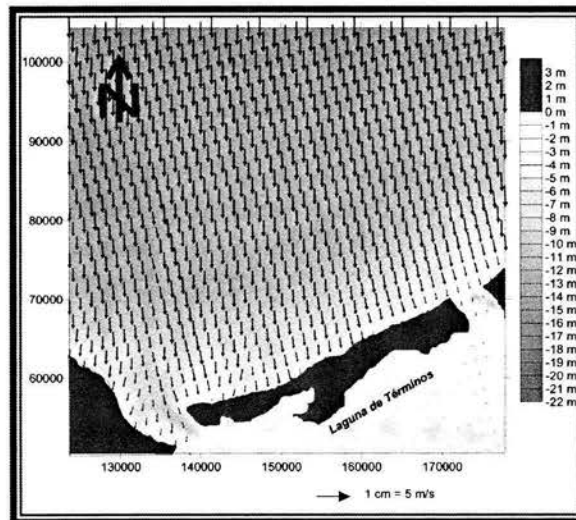


Figura 6.10. Muestra la magnitud y dirección del oleaje en todo el dominio de estudio para una altura de ola inicial  $H=3$  m.





Este comportamiento también se observa dentro la laguna (figuras 6.11 y 6.12), donde la corriente tiene una dirección de la Boca de Puerto Real hacia la Boca del Carmen.

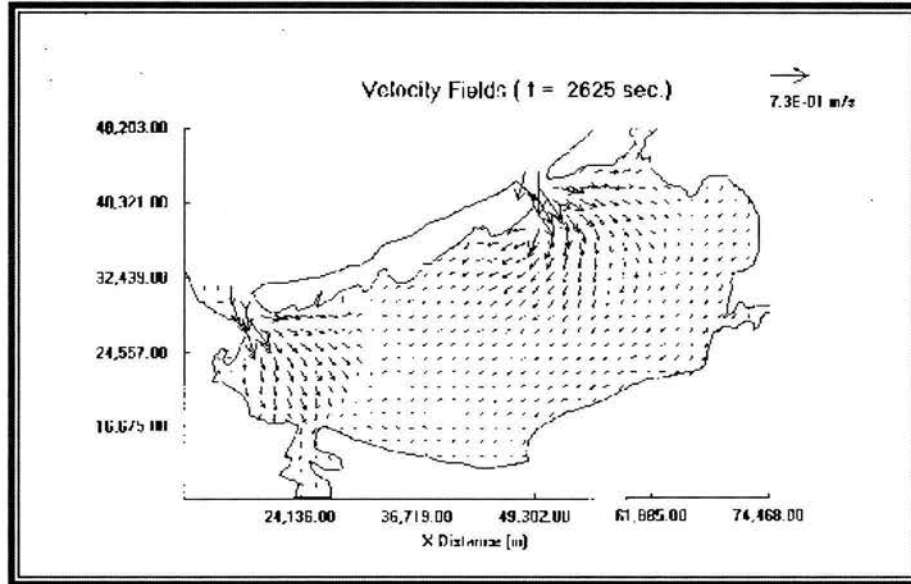


Figura 6.11. Hidrodinámica durante el flujo de marea con vientos del sureste.

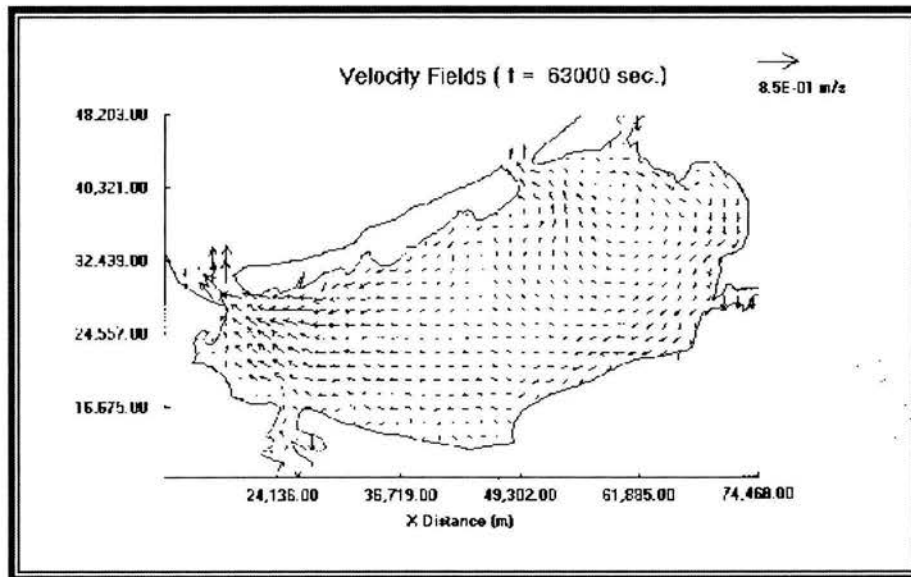


Figura 6.12. Hidrodinámica durante el reflujó de marea con vientos del norte.

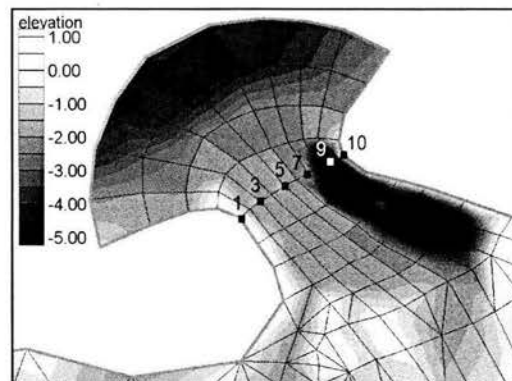


### 6.4 TRANSPORTE DE PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Las partículas suspendidas que una corriente levanta a través de su cauce, o que es aportada por él deslave de una ladera, por sus tributarios o por el movimiento de masa, se mueve corriente abajo hacia su eventual meta, el océano o como es el caso de las bocas en las Lagunas costeras.

Cuando cae el agua y se filtra en el terreno, disuelve algunos de los componentes naturales del suelo y contaminantes que se encuentran en él. Después el agua se filtra a través de las aberturas, poros y grietas de la roca basal y disuelve materia adicional a medida que se mueve. La cantidad de materia disuelta contenida en el agua varía con la época climática, la estación y la ubicación geológica. Los compuestos que frecuentemente se encuentran en solución en el agua, sobre todo en regiones áridas, son los carbonatos de calcio y de magnesio. Además llevan pequeñas cantidades de cloruros, nitratos, sulfatos y sílice con quizás trazas de potasio.

Se presentan los resultados que suponen las velocidades de las corrientes generadas por marea, aporte de ríos y oleaje, así como sus componentes de dirección, todo esto a lo largo de la zona más angosta de la boca de Puerto Real (Figura 6.13), donde se observa la ubicación de los puntos de control con los cuales se evaluó el transporte de partículas y coliformes que pasaron a través de la mínima sección de la boca (Salles, 2002).



**Figura 6.13. Puntos de control para el calculo de transporte de sedimentos, hecho por Espinal y Salles (2002).**

En la evaluación del transporte de partículas suspendidas entre los cuales están los coliformes y otros contaminantes, es necesario disponer de los resultados de la propagación de oleaje donde se tomaron las direcciones y alturas de ola, para posteriormente obtener las direcciones e intensidades de las corrientes generadas por oleaje (Espinal, 2002; Salles y Espinal, 2002).



Con respecto a la caracterización hidrodinámica se obtuvieron los niveles, dirección y magnitud de velocidad de las corrientes generadas por las mareas y aporte de cuerpos adyacentes a la Laguna de Términos incluyendo lagunas y bocas comunicadas al mar (Del Carmen y Puerto Real).

### 6.5 RESULTADOS DEL TRANSPORTE DE LAS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS

Uno de los objetivos de este trabajo es evaluar el transporte de partículas y contaminantes neto a través de la Laguna y bocas, ya que por medio de ésta información se establecen indicadores con los cuales es posible evaluar procesos tan importantes como lo son, la ubicación de las zonas de erosión y depositación de sedimentos y contaminantes (como los coliformes), ya que estos últimos constituyen una variable explicativa en esta investigación.

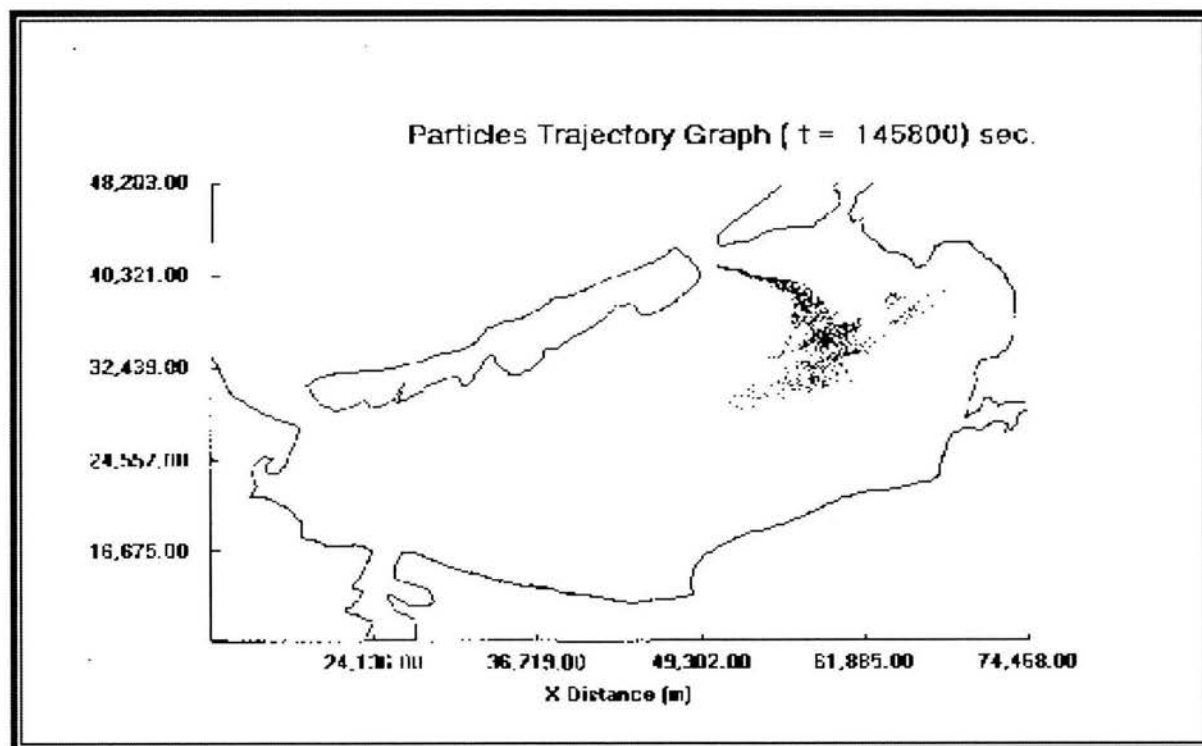
Otro de los aspecto importantes, es que durante los eventos climáticos extraordinarios como lo son las tormentas tropicales o huracanes, el aporte de los ríos sobre elevación por marea de tormenta y el correspondiente incremento en la altura de ola, se generan los cambios morfológicos de mayor importancia pues la magnitud y dirección de las velocidades de las corrientes mueven un mayor número de partículas suspendidas.

Al aplicar un software de simulación para entender el comportamiento de contaminantes, partículas suspendidas y sedimentos, es importante para evaluar el impacto en la Laguna de Términos conocer a grandes rasgos la distribución y depositación de dichos contaminantes (como los coliformes), que dan las bases para identificar las zonas más impactadas por dichas partículas.

Con ello se puede comprobar el trabajo obtenido en campo, que es una parte indispensable para llevar a cabo la evaluación del grado de contaminación de la Laguna.

Como se ha venido discutiendo, la batimetría influye considerablemente en el comportamiento de las partículas suspendidas (contaminantes y sedimentos marinos y terrestres), dentro de la Laguna de Términos, en donde la Boca de Puerto Real es la que más aporta contaminantes (materia orgánica y microorganismos) así como los sedimentos marinos, hacia el estuario.

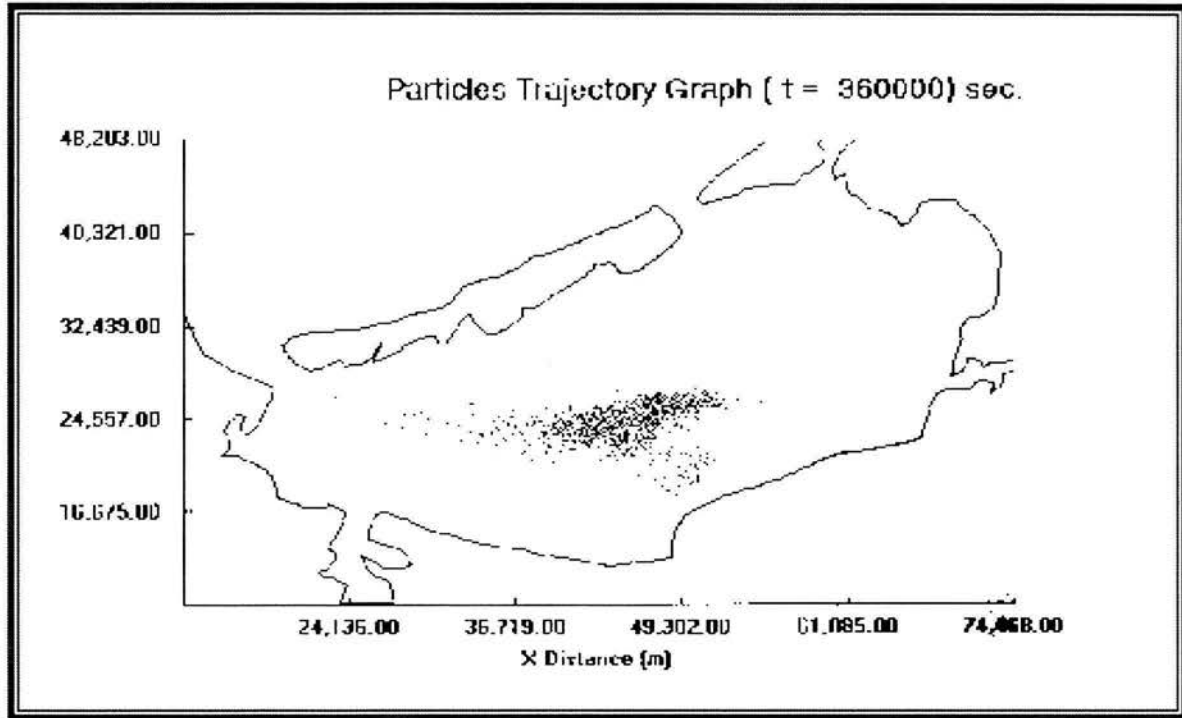
Esto se observa en la figura 6.14, que es resultado de la modelación utilizando los resultados obtenidos para SST.



**Figura 6.14. Comportamiento de las partículas (coliformes y SST) provenientes de la Boca de Puerto Real utilizando el software Hydro Track.**

Esta figura demuestra que el comportamiento de los SST y los coliformes es igual, si se consideran partículas suspendidas en general, y corrobora lo que se discutió anteriormente en este capítulo, que la tendencia de toda partícula es trasladarse hacia el occidente, donde se encuentra la Boca del Carmen, por naturaleza del cuerpo.

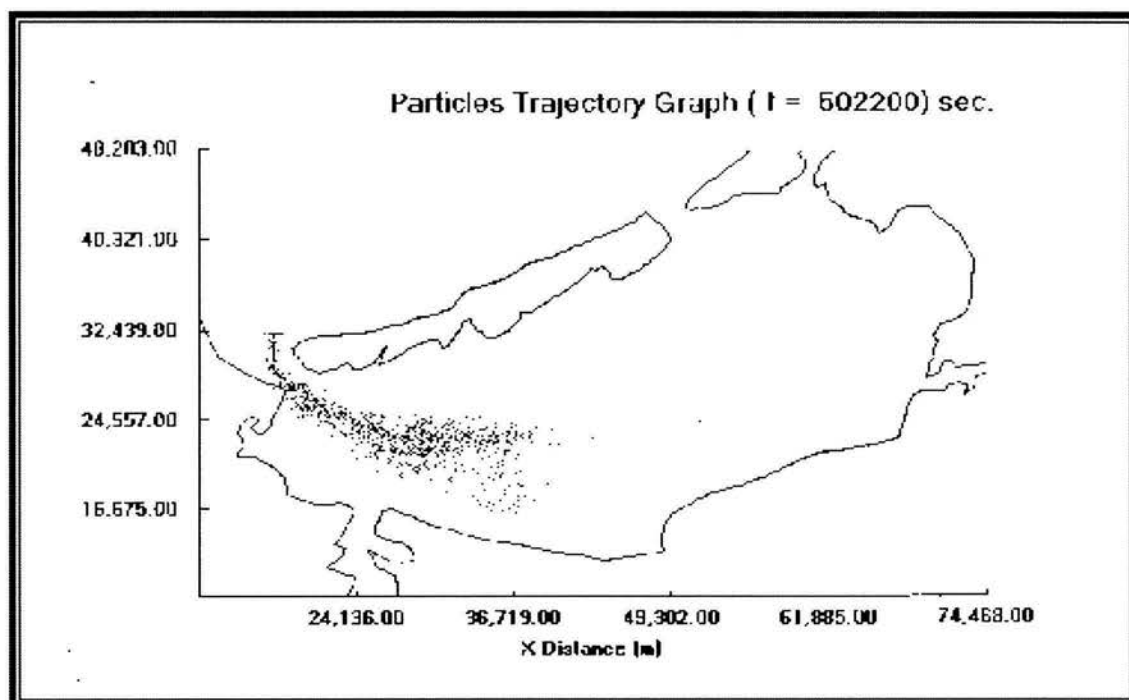
La figura 6.15, muestra que la tendencia de los contaminantes y sólidos que se encuentran suspendidos en la laguna, llevan una dirección hacia la Boca del Carmen, mostrando que el área más impactada por dichas partículas (coliformes y SST) es la zona occidente de la Laguna de Términos.



**Figura 6.15. Avance de la pluma de partículas de Puerto Real con los vientos del norte.**

Esto se observa en la figura 6.16, donde la pluma tiende a impactar hacia el occidente de la laguna.

La velocidad disminuye durante se recorren distancias mayores dentro la laguna, a causa de la pérdida de velocidad en las paredes del cuerpo siendo menores en los litorales del estuario, por esa razón, la suspensión y estancia de dichas partículas las cuales pueden ser contaminantes como materia orgánica, coliformes y sedimentos marinos y terrígenos es mayor, provocando un impacto considerable en la zona mencionada.



**Figura 6.16. Salida de la pluma de Puerto Real por la Boca del Carmen, demostrando el flujo neto a través de la Laguna de Términos.**

Las figuras 6.14 a la 6.16 solamente muestran el desplazamiento de partículas suspendidas (ST y Coliformes) acompañados de contaminantes que son vertidos durante la pluma avanza a través del cuerpo agua, pero no muestran como van quedando las partículas a través del recorrido de la pluma. Pero es conveniente mencionar que algunas de éstas van quedando dispersas y otras sedimenta durante el recorrido. Para este caso, el modelo no mide la concentración de partículas que se quedan y sedimentan, solo muestra el recorrido y como se distribuye la pluma a través del mismo.

### 6.5.1 CONDICIONES DE MODELACIÓN DE LAS PARTÍCULAS

Las condiciones que se utilizaron para obtener el comportamiento de los SST y Coliformes fecales son las siguientes:

- ⊙ Dominio de 80\*50 km
- ⊙ Malla de 1000 m
- ⊙ Batimetría variable

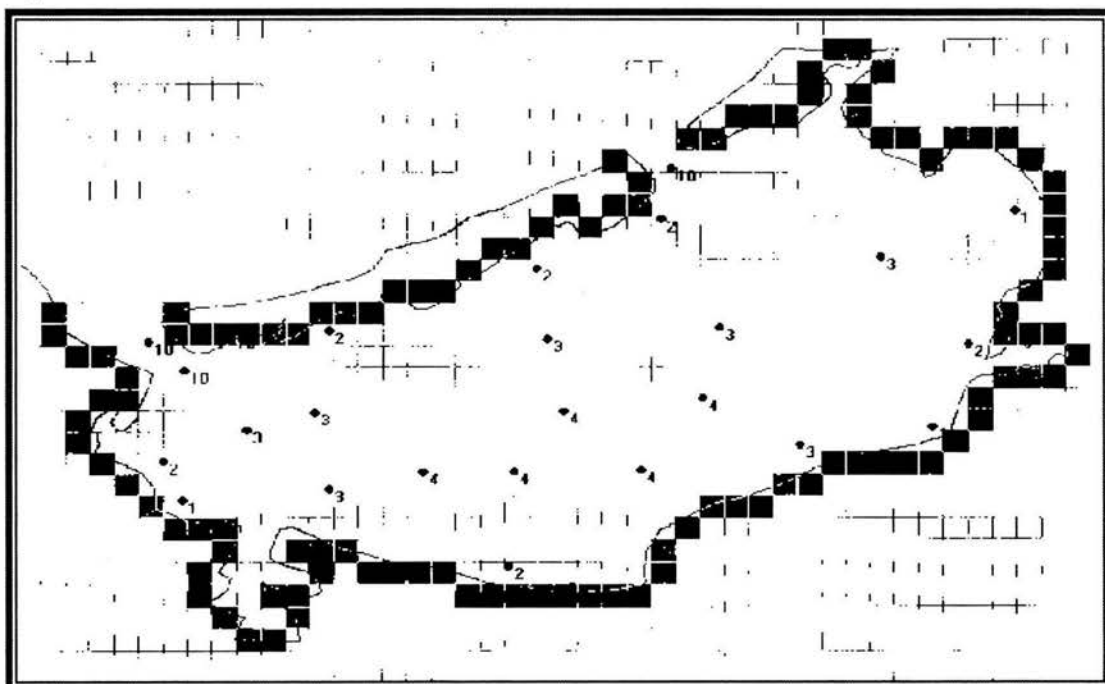




- ⊙ Fronteras abiertas: 2 (Boca del Carmen y Boca de Puerto Real)
- ⊙ Vientos dominantes del sureste de 5.5 m/s
- ⊙ Vientos del norte de 12 m/s
- ⊙ Marea de tipo diurno-mixta, con los principales componentes que son:  $M_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$  y  $S_2$ .
- ⊙ Amplitud de marea de 0.4 m
- ⊙ Coeficiente de Manning de 0.0025
- ⊙ Coeficiente esfuerzo del viento de 0.0016
- ⊙ Densidad del agua estuarina de  $1020 \text{ kg/m}^3$
- ⊙ Tiempo de simulación hidrodinámica de 100 h
- ⊙ Puntos de descarga de contaminantes: 3 (Fronteras abiertas, y Río Palizada)
- ⊙ Tiempo de simulación de transporte de contaminantes de 150 h
- ⊙ Efecto de coriolis calculado en función de la latitud.

Dichas condiciones dieron como resultado las figuras 6.14 y 6.15, que muestran el comportamiento de las corrientes dentro de la Laguna y las figuras 6.17 a la 6.18, las cuales demuestran el comportamiento y dirección de los SST y coliformes fecales.

La malla utilizada para generar dichas figuras se muestra a continuación (Figura 6.17).



**Figura 6.17. Malla utilizada para obtener el comportamiento de las partículas suspendidas (SST, contaminantes, coliformes, etc).**



## 6.6 RESULTADOS DE LA MODELACIÓN DE COLIFORMES FECALES

Para ver el comportamiento de los coliformes fecales dentro de la Laguna de Términos, se realizó una simulación de dichas partículas no conservativas, pero por las limitaciones del modelo Hydro Track, no se pudo ver el decaimiento de las mismas, generalizándolas sin tomar en cuenta la concentración de los coliformes fecales al distribuirse en el cuerpo de agua.



## 7. ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Una vez que se realizó la evaluación de la Laguna de Términos, y se analizaron los resultados de las partículas suspendidas aplicando el modelo Hydro Track™ para determinar la zona más impactada del cuerpo de agua, se proponen las siguientes alternativas de solución:

- A. Extender las obras sanitarias en la Isla (drenaje y alcantarillado) que capte a las descargas directas a la Laguna (Rastro, mercado, pluviales y domésticas) y construir una Planta de Tratamiento en la zona occidente de la Laguna, ya que la simulación permitió conocer que la Boca del Carmen es donde se requiere.
- B. Desasolver las bocas de los principales y sistemas lagunares que descargan en la Laguna de Términos, después de las épocas de lluvia o avenidas.
- C. Desarrollar una cultura de conservación del ambiente a través de eventos donde participe la población, empresas gubernamentales y empresas particulares y se concientice de la importancia de vivir en un medio sano.
- D. Establecer un sistema de recolección de residuos sólidos municipales basado en el número de habitantes de Cd del Carmen, el cual contemple la separación, reciclaje y disposición final.



## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 8.1 CONCLUSIONES

A través del desarrollo de este trabajo y con base en los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

1. Se identificaron las actividades antrópicas que influyeron notoriamente en la contaminación de la Laguna de Términos, las cuales fueron: las descargas de aguas residuales, ubicación del rastro, tiraderos y depósitos de basura. Se observó que las descargas son directas y que la mayoría se encuentran ubicadas en la zona occidente del cuerpo de agua.
2. Se evaluaron en dos épocas climáticas (lluvia y sequía) los SST y coliformes fecales, concluyendo que a pesar de existir una diferencia en las lecturas, el comportamiento de dichas partículas y otros contaminantes es similar.
3. Los análisis realizados en el laboratorio de los SST y coliformes fecales permiten concluir de manera general que la zona con mayor concentración de dichos parámetros es la zona occidente, considerando que las descargas en esta área influyen en los resultados obtenidos.
4. Con base en la simulación realizada con el modelo Hydro Track, se observó que para la época de lluvia el NMP de coliformes fecales aumenta considerablemente; durante la época de estiaje es similar el NMP de dichos microorganismos, aunque las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  como sal (ver anexo B) provenientes de los escurrimientos ocasionados por la lluvia son considerables que, junto con las concentraciones de salinidad (las cuales van de 21 a 37 0/00) (Ver anexo A), solamente inhiben el crecimiento y permanencia de dichos organismos, ocasionando que éstos tengan una vida muy corta. Por esa razón, se infiere que la salinidad es un factor limitante para el desarrollo de coliformes fecales en la zona de estudio y que, a pesar de ser un controlador natural para dichas poblaciones, el nivel encontrado rebasa el número permisible en el Código Sanitario Internacional para aguas dedicadas a la Acuicultura.
5. Utilizando la dispersión de partículas obtenida con el modelo Hydro Track, se identificaron las zonas más asolvadas en la Laguna de Términos, que es la zona central del cuerpo de agua y en las descargas de los Ríos Candelaria, Palizada, Chumpan y el Sistema Lagunar Pom-Atasta.



Concluyendo que una gran parte de las partículas suspendidas (en las que se encuentran contaminantes) acarreadas por los ríos antes mencionados son depositadas en la laguna, donde se observa una selección de partículas y contaminantes sedimentados, notándose además que el tamaño de la partícula disminuye hacia la costa continental, por lo que éste aspecto sugiere que el tamaño de las mismas y su distribución, está en función de la dirección e intensidad de las corrientes dentro de la laguna.

## 8.2 RECOMENDACIONES

Una vez que se describieron los problemas que están impactando seriamente a la Laguna de Términos, se recomienda lo siguiente:

1. Identificar detalladamente si las descargas que son vertidas a la Laguna de Términos son de origen doméstico, industrial o agrícola, utilizando la NOM-001-ECOL-1996.
2. Evaluar el funcionamiento de la planta de tratamiento existente el Cd. del Carmen caracterizando su influente, efluente y la eficiencia del proceso.
3. Realizar una segunda evaluación (parámetros fisicoquímicos, biológicos, hidrológicos e hidrodinámicos) de la Laguna de Términos, para observar si el comportamiento descrito en el presente trabajo es similar o hay cambios en la contaminación de la Laguna de Términos.
4. Realizar el dragado de las bocas y zonas más asolvadas en la Laguna para evitar que la depositación de partículas sean mayores así como los tiempos de suspensión.



---

## 9. BIBLIOGRAFIA

Amescua Linares F. y Yáñez Arancibia A., 1980. Ecología de los sistemas fluvio-lagunares asociados a la Laguna de Términos. El hábitat y estructura de las comunidades de peces. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Vol. 7(1). Págs.: 69-118.

Antonie, W. J., 1972, "Structure of the gulf of Mexico", p 134. In: R. Rezak and J. H. Vernon. Contributions on the geological and geophysical oceanography of the Gulf of Mexico, vol 3. Texax A. and M. University. Oceanography Studies. p. 303.  
Anuario Estadístico del Estado de Campeche, INEGI, 1999.

Ayala-Castañares y Gutiérrez-Estrada; 1990. "Morfología y sedimentos superficiales de la Plataforma Continental frente a Tabasco y Campeche", México. An. Inst. de Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México 17(12): 163-190.

Balistreri, L. S. y Murria, J. W.; 1983, "Metal-solid interactions in the marine environment: estimating apparent equilibrium binding constants. Geochim. Cosmochim. Acta 48:1091.

Batley, G. E. and T. M. Glorence, "Determination of the chemical forms of dissolved cadmium, lead and copper in seawater," Marine Chem. 4:347-363 (1976).

Behra, Ph, "Etude du comportement d'un micropolluant métallique –le mercure- au cours de sa migration à travers un milieu poreux saturé: Identification expérimentale des mécanismes d'échanges et modélisation des phénomènes," Ph. D. Thesis. Louis Pasteur University, (Strasbourg, France).

Behra, Ph, "Evidences for the existence of a retentions phenomenon during the migration of a mercurial solution through a saturated porous medium, Geoderma 38:209-222 (1986).

Beltrán Rafael (1990). Introducción a la Mecánica de Fluidos. Editorial: Mc Graw Hill.

Benítez J., Zárate Lomeli D., Rojas Galavíz J. y Yáñez Arcibia A., 1992. Expansión urbana y deterioro ambiental en la región de la Laguna de Términos, Campeche. Programa de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), Universidad Autónoma de Campeche, a. p. 520, Campeche 24030 México.





Bonilha, L. E. & Asmus, M. L., 1993. Modelo Ecológico de Fitoplancton e Zooplancton no Estuario da Lagoa dos Patos, RS: Anais do III Simposio de Ecosistemas da Costa Brasileira; Serra Negra; SP.

Bruun, P., 1978. Stability of Tidal Inlets, Theory and Engineering. Development in Geotechnical Engineering, 23. Elsevier.

Bryan G. W., Ummerstone, L. G., 1978." Heavy metals in the burrowing bivalve *scobucularia plana* from contaminated and uncontaminated estuaries. J. Mar. Biol. Ass Uk 58: 401-419.

Campaña Oceanográfica SGM-3 PEMEX-UNAM, 1996.

Campañas Oceanográficas SGM-1 y SGM-2. PEMEX-UNAM, 1995.

Campbell P. G. C., A. Tessier and M. Bisson; 1985. Accumulation of copper and zinc in the yellow water lily, *nuphar variegatum*: Relationships to metal partitioning in the adjacent lake sediments, Can. J. Fish. Aquat. Sci. 42, 43.

Campbell, P. G. C., and A. Tessier, 1989; " Geochemistry and bioavilability of trace metals in sediments, In: Boudon A. and ribeyre, F: 1989. Aquatic Cotoxicology: fundamental concepts and methodologies; ed. Crc Press Inc. Boca Florida. Vol (1) Chapter 7: pp. 125-150.

Carranza-Edwards A., Rosales-Hoz L. y A. Monreal-Gómez, 1993. Suspended sediments in the southeastern Gulf of Mexico. Mar. Geol. 112: 257-269.

Carson R. L., 1980. El mar que nos rodea. ediciones Grijalbo, S. A. Barcelona, España p 278.

Castro F. R., León ventura R. Y Rodríguez Nieto R. Apuntes de Mecánica de fluidos. Facultad de Ingeniería, división de Ingeniería nesciencias de la Tierra , Depto. Explotación petrolera, UNAM.

Clementz, D. M. T. J. Pinnavaia and M. M. Mortland, " Stereochemistry of hydrated cooper (ii) lonson the interlamellar surface of layer silicates. An electron spin resonance study," J. Phys. Chem. 77:196-200 (1973).

CNA, 1998. Tabla de criterios de calidad del agua para usos y aprovechamiento. Comisión Nacional del Agua, México. Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 1998.



Comisión Nacional del Agua Potable y Alcantarillado del Estado. Subdirección de Operaciones (31-diciembre-1998).

Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal; Subgerencia de Administración del Agua, Unidad de Programación (31-diciembre-1998).

Copyright (1995-2002) by: ESS Environmental Software and Services GMBH Austria.

Cotles M. C. and Wiggert D. C. (1991). Mechanics of fluids. Editorial Prentice Hall.

Cunha, S.R. (1994) Modelo ecológico das marismas de *Spartina Alterniflora* Loisel. (Poeceae) do estuario da Lagoa dos Patos, R.S. Fundacao Universidade do Rio Grande Dissertacao de Mestrado, 105 pp.

Cruz Orozco J. W., V. M. Alba Cornejo, Machado Navarro A, 1989. Algunas consideraciones para el manejo ambiental de la zona costera de la Laguna de Términos, Campeche México. Revista de Investigación Científica, Vol. I n° 3; pags: 22-33.

Cruz Orozco R., Machado Navarro A. y Alba Cornejo V, M., 1989. Mineralogía y Distribución de los sedimentos de la Laguna de Términos, Campeche. Revista de Investigación Científica, Vol. I n° 3 pags: 16-21.

David, L. T. And B. Kjerfve (1998). "Tides and Currents in a Two-Intel Coastal Lagoon: Laguna de Términos, México". Continental Shelf Research 18 (10): 1057-1079.

De Kreuk, J. F., " Microbiological decontamination of excavated soil", J. W. Assink and W. J. Vaid Den Brink, eds. pp 669-678. Martinus Nijhoff (Dordrecht, the Nehrlands, 1986).

De Vitorica A. J. L., Romero L. F. y Vázquez V. F. (1983). Modelo hidrológico para el estudio de la Calidad del Agua en embalses. Instituto de Ingeniería, UNAM. Proy:3320.

Donisch, K. H., Jagnow and T. H. Anderson, "An ecological concept for the assessment of side-effects of agrochemicalson soil microorganims," Residue review 86:65-105 (1983).

Ecología de los ecosistemas costeros en el sur del Golfo de México: la región de la Laguna de Términos. Inst. Lsu. Editorial Universitaria, México d.f. p 518.



Elliott, H. A. and R. W. Peters, "Decontamination of metal-polluted soils using chelating agents," Removal of heavy metals from ground waters, Crc, Press, Inc., (Boca Ratón, Fl. in press).

EPOMEX (2001). Análisis de la Calidad Ambiental, usando indicadores hidrobiológicos y modelo hidrodinámico actualizado de la Laguna de Términos.  
Escoffier, F. F., 1940. The Stability of Tidal Inlets. Shore and Beach, 8: pp 114-115.

EPOMEX (1993). Estudio de declaratoria como área ecológica de protección de flora y fauna de la Laguna de Términos, Campeche. Campeche, México, EPOMEX. Informe técnico. 300 pp.

Espinal, J. C. 2002. TESIS DE MAESTRIA. "Caracterización de transporte de sedimentos en las bocas del Carmen y Puerto Real en Laguna de Términos, Campeche". División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM México.

Edmon, J. M., 1942. High precision determination of titration alkalinity and total carbon dioxide content of sea water by potentiometric titration. Deep-Sea res., 737-750.

Espinal G. J. C., Salles A. de A. P. y Govaere V. G., (2002). Caracterización hidrodinámica de la Laguna de Términos, Campeche. XVII Congreso Nacional de Hidráulica, Monterrey N. L., México. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Evans, L. J. "Chemistry of metal retention by soils," Environ. Sci. Technol. 23:1046-1056 (1989).

Fenchel, T., 1995. Factors Determining the Distribution Patterns of Mud Snails (hydrobiidae), Oecologia, 20: 1-17.

F. Mustard J. and Sen Avijit; " Integration of remote y sensed data and hydrodynamic modeling into a gis to assess the impacts of thermal effluent in an estuary"; Departament of Geological Sciences, Brown University, providence ri 02912.1997.

Förstner, U. and G. Miller, " Heavy metal accumulation in river sediments: a response to environmental pollution", Geoforum 14: 53-61 (1973).

Fred B. Phileger and Ayala Castañares A., 1971. Proceses and history of Términos Lagoon, Mexico. the American Association of Petroleum Geologists Bulletin vol. 5 n° 12 december 1971, p: 2130-2140.



GAIA Caso Venezuela (1998) Copyright CESIMO, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

García-Martínez y Rodríguez-Molina (1997). Hydro Track, User's Manual. Printed in Great Britain by Hobbs. The printers Ltd, Southampton. Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston.

Groundwater Strategies, Environ, Sci. Technol., 14:1030-1035 (1980).

Gutiérrez-Estrada M. y A. Castro del Río, 1988. Origen y desarrollo geológico de la Laguna de Términos, cap. 5: 89-110. In Yáñez-Arancibia A. y J. W. Day, Jr. (eds);

H., Lauff g., "Estuaries", Publicación 83, 1967. pags: 3-18.

Haan, F. A. M. and W. M. Van Riemsdijk, " Behaviour of inorganic contaminants in soil, " In contaminated soil, J. W. Assink and W. J. Van Den Brink, eds pp. 19-32. Martinus Nijhoff Publishers, (Dordrecht, 1986).

Hall, C. A. S. & Day Jr. J. W., 1977. Ecosystem Modelling In Theory and Practice: An Introduction with case Histories; Wiley Interscience; New York; 6-35.

Hewitt, C. N.; 1992. Methods of environmental data analysis. Institute of Environmental and Biological Science, London and New York.

Instituto Mexicano del Petróleo, 1980. Informe de los trabajos realizados para el control del pozo Ixtoc q, el combate del derrame de petróleo y determinación de sus efectos sobre el ambiente marino. Programa coordinado de estudios ecológicos en la sonda de Campeche, Secretaría de Marina Departamento de Pesca-Petróleos Mexicanos, ed. I.M.P. Subdirección de Desarrollo Profesional. División Editorial p: 1-242.

Instituto Mexicano del Petróleo; 1995. Evaluación de las principales corrientes de aceite crudo de la región marina de PEMEX-Exploración y Producción, eob-8789.2. Subdirección General de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Transformación Industrial. Gerencia de Tecnología de Procesos. División de Procesos de Petróleo. Septiembre de 1995.

J. Neves, Ramiro; Dispersao de poluentes no sistema Acuático. Dept de eng<sup>a</sup>. Mecânica do IST.

Kester, D. R., 1975. Dissolved gases other than CO<sub>2</sub> In: Chemical oceanography (eds. Riley, P. J. Ad Skirrow, G. J. 498-556p). Academic Press. Great Britain.



Ketchum, B. H, J. C., Ayres y R. F. Vaccaro, 1952. Process Contributing to the decrease of coliform bacteria in a tidal estuarine. *Ecology*: 33:247-258.

Kjerve B., Magill K. E. y Sneed J. E. ; 1988. Modeling of circulation and dispersion in Terminos Lagoon, cap 6: 11-130. In: Yañez-Arancibia A. y J. W. Day, Jr (eds). *Ecología de los ecosistemas costeros en el sur del Golfo de México: la región de la Laguna de Términos* . Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. Lsu. editorial universitaria, México D.F. p: 518.

Ku, Y. and R. W. Peters, "The effect of weakchelating agents on the removal of heavy metals by precipitation processes," *Environ. Prog.*, 5:147-153 (1986).

Liu, C. I. and H. X. Tang, "Chemical studies of aquatic pollution by heavy metals in china," In *Environ. Inor. Chemistry*, J. K. Irgolic and A. E. Martell, eds, 359 pp vch Publishes, (1985).

Liu, J. Y., H. X. Tang and G. Muller, "Unesco mab. cooperative ecological research projet on heavy metal pollution and its ecological effects," *J. Environ. Sci. (China)* 4:4-13 (1992).

Lizarraga Partida M. L. y Bianchi A., 1988. Dinámica y caracterización de las bacterias heterótrofas en la Laguna de Términos. Cap. 15: 259-273. In Yáñez Arancibia, A y J. W. Day Jr. (eds) *Ecología de los ecosistemas costeros en el sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Coast. Ecol. Inst. Lsu. Editorial universitaria, México D. F., pag: 518.

Lizarraga Partida M. L., Porras Aguirre J. y Izquierdo Vicuña F., 1982. Tasa bacteriana hidrocarbonoclástica/heterótrofas como índice de impacto ambiental por petróleo crudo en la sonda de Campeche. proyecto UNAM-CONACyT, POMANAL 800779. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Trabajo presentado en el simposio internacional Ixtoc I, México, junio 2-5 de 1982.

Lizarraga Partida M., 1982. Distribución cuantitativa de bacterias heterótrofas en una laguna costera tropical. *Memorias del 1er coloquio de bacteriología marina*, Marsella Francia, 17-19 mayo, 1982. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Mancilla Peraza M. y Vargas Flores M. "Los primeros estudios sobre la circulación y el flujo neto de agua a través de la Laguna de Términos, Campeche". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM*, 1980. Tomo 7(2):1-12.





Mantilla M., Salles A. de A. P., Espinal G. J. y Silva R., (2002). Interacción oleaje-corriente en la Boca de Puerto Real de la Laguna de Términos, Campeche. XVII Congreso Nacional de Hidráulica, Monterrey N. L., México. Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería, UNAM.

Lyman, J. Y K. H. Fleming, 1940. Composition of sea water. J. Mar Res. 3: 134-136.

Mantovanelli, A. (1995). modelo ecológico de um comedorde depósito infaunal da macrofauna bentonica das enseadas rasas do estuario da lagoa dos Patos, (RS, Brasil). Fundacao Universidade do Rio Grande, Tese de Mestrado, 146 pp.

Marina, S. D. (2001). Tablas de Mareas, Golfo de México y Mar Caribe, Dirección general de Oceanografía Naval.

McBride, M. B. and M. M. Mortland, "Copper (ii) interactions with montmorillonite: evidence from physical methods," Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38:408-415 (1974).

Meyer, J. F. C. A., 1992. Biomatemática: Um Jeito Ver Ecología; V Semana Nacional de Oceanografía; documento interno; Rio Grande. P: 141.

Millero, F. J. 1979. the thermodynamics of the carbonates system in sea water at atmospheric pressure. Geochim. Cosmochim. Acta, 43:1651-1661.

Millero, F. J., 1981. the ionization of acids in estuae water. Geochim. Cosmochim. Acta 45: 2085-2090.

Mooney, R. W. A. G. Keenan and L. A. Wood, "Adsorption of water vapor by montmorillonite. I. Heat of desorption and application of bet theory," J. Am. Chem. Soc. 74:1367-1374 (1952).

Norton., W. R., King, I. P. And Orlob, G. T. 1973. "A Finite Element Model for Lower Granite Reservoir". Report prepared by Water Resources Engineers, Walnut Creeke, California, for U.S. Army Corps of Engineers, Walla Washington.

Nriagu, J. O. ed. "Changing metal cycle and human health", p. 445. Dalilem Konferenzen Springer-Verlag, (Berlín, 1984).

Peters, R. W. and Y. Ku, "The efect of tartrate, a weak complexing agent, on the removal of heavy metals by sulfide and hydroxide precipitation," Particulate Sci. Technol. 6:421-439 (1988).





Pinto C R. M. (2201) Modelos Matemáticos aplicados a Ecología. Université de Montréal, Udm, Montreal, Québec. Dépt. Sciences Bbiologiques.

Poinsignon, C., J. M. Cases and J. J. Fripiat," Electrical-polarization of water molecules adsorbed by smectites. an infrared study," J. Phys. Chem. 82:1855-1860 (1978).

Pratt, D., 1974. Salt requeriments for growth and function of marine bacteria 3-15. In: R.R. Colwell y R. Y. Morita (Eds). Effect of the Ocean Environment on Microbial Activities. University Park Press, Baltimore-Londres-tokio, 587p.

Riley, J. P. Y R. Chester, 1973. Introduction of marine chemistry Academic Press Inc. B, 446p.

Roberson and T. Crowe C. (1997). Engineering fluid Mechanics. 6 edition. Edit. John Wiley and Sons, Inc. Canadá.

Rodríguez S. H. y Romero Jareiro J. " Niveles de contaminación bacteriana en dos sistemas fluvio-lagunares asociados a Laguna de Términos, Campeche". Anales de Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM 1981. Tomo 8(1): 63-68.

Rodríguez S. H. y V. Botello A. " Resistencia múltiple a antibióticos en escherichia coli aislada en la Laguna de Términos, Campeche", anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, 1988. Tomo 15(2): 105-110.

Röling, N.G. (1994) Platforms dos decision making about eco-systems. In: The future of the land. Ed. L. Fresco, L. Chichester: John Wiley.

Romero Jareiro J. y Rodríguez Santiago H., 1982. Niveles actuales de contaminación coliforme en el Sistema Lagunar del Carmen-Machona, Tabasco.

Romero Jareiro J., Ferrara Guerrero M., Lizarraga Partida L. y Rodríguez Santiago H., 1986. Variación estacional de las poblaciones enterobacterias en la Laguna de Términos, Campeche México. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, tomo 13(3), pags: 73-86.

Salles, P. & Bredeweg, B. (1997) Building Qualitative Models in Ecology. In Ironi, L. (ed.) Proceedings of the 11<sup>th</sup> international Workshop on Qualitative Reasoning (QR'97). Insituto di analisi Numerica C.N.R., Pubblicazioni no. 1036, Pavia, Italy.

Salles, P. & Bredeweg, B.; Araujo, S. & Neto W. (2002) Qualitative Models of Interactions Between Two Populations, In Agell, N. & Ortega, J.A. (eds)



Proceedings of the 16<sup>th</sup>. International Workshop on qualitative Reasoning (QR'02), Sitges, Barcelona, Spain.

Salles, P. D. (2001) Hydrodynamic Controls on Multiple Tidal Inlet Persistence. MIT/WHOI Joint Program in Applied Ocean Sciences and Engineering, Massachusetts Institute of Technology / Woods Hole Oceanographic Institution: 272 pp.

Salles, P.S.B.A. (2000) Modelos qualitativos para simulaciones e geracao automática de explicaciones. Trabajo presentado no Simposio Modelos de Sistemas Biológicos: ferramentas para ensino e pesquisa. Anais da 52<sup>a</sup> Reuniao Anual da SBPC, Brasilia, Julho de 2000.

Salles, P., 2000. Hydrodynamic Controls on Multiple Tidal Inlet Persistence. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology / Woods Hole Oceanographic Institution.

Salles, P., Silva, R. y Espinal J., (2002). Waves in Inlets, Engineering Institute, National Autonomous University of Mexico, México D. F.

Sánchez Bribiesca J. L. Y Fuentes Mariles O. A. (1992). Problemas de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Instituto de Ingeniería, UNAM. N°- 33.

Santamaría Pinto B. E., 1992. Estudio bacteriológico del área costera de la bahía de Campeche durante 1990 a 1992. Secretaría de Marina, Dirección General de Oceanografía Naval. Estación de Investigación Oceanográfica de Campeche, calle 59 25-a Centro. cp 24000. Campeche Camp., México.

Secretaría de Desarrollo Social del Gobierno del Estado, 31 de diciembre de 1998. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos y Recursos Naturales, Delegación del Estado. Subdelegación del Medio Ambiente (31-diciembre-1998).

Secretaría de Marina. Dirección General de Oceanografía Naval México Costa Este. "Laguna de Términos y proximidades". De levantamientos efectuados en 1978 por la Dirección de Hidrología de la D.G.O. profundidades en metros. Esc. 1:60000.

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1976). Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. "Carta Forestal Ciudad del Carmen". Esc. 1:250 000.

Secretaría de Marina. Dirección General de Oceanografía Naval México Costa Este. "Laguna de Términos entrada oeste". De levantamientos efectuados en 1993



y 1994 por la Dirección de Hidrología de la D.G.O.N. Sondeos en metros. Esc. 1:25000.

S.R.H., 1976. Estudio de la calidad del agua en la Laguna de Términos, Campeche. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Planeación. Dirección Control de la Contaminación del Agua. Contrato ATECMAR, S. A. N° SP-75-C-1.

Standard Methods for the examination of water and wastewater, edition 17. 1992. Steven G. Donald, Paul Daniels J. M. Hill John and W. Day J Jr; A preliminary model of the circulation of Laguna de Terminos, Campeche, Mexico. Stituto de Ciencais del Mar y Limnología, UNAM, Anales del Instituto tomo 8 pag: 51-62.

Swartzman, G. L., 1987. Ecological simulation primer, Macmillan Pub. Co; NY; 370p.

Ulrech Förstner, "Departement of Environmental and Engineering. Technical University Hamburg-Hamburg d-210hamburg 90. Alemania.

V. Botello, A., 1978. Variación de los parámetros hidrológicos en las épocas de sequía y lluvias (mayo y noviembre de 1974) en la Laguna de Términos, Campeche México. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Vol. 5(1), pags; 159-178.

Vázquez Botello V. A., Ponce Vélez G., Toledo A., Díaz González, G. y Villanueva S., 1981. Ecología, Recursos Costeros y Contaminación en el Golfo de México, revista de Ciencia y Desarrollo, Vol, XVII, número 102, pag: 28-48.

Vázquez Gutiérrez F. D. M. E., J. E. C. Aguayo and B. A. " Trace metal species in aquatic samples of the Tabasco lagoons, Mexico" Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. ei 9511-362 m (Received 7 november 1995; accepted 16 febraury 1996). Environment International, vol 22 n° 3, pp 377-382, 1996.

Vázquez Gutiérrez F., Dorantes Velásquez H., Alexander Valdés H. y Frausto Castillo A., 1988. Estudio hidrológico de las aguas costeras, frente a las bocas de la Laguna de Términos, Campeche. en dos épocas climáticas diferentes, parte I. Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. Vol. 15(2), pags: 183-194.

Vázquez G. F., Velásquez D. H. Y Valdés A. H., 1988.El sistema de dióxido de carbono en la Laguna de Términos. In: Yáñez-Arancibia. A and J. W. Day7 Jr. (Eds) Ecology of coastal ecosystems in the Southem Gulf of Mexico; the Terminos Lagoon Region. Inst. Cienc. Del Mar y Limnol. UNAM, Coast Ecol. Inst. LSU.



Wood J. M. and H. K. Wang, "Microbial resistance to heavy metals", *Environ. Sci. Technol.* 17:582a-590a (1983).

Yáñez A., 1963. Batimetría, salinidad, temperatura y distribución de los sedimentos recientes de la Laguna de Términos, Campeche México. Instituto de Geología, UNAM, Vol. n. 67 pt. 1, 47 p.

Yáñez Arancibia A. y Lara Domínguez A., 1983. Dinámica ambiental de la boca de Estero Pargo y estructura de sus comunidades de peces en cambios estacionales y ciclos de 24 horas (Laguna de Términos, sur del Golfo de México). *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.* Vol. 10(1). pags: 85-116.

Yáñez Arancibia y Lara Domínguez, "Dinámica ambiental y comunidades de peces en estero pargo, de la Laguna de Términos, Campeche"; *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.*

Yáñez Arancibia A., Lara Domínguez A. L., Chavance Pierre and Flores Domínguez D. "Environmental behavior of Terminos Lagoon Ecological System, Campeche, Mexico". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM,* 1983. Tomo 10(1):137-176.

ZoBell, C.E., 1936. Bactericidal action of sea water. *Proc. Soc. Exper. Biol. And Medicinae,* 34(2): 10-25.

**A N E X O S**



## ANEXO A

En la tabla A.1 se presentan los resultados obtenidos en campo.

**Tabla A.1. Resultados obtenidos en campo.**

Nº MUESTRA	TIPO MUESTRA	pH	CONDUC *100 (MS)	SALINIDAD ‰	TEMP °C
1	S	9	338	30.5	26
2	S	8.8	210	18	16
3	S	9	340	28	25
4	S	8.9	340	31.5	26
5	S	9.7	285	25	24
6	S	8.9	370	34	25
7	S	9.1	ND	ND	26
8	S	8.9	110	9	29
9	S	8.7	210	19	27
10	S	8.6	265	25	25
11	S	8.6	328	30	26
12	S	8.5	400	36.5	25
13	S	8.5	390	36.5	25
14	S	8.6	350	36	26
15	S	8.9	410	40	26
16	S	9.2	400	38	26
17	S	9	350	33	25
18	S	8.7	370	34	25
19	S	8.7	320	28.5	26
20	S	8.6	370	32.5	27

S= superficial

ND= No determinado

### pH

El potencial de Hidrógeno medido en el sitio de estudio (Figura A.1), se encuentra entre 8.5 y 9.7 unidades de pH, lo cual concuerda con V. Botello (1978), lo que puede ser resultado de las grandes concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  en los sedimentos que arrastran los ríos que desembocan en la Laguna de Términos (V. Botello, 1978).

Estas mediciones de pH son homogéneas en todos los puntos de muestreo en la Laguna de Términos, siendo el más alto en el punto P5 (con 7 unidades de pH), ubicado en la descarga del Río Chumpan y la lectura más baja en los puntos P12 y P13 (con valores de 8.5 unidades de pH cada uno), ubicados en las orillas de la Isla, donde se ubican las descargas de aguas residuales del mercado de mariscos y el rastro.





---

Pero el Río Candelaria tiene una mayor influencia, porque en su recorrido atraviesa parte de la plataforma carbonatada, donde se encuentra el Estado de Yucatán y Campeche.

Es importante mencionar que los cambios de pH son motivados principalmente por el aporte fluvial transportado a través de las bocas así como por la salinidad, temperatura y el contenido de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Vázquez, 1988). El aumento observado en las mediciones de pH, probablemente se deba al cambio que sufre el dióxido de carbono motivado por los procesos biológicos (Vázquez, 1988) y los físicos de la atmósfera (Vázquez, 1988).

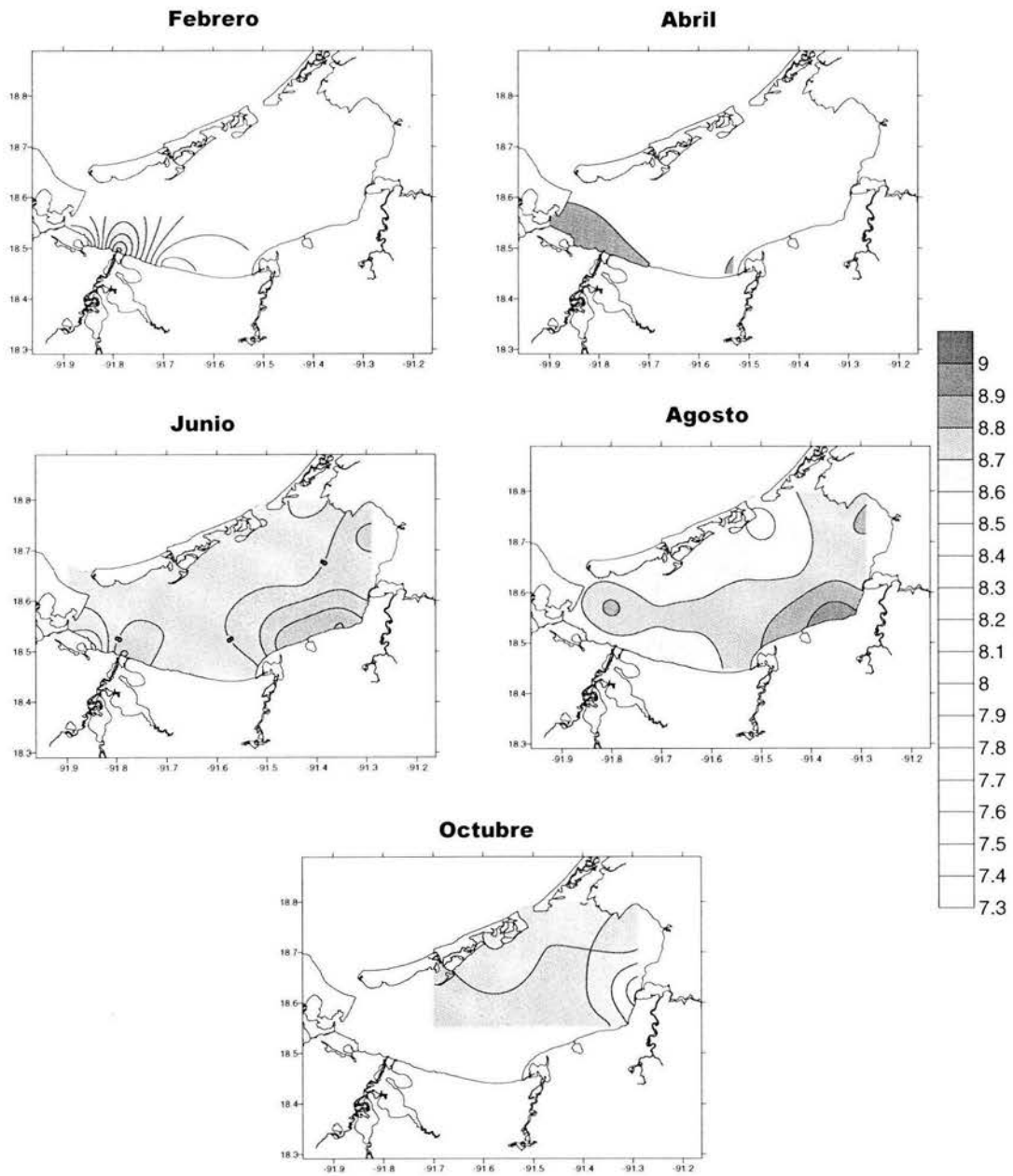


Figura A.1. Presentación de los valores obtenidos para pH en la Laguna de Términos, realizadas en surferd.



## TEMPERATURA

La temperatura se encuentra entre los 25 y 29°C, que es el rango común de calentamiento de las aguas y estuarios costeros.

Cabe mencionar, que no se encontraron descargas con temperaturas mayores a las que permite la norma para descargas de aguas residuales. La más crítica fue la del Rastro, que pertenece al punto 20, y se obtuvo una temperatura de 27°C.

En el punto 2 se determinó una lectura de 16°C, que es causa del gran cauce del Río Candelaria.

En general, la temperatura del agua se mantuvo uniforme con una ligera estratificación térmica, excepto en el sector Este en un área de circulación aparentemente pobre, como lo comenta V. Botello (1978).

La representación de los datos obtenidos se presentan en la figura A.2.

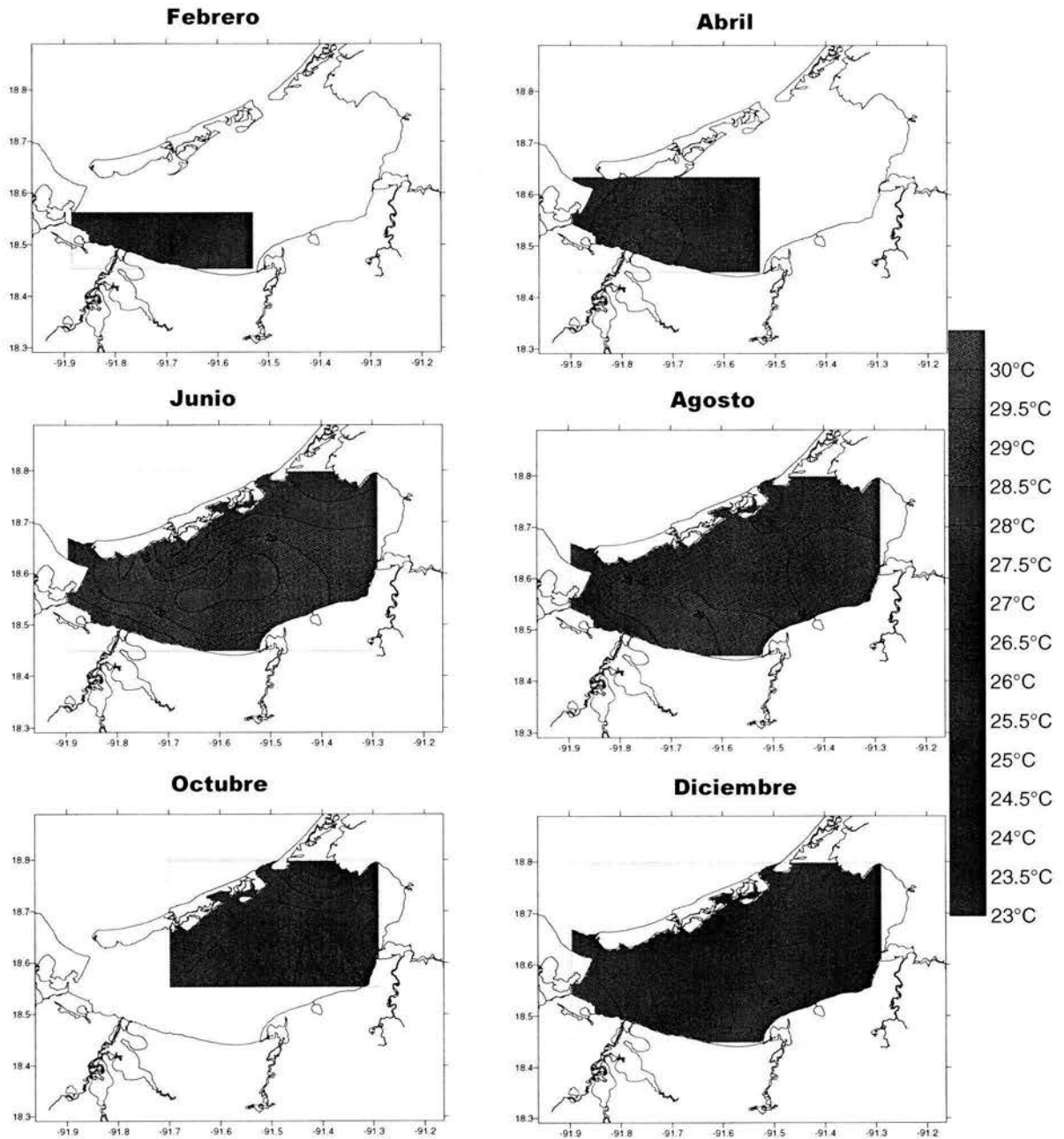


Figura A.2. Representación de los valores de temperatura realizados en surfed.



---

---

## SALINIDAD

Las concentraciones de la salinidad si variaron considerablemente, sobre todo en las descargas de los ríos. En el punto P1, se encontró una concentración de  $30.5^{0/00}$  y hacia el punto P2, ubicado en la descarga del Río Candelaria, se obtuvo una concentración de  $16^{0/00}$ , lo cual quiere decir que la descarga del río diluye la concentración de la salinidad, sin embargo, el pH, se encontró solo 0.2 unidades por debajo de la lectura del punto P1 (9 Unidades de pH).

Hacia los puntos P3 y P4 hubo un aumento en las concentraciones, con lecturas de 28 y  $31.5^{0/00}$ , lo cual puede deberse al gran asolvamiento que hay por la descarga del Río Candelaria, así como la poca profundidad que se encuentra en esa zona, causada por los sedimentos.

En la descarga del Río Chumpán, hubo lecturas más homogéneas, ya que se obtuvo una concentración de  $25^{0/00}$  de salinidad y hacia el punto 6 aumentó a  $34^{0/00}$ . Cabe mencionar que la profundidad en esta zona es menor, y esto puede influenciar la concentración (es) de los puntos que se encuentran a sus alrededores.

Los puntos P18 y P19 que se localizan en el centro del cuerpo de agua, mantienen lecturas de 34 y  $28.5^{0/00}$ , lo que puede dar la idea de la influencia de los dos ríos (Candelaria y Chumpán) es considerable, así como se observa en las determinaciones de los SST.

En el punto P7, que corresponde a la descarga del Río Palizada, no se obtuvieron lecturas de salinidad reportándose como ND (No Determinado), debido al gran cauce que descarga el río. Sin embargo conforme se fueron alejando los puntos de muestreo aparecieron lecturas de la concentración de salinidad. En el punto 8, que se ubica considerablemente cerca, se obtuvo una concentración de  $9^{0/00}$ , y se incrementó la concentración hasta  $19^{0/00}$ , que corresponde a la descarga del Sistema Lagunar Pom-Atasta.

De los puntos P10 al P12, la concentración estuvo entre 25 y  $36.5^{0/00}$ , porque son puntos que se encuentran ubicados en la Boca del Carmen. Los puntos P13 y P14 que están ubicados en las orillas de la ciudad, tuvieron concentraciones de 36.5 y  $36^{0/00}$  respectivamente, lo cual puede deberse a la influencia de la corriente que viene de la Boca de Puerto Real, donde se obtuvieron las mayores concentraciones de salinidad; para el punto P15 (ubicado en la boca), la



ANEXO A

---

concentración fue de 40<sup>0</sup>/<sub>00</sub> y el punto 16 de 38<sup>0</sup>/<sub>00</sub>. Estos datos son similares a los obtenidos por V. Botello en 1978.

El general, se puede decir que los valores de la salinidad se extienden hacia la Boca del Carmen. También es importante decir que ésta decrece de la Isla hacia tierra firme, presentándose valores intermedios en la parte central de la Laguna y algunos valores pequeños en la descarga de los ríos, similares a los de V. Botello (1978).

Es importante comentar, que los cambios de la salinidad se encuentran asociados principalmente a las características atmosféricas (Vázquez, 1988) y a los aportes fluviales transportados a través de las bocas de la Laguna de Términos, siendo una influencia en la disminución de la salinidad (Vázquez, 1988).

Los datos que se obtuvieron en campo para la determinación de la salinidad, se presentan en la figura A.3.





ANEXO A

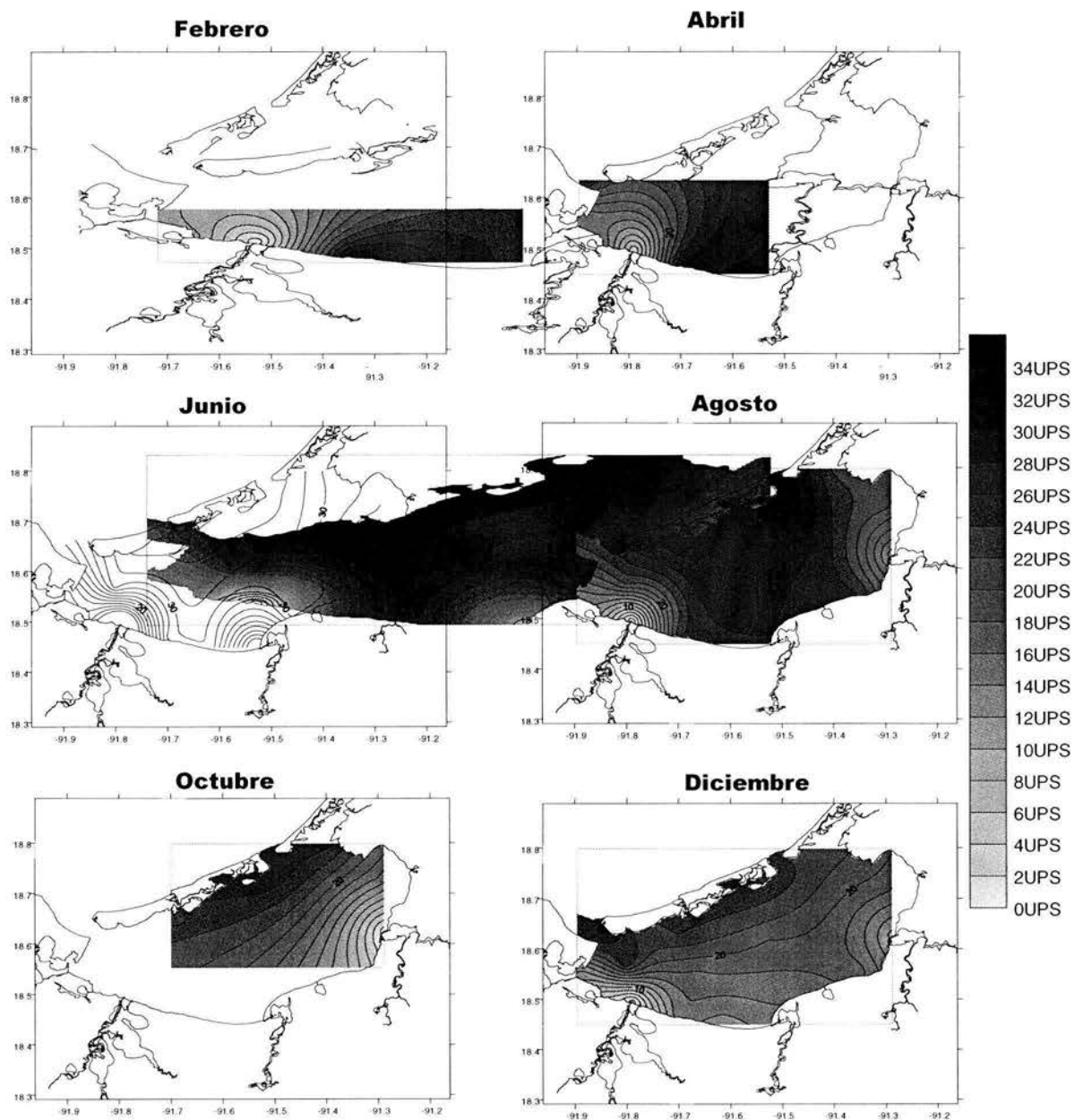


Figura A.3. Representación de la salinidad en la Laguna de Términos, realizadas en surferd.



## **ANEXO B**

### **SEDIMENTOS**

La dispersión de los sedimentos es fácil si se considera que está constituido únicamente de material del tamaño de los granos de arena, debido a que éstos están bien definidos y no son sujetos a procesos de coagulación, por lo que se asientan a través de una suspensión sin tener en cuenta a los demás granos presentes (Gripenberg, 1938).

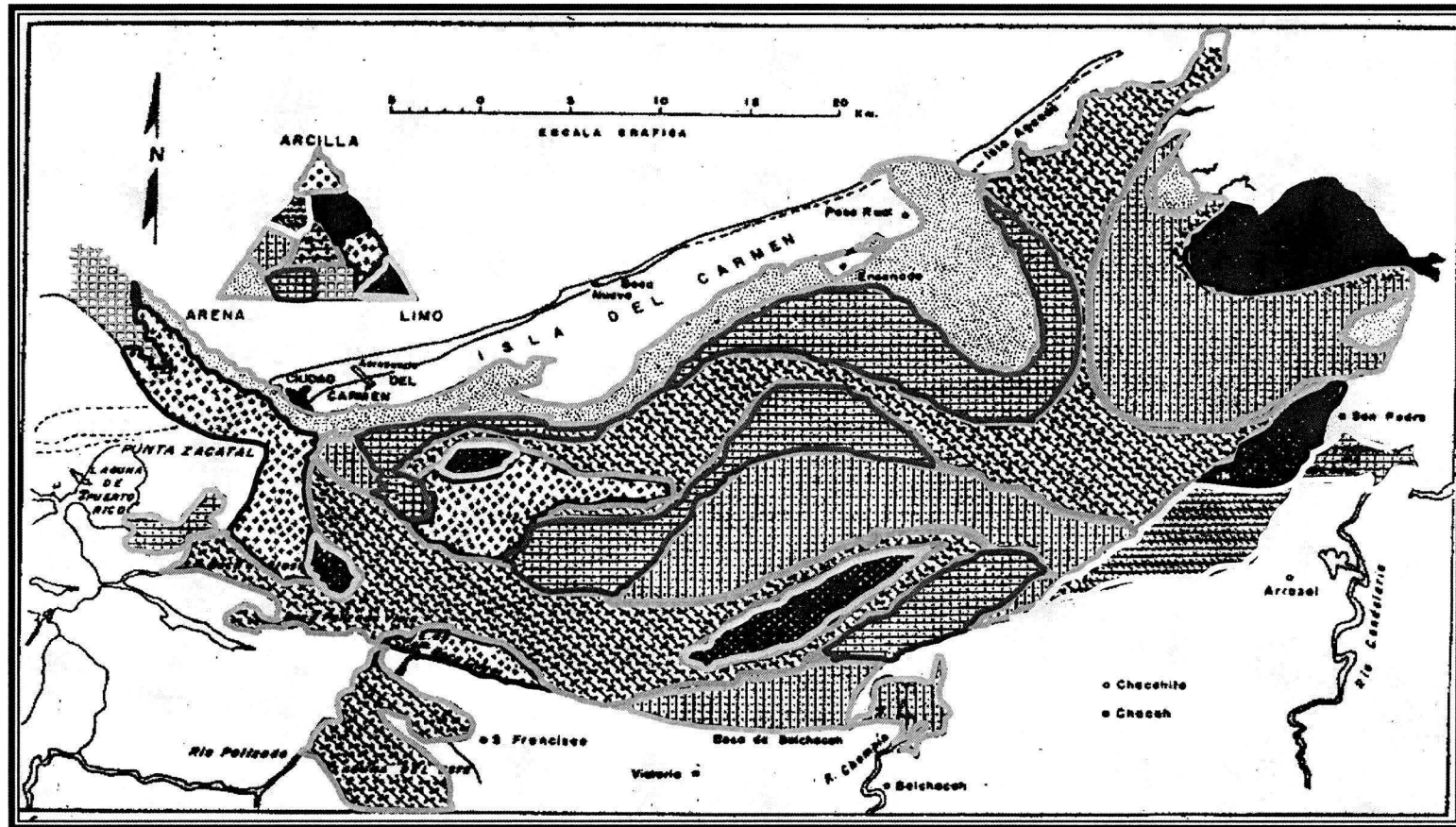
Sin embargo, las partículas más pequeñas llegan a hacer muy difícil dicha tarea. Por ejemplo, si un grano de arena es subdividido en granos más pequeños por desintegración mecánica o por intemperismo, en las partes individuales del grano original se producen nuevos y graduales cambios de propiedades conforme se hacen más pequeños (Yáñez, 1963).

Por otra parte, se conoce perfectamente que el comportamiento de las suspensiones finamente granulares, se asemejan muchísimo al de las soluciones coloidales. Además, en la mayoría de los sedimentos recientes siempre se tiene una mayor o menor cantidad de material coloidal, por lo que el éxito de tratamiento preliminar depende de cómo se trate el material (Yáñez, 1963).

Se sabe también que las partículas finas en suspensión llevan carga eléctrica (comúnmente carga negativa) y se cree que tienen un comportamiento similar a la de las partículas coloidales, por lo que cada partícula es rodeada por una doble capa de iones, una interior de iones negativos firmemente adherida a la superficie por la acción de la valencia residual y la correspondiente capa exterior adherida por atracción electrostática.

Una partícula incluye además de la capa interior y exterior de iones, el agua que forma la hidratación. Es por eso que hoy se reconoce de una manera general que el estado de coagulación de una suspensión depende de la naturaleza de iones absorbidos y de la interacción de esos iones con aquellos del agente dispersante (Yáñez, 1963).

La figura 1B es el resultado de la distribución granulométrica de los sedimentos.



Yáñez, 1963.

Figura 1B. Mapa de distribución granulométrica de los sedimentos, según el triángulo de Shepard y Moore (1955). Tomado por Yáñez (1963).



El contenido de carbonato de calcio en sedimentos se realizó aplicando el método de pérdida de peso de  $\text{CO}_2$  a través de un alcalímetro de Shroetter. Los resultados se muestran en la figura 2B, en donde se distinguen ciertas áreas de máximos y mínimos porcentajes (Yáñez, 1963).

El área de máximo porcentaje parece ser el resultado del gran aporte de material carbonatado de origen marino, acarreado por las fuertes corrientes rectilíneas clásicas de mareas a través del canal de Paso Real, hacia el interior de la laguna en donde es distribuido y depositado.

Los sedimentos acarreados por el Río Candelaria, cuyo contenido  $\text{CaCO}_3$  es el más alto en relación con los demás sedimentos aportados por los ríos restantes a la laguna, regulan en carácter químico de los sedimentos de la parte oriental de la misma, observándose en la estructura interna de los sedimentos bandeamientos y laminaciones con intercalaciones de pequeños estratos presentando colores claros fuertemente carbonatados, así como pequeños estratos de colores oscuros que reflejan la potencialidad de la productividad orgánica (Yáñez, 1963).





ANEXO B

A partir del área de máximo porcentaje, la distribución se observa bandeada y casi paralela a sus límites, teniendo una constante disminución en el contenido de  $\text{CaCO}_3$  (Yáñez, 1963).

También se observa que las áreas con abundancia de 40-50% y 50-60% de  $\text{CaCO}_3$ , refleja indirectamente la intensidad y alcance de la transportación eólica sufrida por los sedimentos carbonatados (principalmente en conchas y fracciones de conchas) de la barra de arena o Isla del Carmen hacia el interior de la Laguna.

En el área comprendida de la Boca de Atasta, Boca Palizada Vieja y Boca Chica, se observa que los valores del contenido de  $\text{CaCO}_3$  casi siempre son menores a 20%, debido a que en esa área existe constantemente una apreciable intensidad de las corrientes derivadas de los ríos (Yáñez, 1963) (Figura 3B).

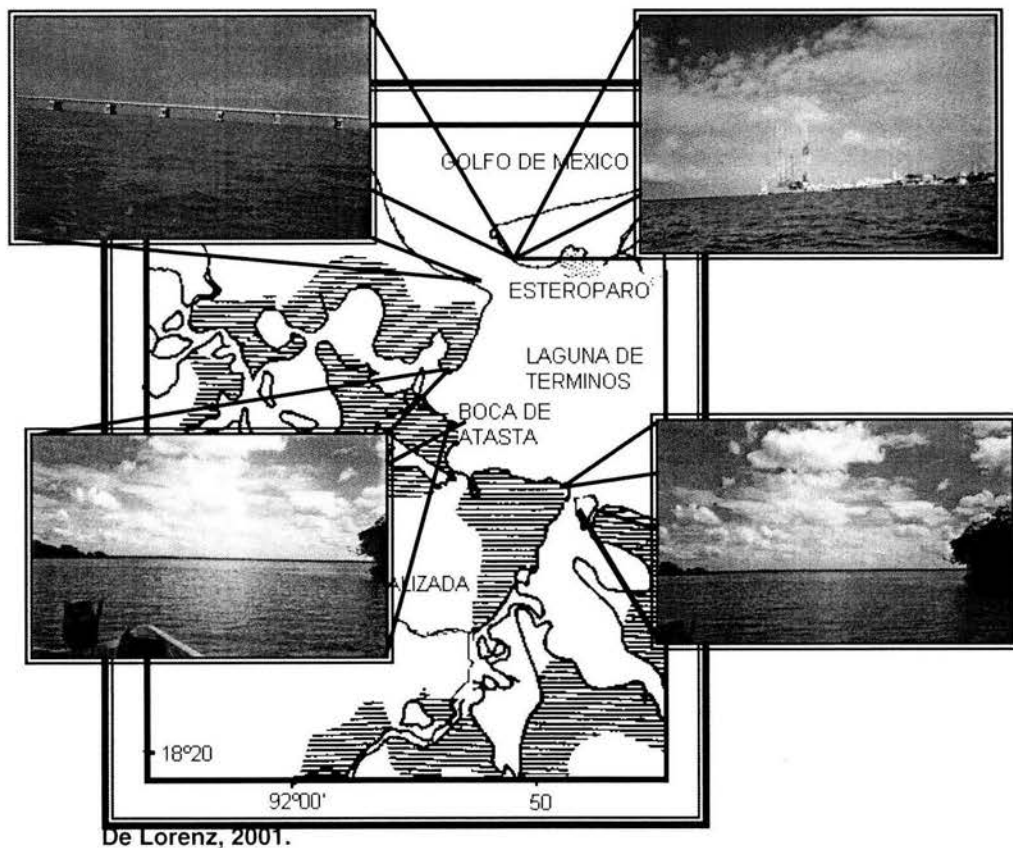


Figura 3B. Bocas de los Ríos Palizada Vieja, Atasta y Chica.