

GB1356

S 78

SECRETARIA DE MARINA
DIRECCION GENERAL DE OBRAS MARITIMAS

OBRAS DE INFRAESTRUCTURA EN
LA COSTA DEL NORESTE

DEPARTAMENTO DE PLANEACION Y PROGRAMAS

SECRETARIA DE MARINA
DIRECCION GENERAL DE OBRAS MARITIMAS
DESARROLLO ECONOMICO DE LA COSTA DEL
NORESTE

S I N O P S I S

LIBRO PRIMERO

Estudio Regional de la Laguna Madre de
Tamaulipas.

Estudio Preliminar para la Rehabilitación
de la Laguna Madre de Tamaulipas.

LIBRO SEGUNDO

Canal Intracostero del Golfo (Sección Norte)

LIBRO TERCERO

Informe relativo al Establecimiento del Puerto
del Noreste.

LIBRO CUARTO

Establecimiento de un Puerto de Refugio en la
Desembocadura del Río Soto la Marina.



SECRETARIA DE MARINA
UNIDAD DE HISTORIA
Y CULTURA NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL

OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

SINOPSIS

La costa de Tamaulipas queda comprendida entre los ríos Pánuco y Bravo, con un desarrollo de poco más de 400 Km. Para fines prácticos en este Estudio, más que costa de Tamaulipas se considera a la costa de la porción norte del Golfo de México (de la parte mexicana), pero todavía más, se considera a una región estructurada por la geografía, geología y economía. Sin embargo dentro de esta región queda comprendido íntegramente el estado de Tamaulipas; quedan comprendidas también porciones de los estados de Veracruz, S.L. Potosí (Huastecas) y Nuevo León que desde siempre han estado relacionadas entre sí económicamente, pero para definir una región es necesario recurrir, entre otras, a la geología; --- pues los procesos geológicos y el clima determinan el paisaje. -- Los procesos geológicos junto con los fenómenos meteorológicos -- forman la orografía, hidrografía y clima, o sea la geografía física y humana.

A toda la región que se está considerando, desde el punto de vista de la geografía se le llama el Noreste; atendiendo a la geología, provincias geomorfológicas, se le llama planicie costera Nor-oriental, limitada al sur por el extremo oriental de la cordillera neo-volcánica, al Oeste por la sierra Madre Oriental, al Norte por el Río Bravo y al Este por el Golfo de México. La -- planicie costera Nor-oriental como toda la planicie costera del -- Golfo se formó en los períodos geológicos mioceno y plioceno. Esta planicie costera es angosta en el sur, menos de 100 kilómetros, y en el norte más de 300 Km. de anchura. Las porciones que forman la planicie no son homogéneas en el aspecto social, pero sí complementarias en el económico. La hidrografía y clima son diferen-

tes en el Norte y en el Sur.

En el Sur el clima es caluroso y húmedo; el área está cruzada por varios ríos: Nautla, Tecolutla, Cazonas, Tuxpan y el Pánuco y sus afluentes. La precipitación pluvial es de más de 1,000 milímetros por año, originando escurrimientos del orden de 50,000 millones de metros cúbicos anuales. En el norte el clima es caluroso, seco y extremoso; aunque existen más ríos estos son de poco caudal; los principales son, además del Bravo: San Juan, San Fernando, Soto la Marina, Tamesí y otros de menor importancia. La precipitación está abajo de los 1,000 milímetros anuales, siendo la menor 200 mm. en los límites de Nuevo León y Coahuila.

En la planicie costera los recursos naturales agua y tierras están mal distribuidos, pues mientras en el sur las lluvias son abundantes y las tierras son de las mejores (tipo pradera), la topografía del terreno no se presta para aprovechar el agua en regar grandes extensiones, por ser terreno de lomerío en su mayor parte; en la porción norte existen grandes extensiones de terreno plano, pero el agua es escasa. Sin embargo es allí donde se cuenta con varios sistemas de riego, siendo los principales el del Río San Juan y Bajo Río Bravo con una superficie conjunta de más de 200,000 Ha.

Siendo el agua y los suelos los recursos naturales más valiosos, pero estando mal distribuidos, se dificulta el desarrollo de la planicie costera Nor-oriental. La geología y los fenómenos meteorológicos imponen la ecología y ponen de manifiesto que las distintas áreas no pueden valerse por sí mismas para explotar y aprovechar sus recursos naturales; además de que no cuentan con todos esos recursos. Las deficiencias de unas se suplen con las excedencias de otras, pero para eso se necesita llegar a la unidad

que facilite el progreso para elevar el nivel de vida de la comunidad.

Para alcanzar la unidad dos elementos son clave: electrificación y comunicaciones. Sin estos no hay vida civilizada, ni -- hay progreso.

Así, en la planicie costera Nor-oriental nos encontramos ante un panorama de recursos no explotados debidamente, a pesar de contar con ríos para riego y generación de energía eléctrica, buenas tierras para desarrollar la agricultura, ganadería y silvicultura; petróleo y gas; distintos materiales minerales entre los que se cuentan: mercurio, asbesto, caolín, calizas y otros.

Por otra parte, hace falta la acción unificada para aprovechar estos recursos en beneficio de la comunidad. Antes de la acción está el plan, y para formular el plan se necesita, entre ---- otras cosas, hacer la diagnosis, la que para fines de desarrollo - regional está basada en que existen relaciones entre el ambiente, los recursos naturales y los habitantes; aunque estas relaciones - no son fáciles de determinar son las que condicionan el medio para su desarrollo, es decir que cada región tiene su modo especial de desarrollarse o de estancarse.

Son tantos los recursos y tantas las necesidades que es terriblemente complejo el plan que se necesita para dinamizar esta rica región.

En el presente Estudio sólo se toca un aspecto del problema, el litoral de Tamaulipas. Es que el litoral comprendido entre los ríos Pánuco y Bravo juega un papel importante en el desarrollo de la planicie costera Nor-oriental y que en el presente - afronta una situación, si no crítica, si difícil por las modificaciones que ha sufrido el litoral. Hace algún tiempo que desapareció la relación mar-laguna-ríos que es la que condiciona el medio

para que se desarrollen la flora y la fauna en las lagunas y esteros así como las actividades humanas relacionadas con los recursos naturales del litoral.

Actualmente el litoral de Tamaulipas al no haber actividad relacionada con el mar es como si no existiera (el litoral) y se dijera que la planicie costera Nor-oriental, al oriente colinda con la nada.

La unidad y continuidad de la zona deja de existir cuando las lagunas costeras ya no se comunican con el mar, desaparece la pesca primero, luego se secan los vasos convirtiéndose en desiertos en los que no existe ni flora ni fauna, cambian las relaciones del hombre con el medio.

En este Estudio no se pretende iniciar una planeación para el desarrollo económico de la zona, de lo que se trata es de promover la acción para volver a la unidad y continuidad de la zona. Es el litoral el motor que impulsará a la unidad; no es que el litoral tenga todo lo que hace falta para realizar la unidad, pero tiene tanto tan valioso que sin su concurso la unidad jamás podrá realizarse. Los elementos más valiosos del litoral son sus ríos, arroyos, lagunas y esteros, los que al sufrir cambios en su fisiografía han cambiado la ecología de la región. Se trata de volver a las condiciones naturales anteriores, que todas las lagunas litorales se vuelvan a comunicar con el mar y entre ellas; con esto se restablece la relación mar-laguna-ríos y con ello la ecología. Una vez que esto suceda el litoral será fuente de riqueza: se desarrollará la pesca en gran escala, se producirá sal a bajo costo, se podrán aprovechar otros materiales como la concha de almeja, caolín, sales, etc. Después el sistema lagunario se aprovechará para crear las vías de navegación interior con lo que se tiene la uni-

dad y continuidad de la planicie costera Nor-oriental. Pero el sólo planteamiento es ya difícil y complejo; el cual se hace en Estudios separados, cada uno de ellos se refiere a un aspecto.

Estos Estudios son: (1)

- 1° ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA REHABILITACION DE LA LAGUNA MADRE DE TAMAULIPAS, ELABORADO POR LA SECRETARIA DE LA PRESIDENCIA.
- 2° CANAL INTRACOSTERO MEXICANO, ELABORADO POR UNA MISION DE LAS NACIONES UNIDAS.
- 3° INFORME RELATIVO AL ESTABLECIMIENTO DEL PUERTO DEL NOROESTE.
- 4° ESTABLECIMIENTO DE UN PUERTO DE REFUGIO EN LA DESEMBOCADURA DEL RIO SOTO LA MARINA:

Del primero de los citados podemos decir que su objetivo número uno es el de reunir toda clase de información relativa al problema de la desecación de la Laguna Madre, analizando su funcionamiento hidráulico en el pasado que conduzca a un proyecto preliminar, que es el segundo objetivo.

El proyecto para llenar y conservar la Laguna Madre, consiste en la apertura de dos bocas de comunicación con el mar, protegidas por espigones. Las bocas se localizan una en la porción norte de la laguna y otra en la porción sur. También forma parte del proyecto la construcción de escolleras en la desembocadura del Río Soto la Marina y un canal que comunique al Río con la parte Sur de la Laguna.

El segundo de los Estudios, CANAL INTRACOSTERO MEXICANO, está dividido en dos partes. En la primera se analiza económicamente la zona que va a servir; la porción norte del canal, del Río

(1) Con objeto de facilitar su lectura, estos estudios se han resumido eliminando hasta donde ha sido posible los desarrollos matemáticos.

Tuxpan al Río Bravo, presenta mejores perspectivas que la sur que abarca de Coatzacoalcos, Ver. hasta Laguna de Terminos, Camp. Recomienda la MISIÓN que la Sección Norte del Canal, sea considerada en primer término.

La segunda parte, se ocupa de la localización y diseño de la sección tipo del canal y de la secuela y métodos de construcción hasta llegar al presupuesto.

INFORME RELATIVO AL ESTABLECIMIENTO DEL PUERTO DEL NORESTE.- Desde hace tiempo que existe la idea de construir un puerto para servir al Noreste del país.

Se analizan varios sitios para su localización, resultando el más adecuado el de Playa Lauro Villar, en los terrenos bajos junto a la Laguna del Barril, por las razones siguientes: Menor costo de construcción, menor distancia por F.C., al centro ferrocarrilero de Monterrey. Sin embargo la conclusión final es que por ahora no se justifica una inversión de 400 millones de pesos, por el bajo volumen de carga potencial actual; se recomienda seguir utilizando Tampico.

ESTABLECIMIENTO DE UN PUERTO DE REFUGIO EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO SOTO LA MARINA.- Considerando que en la porción de litoral comprendido entre los ríos Pánuco y Bravo, no existe un lugar de refugio a las embarcaciones, no se ha desarrollado la actividad pesquera, ni turística, ni otra relacionada con la navegación, se analiza la situación en el pasado y en la actualidad llegando a la conclusión de que es urgente se establezca un puerto de refugio en la desembocadura del Río Soto la Marina.

El Refugio se crea de una manera sencilla, mediante la construcción de dos escolleras, un pequeño canal de acceso y una dársena de 300 x 400 metros, todo ello a la profundidad de 3 metros.

La construcción de escolleras, en realidad forma parte de las obras propuestas para el llenado y conservación de la Laguna Madre, las que además comprenden la apertura de dos bocas de comunicación de la Laguna con el mar, así como la comunicación de la Laguna con el Río. Resultando que las escolleras en la desembocadura del Río Soto la Marina, son de múltiples propósitos.

LIBRO PRIMERO

Estudio regional de la Laguna Madre de Tamaulipas.

Estudio preliminar para rehabilitación de la Laguna Madre.

	INDICE
PRESENTACION	vi
	PARTE I
INTRODUCCION	1
Capítulo 1. Antecedentes.	2
1.1. Reseña Histórica del Problema.	
1.2. Estudios Previos.	
Capítulo 2. Presentación del Problema.	15
2.1. Localización y Descripción General.	
2.2. Reconocimiento de la Laguna Madre de Tamaulipas previo a los Estudios de Campo.	
	PARTE II
ORGANIZACION DEL ESTUDIO	
Capítulo 1. Comisiones Preliminares.	43
1.1. Comisión del 12 al 15 de noviembre de 1965.	
1.2. Comisión del 31 de agosto al 3 de septiembre de 1966.	
Capítulo 2. Organización de los Estudios de Ingeniería de Proyecto.	51
2.1. Estudio Regional de la Laguna Madre de Tamaulipas.	
2.2. Programa General del Estudio.	
2.3. Modificaciones al Programa Original.	
2.4. Criterio General de Selección de Sitios para Obras de Alimentación.	

ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES

Capítulo 1. Características y Fenómenos Físicos Generales en el Area.	73
1.1. Datos Hidrológicos Generales.	
1.2. Vientos, Huracanes y Tormentas Tropicales.	
1.3. Oleaje y Corrientes.	
1.4. Mareas Astronómicas.	
1.5. Geología, Sedimentología y Datos Complementarios.	
Capítulo 2. Estudio Hidrológico.	131
2.1. Funcionamiento del Vaso.	
2.2. Análisis Estadístico de Niveles y Volúmenes.	
Capítulo 3. Régimen del Litoral y Area Lacustre.	139
3.1. Mareas de Viento y de Tormenta.	
3.3. Régimen del Oleaje. Propagación. Oleaje de Tormenta.	
3.4. Transporte Litoral.	
Capítulo 4. Canales a Marea Libre.	197
4.1. Generalidades.	
4.2. Estabilidad Horizontal.	
4.3. Estabilidad Vertical.	
4.4. Consideraciones Adicionales para Valuar el Prisma de Marea.	

ESTUDIOS DE PROYECTO

Capítulo 1. Anteproyectos. 205

1.1. Introducción.

Capítulo 2. Proyecto Preliminar. 222

2.1. Presentación General del Proyecto.

2.2. Características y Dimensiones Generales
del Proyecto Preliminar.

Capítulo 3. Costos Preliminares. 227

3.1. Disponibilidad de Materiales.

3.2. Análisis de Costos.

3.3. Resumen de Costos.

3.4. Desembocadura del Río Soto la Marina y
Obras Conexas de Canalización.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 240

PRESENTACION

La desecación de la Laguna Madre constituye un problema regional por la dimensión del área que afecta y por la influencia que tiene sobre diversos sectores económicos aparentemente independiente del directamente afectado, en este caso, la pesca. En años anteriores diversas organizaciones e instituciones nacionales y extranjeras han enfocado su atención a la laguna, a la luz de sus intereses y actividades particulares sin que existiese una mayor preocupación en coordinar esfuerzos, datos y resultados, hacia la posible solución al problema de desecación de la laguna.

El primero de los objetivos del presente estudio, fue tratar de reunir todas esas informaciones para que, apoyado en ellas, se desarrollara un estudio completo cuyas conclusiones fueran un proyecto preliminar, constituyendo este proyecto, el segundo de los objetivos. Su función inmediata es sentar las bases para definir, teórica y experimentalmente, las características de la solución óptima, bajo los puntos de vista hidráulico, económico y social.

El estudio preliminar para la rehabilitación de la Laguna Madre, tal y como se designó a este trabajo, consta de cinco partes y once capítulos. La primera parte constituye una información general sobre el problema; en ella se encuentran datos referentes a los diversos estados presentados por la laguna en -

los últimos 66 años y lo que se conocía de ella hasta principios de 1967.

La segunda parte se integra con las etapas previas a la organización del estudio así como la forma en que se desarrolló - éste, hasta llegar a la conclusión referente a la posible solución del problema anticipando varias de las informaciones y cálculos que aparecen en las partes subsecuentes.

En la tercera parte se analizan los diversos factores climatológicos, mecánicos, hidráulicos y geológicos, cuyas relaciones son determinantes en la búsqueda de la solución.

Fue necesario considerar los aspectos de precipitación, evaporación y escurrimiento y el balance hidrológico resultado de su combinación; los vientos estacionales y los accidentales y su función en la dinámica lacustre y litoral; los oleajes como agentes de transporte de arenas y como elementos mecánicos de diseño de obras playeras; las mareas, fenómeno fundamental en el funcionamiento hidráulico de la laguna. Asimismo se complementó con los aspectos geológico y sedimentológico para tener una impresión lo más completa posible del problema. En todos los casos, la aplicación al caso específico que nos ocupa, se amalgamó con las teorías relativas actuales y confiables, a fin de disponer de las herramientas adecuadas para el mejor logro del estudio, de acuerdo con la cantidad y calidad de los datos disponibles.

La cuarta parte constituye la cristalización, en una serie de - anteproyectos, de la combinación y análisis de los diversos factores examinados. La conclusión de esta cuarta parte fue el proyecto preliminar base para el estudio final, previo a la posible realización de las obras propuestas.

En la última parte - Conclusiones y Recomendaciones - se dejan establecidos los beneficios que es posible esperar con la solución propuesta y los puntos, que a juicio de los encargados --- del estudio, deberán atacarse, afinarse y complementarse en el campo y el laboratorio, a fin de obtener el proyecto óptimo de solución.

INTRODUCCION

En esta parte se presentan una serie de informaciones locales sobre el problema, informaciones que, completadas con los estudios previos realizados y un viaje de reconocimiento al lugar, permiten plantear en forma general el problema de la Laguna Madre.

El capítulo 1 se consagra a dar una reseña cronológica del problema a partir del presente siglo, más adelante, se hace mención a los estudios previos de que se tuvo conocimiento, desarrollados tanto por instituciones gubernamentales, como de investigación y de carácter privado.

En el segundo capítulo se hace un examen general de la Laguna Madre bajo diversos puntos de vista, señalando los factores actuantes y su importancia en el estudio de la solución al problema.

ANTECEDENTES

1.1. Reseña Histórica del Problema.

Esta reseña se hizo en base a la selección de informaciones recabadas en la región.

Dichas informaciones fueron suministradas por personas, principalmente pescadores, que han seguido muy de cerca el comportamiento de la Laguna Madre desde fines del siglo pasado. (*)

Existen datos referentes a que en el siglo pasado, durante 21 años estuvo seca (1). Es muy probable que este estado se haya prolongado hasta 1909; en todo caso hay la seguridad (2) de que en 1902 la laguna no tenía agua, perdurando esta situación por siete años más. En 1909, un ciclón que azotó la región, llenó la laguna, permitiendo que los nueve años siguientes hubiese pesca (3).

Una nueva época de sequía se inició en 1919 y no fue sino hasta el ciclón de 1933, cuando la laguna recuperó su nivel original, perdiendo gradualmente agua hasta que en 1955, se cerró la última de las bocas de comunicación al mar: Jesús María.

En el tiempo en que la laguna tenía agua, la navegación y la

(*) Al final del capítulo se citan los nombres de los informantes.

pesca eran intensas. A este respecto existe información que las embarcaciones tenían problemas causados por los troncos de mezquites que habían crecido en los lapsos de sequía, -- Fuera de eso, la navegación se desarrollaba normalmente de acuerdo con la ruta siguiente (4). De Norte a Sur y partiendo de la Laguna de Jasso, que es donde desemboca el Arroyo del Tigre o del Diablo, empezaba un canal por donde se podría navegar cerca de la orilla del lado de tierra firme hasta la desembocadura del río San Fernando, allí se desviaba en dirección Este con rumbo a la Boca de Sandoval y poco antes de llegar al mar, el canal torcía nuevamente hacia el -- Sur volviendo otra vez a alinearse a lo largo de la ribera Oeste de la Laguna en un punto llamado "Punta Brava". Entre los pescadores había inclusive, un dicho que era "de Punta Brava a Jesús María, ya nos vamos por canal". Punta Brava -- está a 2 Km. al Norte de Jesús María. Según se dice a lo -- largo de esos 25 Km. había 13 m. de profundidad, hasta un -- sitio denominado Las Carreras, frente a Jesús María, a partir de allí el canal seguía hasta Las Pangas, pero siempre pegado a tierra, con una profundidad media de 10 m. Adelante de Las Pangas, se encontraba el Cabo y después, la desembocadura del río Soto la Marina.

En cuanto al problema actual de sequía y extinción de la -- pesca, uno de los factores que parece haber sido determinante, (5), fue el control del Río Bravo, a raíz de la congstrucción de la Presa Falcón, ya que gran parte del volumen de ese río escurría hacia la zona Norte de la Laguna a través del arroyo del Tigre.

Los efectos de la sequía de la Laguna se empezaron a acusar en 1958 (6) cuando las tierras cultivables fueron gradualmente invadidas por la arena; en 1963 el ganado sufría ya afecciones en los ojos. Los pozos de agua dulce se han ido salando gradualmente, al grado que de 360 sitios, principalmente islas, donde podía encontrarse agua dulce sólo existe una, "la Loma de Agua" frente a la barra de Sandoval.

Otras observaciones interesantes fueron:

- a. Por efecto de los nortes la marea de viento abatía el nivel del agua 0.60 m. en el Norte y lo sobreelevaba 1.00 m. en el Sur (7). La situación se invertía para los vientos del Sur y Sureste abatiéndose 1.00 m. en el extremo meridional y elevándose 0.60 m. en el septentrional.

La circulación de agua producida por este fenómeno, creaba un canal dentro de la Laguna con una profundidad variable entre 1 y 3 m., una plantilla de 30 m. y 65 m. de ancho de la superficie.

- b. Las bocas se abren por el lado del mar pero no por la Laguna, alcanzando profundidades hasta de 3 y 4 m.
- c. En la zona denominada Médano Prieto, el agua dentro de la Laguna se mantiene a corta distancia del mar, siendo esta área la elegida por algunos salineros (8) como más favorable por esta razón. Además desde 1918 las dunas en

ese sitio están fijas y durante los mas fuertes tempo---
rales las marejadas pegan al pie del médano sin causar --
mayor efecto (3).

- d. La boca de Santa María se cerraba en verano de Sur a --
Norte y se abría en invierno de Norte a Sur y duraba --
completamente abierta 9 meses.
- e. Las bocas cuando estaban abiertas tenían una orientación
Este-Oeste y cuando casi se cerraban, esa orientación --
cambiaba a Sureste-Noroeste (5).
- f. La saladilla, que es una especie de zacate, crece en la
Laguna y soporta la acción de la arena.

1.1.2. Lista de Informantes.

- (1) Antonio Valente.- Descendiente de una familia residente
en la zona hace 3 generaciones. Cuenta actualmente con --
90 años de edad.
- (2) Gregorio Cuellar.- Su abuelo gestionó el traer una draga
de Europa en 1902 para abrir las bocas. Su padre y él --
fueron pescadores.
- (3) Ricardo Leal Cantú.- Su familia reside en la zona desde
1909, comerciaban usando la Laguna cuando e taba seca. --
El está dedicado a la pesca desde 1933.

- (4) Teodoro Martínez Cardiel.- Pescador de 1934 a 1941.
- (5) Rafael Isax y Garza.- Pescador desde 1937.
- (6) Pedro Saenz.- Agricultor desde 1958 .
- (7) Tranquilino Garza.- Su abuelo se dedicó a la pesca hasta 1902; su padre y él mismo siempre han seguido con este oficio.
- (8) Eliseo Guajardo Cantú.- Salinero desde 1950.

1.2. Estudios Previos.

El problema de la Laguna Madre se ha estudiado prácticamente a partir del año de 1950, no obstante que desde que se tiene noticias de él, ha habido diversas tentativas de resolverlo abriendo artificialmente las bocas, inclusive ya en 1902 se trató de traer una drag de Europa para ese fin. Estas tentativas fallidas no pueden considerarse realmente como estudios previos, no obstante se hará referencia a la última de que se tiene información.

Cronológicamente el primer estudio en el área, que si bien no estaba orientado específicamente a resolver el problema, podría haber aportado una alimentación permanente a la zona Norte de la Laguna, fue presentado a la Secretaría de Marina por el C. Ramón Llano (1). Específicamente se trataba de

(1) Llano R.- Estudio de las Escolleras y Puerto en la Laguna Madre, Tamaulipas.- Informe presentado a la Secretaría de Marina, México, febrero de 1952.

las instalaciones del puerto de Matamoros, localizado en el interior de la Laguna Madre en las vecindades del sitio denominado Punta del Toro. La dársena estaba ligada con el mar por un canal de 7 Km. de longitud. Su desembocadura se proponía en la zona denominada Chicharrones y en particular en la boca del Mezquital. El proyecto del puerto incluía:

- a. Obras exteriores.
- b. Canal de acceso y dársena.
- c. Anteproyecto de zonificación e instalaciones.
- d. Diseño del muelle petrolero.

Henry Hildebrand (2) desarrolló, a base de visitas periódicas a la Laguna, un estudio biológico que incluía la observación de métodos de pesca, recolección de peces e invertebrados y análisis ecológicos de los sitios de pesca. Sus datos más interesantes son los referentes a las concentraciones salinas y la cronología de 1951 a 1955 sobre la evolución de las condiciones ecológicas en los sitios de mayor riqueza pesquera.

En 1959, las autoridades municipales de Matamoros solicitaron al Ing. Enrique Siller (3) que realizará un estudio para el dragado de un canal en la Barra de Jesús María. El estudio se concretó a una serie de observaciones de campo y trabajos topográficos orientados a dar el trazo del eje del canal. Asimismo, complementó su trabajo con la determinación aproxima-

(2) HILDEBRAND H.- Estudios Biológicos Preliminares sobre la Laguna Madre de Tamaulipas.- Revista Ciencia. Vol. XVII, Nos. 7-9. México, marzo 1958.

(3) SILLER E.- Comunicación personal al Ing. Jorge Cortés Obregón. Noviembre 1965.

mada del punto nodal de la marea de viento dentro de la Laguna habiéndolo localizado "...a los 24° 45' 01" de latitud Norte..". Con base en el trazo propuesto, la draga Guayalejo de la Secretaría de Marina inició el dragado del canal, sin embargo, por lo reducido de su capacidad, los trabajos se suspendieron sin haberse logrado ningún resultado positivo.

Daniel Ocampo (4) desarrolló un estudio muy completo, aunque de carácter preliminar, basado en informaciones existentes y una inspección al lugar. El estudio incluye: un examen general de datos hidrológicos, vientos y mareas. Hace también un análisis sobre los aspectos morfológicos y fisiográficos, señalando la importancia de los ríos Bravo y Soto la Marina como fuentes de aporte de los sedimentos playeros. Trata la dinámica de las aguas dentro de la Laguna.

Al estudiar los sitios más ventajosos para localizar bocas, desde el punto de vista del acarreo litoral, sugiere las de San Antonio y Jesús María, esbozando el hecho de que la orientación de las salidas podría hacerse tomando en cuenta la dirección de los vientos reinantes a fin de aprovechar su efecto.

La compañía de dragado National Bulk Carrier (5) presentó a

(4) OCAMPO S.D.- Estudio Preliminar Acerca del Problema Costero de la Laguna Madre, Tamaulipas, en Conexión con el Problema de la Obstrucción de las Bocas de Marea en el Cordon Litoral.- Canal Intracostero Mexic no. Posibilidades de Tráfico y Justificación Económica. Secretaría de Marina, Dirección General de Obras Marítimas. 1963.

(5) NATIONAL BULK CARRIERS, INC.- Estudio Preliminar de la Laguna Madre de México, Reporte para Petróleos Mexicanos. Agosto 1964.

Petróleos Mexicanos un estudio con fines de dragado, que - llevó a cabo un consultor de aquella empresa en base a una serie de vuelos de reconocimiento, una inspección al lugar y la poca información existente. Los objetivos a los que - se orientó la proposición fueron:

- a. Renacimiento de la industria pesquera.
- b. Construcción y desarrollo del canal intracostero ligado con el de los Estados Unidos.
- c. Creación de puertos de refugio entre Brownsville y Tampico.
- d. Transporte económico regional a base de chalanes.
- e. Aumento de las facilidades de Petróleos Mexicanos para trabajos de exploración.

Proponen como bocas, además de la de Soto la Marina, las - siguientes:

- Frente a Santa Isabel, en la parte Sur de la Laguna.
- Boca de Jesús María.
- Boca de San Antonio.
- Boca de Santa María.

El desarrollo de su proyecto comprende 8 fases, siendo simultáneas las dos primeras consistentes en la apertura de bocas y estabilización de dunas. La tercera, extensión de canales de entrada hacia el Oeste; la cuarta, construcción del canal interior desde la Pesca hasta Matamoros. En la - quinta y sexta, este canal se prolongaría hasta Tuxpan. -- Las dos últimas, comprenden los estudios económicos para -

definir la localización del puerto de Matamoros y la determinación de las características del equipo para mantener entradas y canales.

En 1965, una Comisión enviada por la Organización de las Naciones Unidas para estudiar la factibilidad de construcción del Canal Intracostero, analizó el problema de la Laguna Madre (6) planteando su solución bajo dos puntos de vista:

- a. Apertura de bocas en varios puntos del cordón litoral, - asentando la necesidad de construir escolleras para evitar problemas de mantenimiento. Con esta solución preven un tiempo de llenado de año y medio.
- b. Comunicar la Laguna, en la parte Norte con la de Texas y en el Sur, con el río Soto la Marina, dragando el canal a través de la Laguna. En este caso se estimaba un tiempo de llenado de tres años y medio.

En ambas posibilidades sólo se trataba de resolver el problema de llenado de la Laguna, sin considerar el restablecimiento de las condiciones ecológicas favorables de la pesca.

A mediados del año de 1965, la Secretaría de Marina, autorizó al C. Felipe Galván Real, presidente de la Asociación Ganadera de la localidad para emplear dinamita y abrir un canal en Boca Ciega de 2 m. de profundidad, 5 m. de ancho y - 250 m. de largo (7).

(6) ONU.- Canal Intracostero Mexicano. Reporte de la Comisión de Estudios. Diciembre de 1965.

(7) MOLL GIL ANTONIO.- Informe al C. Almirante C.G. Secretario de Marina sobre Iniciación de Apertura de Barras de la Laguna Madre, Tamps. Practicada en "Boca Ciega". H. - Matamoros, Tamps. junio 1965.

Reportes posteriores indican que la comunicación establecida sólo permaneció abierta durante 3 ó 4 días. No obstante que como se dijo, esto no constituye un estudio previo, la experiencia aportada es valiosa en relación a la necesidad de -- que cualquier boca que se abra, deberá quedar debidamente -- protegida con escolleras para evitar un gasto de mantenimiento excesivo.

La Secretaría de Marina programó en 1965 (3) un reconocimiento general del estado que guardaban las bocas de la Laguna - Madre. Los trabajos de campo, dirigidos por el Ing. Mauricio Osorio, consistieron en un reconocimiento terrestre de las bocas y antiguos pasos de la Laguna desde su extremo Norte hasta la boca de Jesús María. Configuración de la boca de Bue--yes, reconocimiento topohidrográfico frente a las 4 bocas de Santa María, medición de corrientes y vientos y toma de muestras en esa área.

El Ing. Osorio examina también el funcionamiento hidráulico de la Laguna considerando los factores "...vientos, arras--tres litorales y mareas...".

En sus recomendaciones establece que sería necesario abrir una boca al Norte, en el paso del Mezquital y la conexión - al Sur con el río Soto la Marina. Asimismo hace algunas su-

(3) OSORIO M.- Informe Relativo a las Bocas de la Laguna Madre de Tamaulipas.- Informe de la Dirección General de Obras Marítimas.- Noviembre 1965.

gerencias sobre materiales y procedimientos de construcción.

Otro colaborador en este estudio fue el Inf. Javier Gutiérrez Bustamante, quien por su parte examina con mayor detalle el problema (9), proponiendo finalmente varias soluciones las cuales son:

- a. Abrir una boca en el extremo Norte de la Laguna, en los Bueyes o el Mezquital, y desviar el río Soto la Marina hacia la Laguna, con un mejor aprovechamiento del río San Fernando.
- b. Abrir una boca en el Norte tal y como se indicó en (a) y otra en Jesús María comunicando simplemente la Laguna con el río Soto la Marina y utilizando al máximo el gageo del río San Fernando.
- c. Igual solución que en (b) pero abriendo una tercera boca en la Barra de Sandoval.
- d. Para acelerar el llenado se sugiere el empleo de explosivos y bombardeo desde el aire en 5 bocas, para abrirlas sin importar el posterior azolvamiento de ellas por contar ya con 2 ó 3 bocas adecuadamente protegidas.
- e. Además de lo señalado en los puntos anteriores, comunicar la Laguna por el Norte con la Madre de Texas.

Hace también algunas estimaciones preliminares de dragado de canales así como los gastos que podrían entrar a través

(9) GUTIERREZ B.J.- Posibles Soluciones para el Funcionamiento Hidráulico de la Laguna Madre en Tamaulipas, México.- Boletín Técnico del Depto. de Estudios y Laboratorios. Tomo II No. 2 y 3 de junio-septiembre de 1966.

de ellos, analizando el problema de los materiales de construcción para los espigones de protección en las bocas y las indispensables escolleras en la desembocadura del río Soto la Marina.

El Instituto de Geología, la Facultad de Ciencias y el Jardín Botánico de la Universidad Nacional Autónoma de México emprendieron a partir de 1962 y hasta fines de 1965, un estudio de la región bajo el punto de vista general de sus disciplinas respectivas. Así el Instituto de Geología (10) lo orientó hacia un análisis de los componentes inorgánicos de los sedimentos, así como de los procesos geológicos que controlan su depósito, evaluando su significado en el origen y evolución de la laguna. Además de las diversas informaciones aportadas, es opinión de los investigadores de ese Instituto que "...desde el punto de vista geológico, la Laguna ya no existe..." y la presencia de agua en ella, cuando se llena, debe considerarse como accidental. Por su parte la Facultad de Ciencias a través de su sección de Biología y el Jardín Botánico (11) iniciaron el estudio de las comunidades vegetales del Noreste de Tamaulipas.

En relación con el problema obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a. La salinidad del suelo es uno de los factores limitantes de la distribución de la vegetación.

(10) YAÑEZ C.A.- SCHLAEPFER C.- Composición y Distribución de los Sedimentos Recientes de la Laguna Madre, Tamps.- II Congreso Nacional de Oceanografía, Ensenada, B.C.1965.

(11) GONZALEZ M.F.- La Vegetación del Nordeste de Tamaulipas. Tesis Profesional. Facultad de Ciencias, UNAM. 1966.

- b. Algunas especies encontradas (*uniola paniculata*) desempeñan un papel importante como fijadoras de dunas, además de ser muy resistentes al rocío de agua de mar, favorecen el establecimiento de otras plantas.

En términos generales puede observarse que bajo los diversos puntos de vista hay una coincidencia respecto de la importancia de los siguientes factores físicos:

- a. Mareas de viento.
- b. Transporte eólico.
- c. Acarreo litoral.
- d. Salinidad.

Y en cuanto a las probables soluciones, existe la opinión generalizada respecto de la necesidad de comunicación del río Soto la Marina con la Laguna Madre y la utilización de las antiguas bocas como sitios de alimentación a la Laguna.

PRESENTACION DEL PROBLEMA.

En base a las informaciones recabadas y estudios previos, - se hace una presentación de las características generales - de la Laguna; agregando, al final del capítulo, las observaciones hechas durante el reconocimiento practicado, previo a la iniciación de los trabajos de campo.

2.1. LOCALIZACION Y DESCRIPCION GENERAL.

La Laguna Madre de México, se localiza aproximadamente entre los 23°45' y 25°30' de latitud Norte y los 97°25' de longitud Oeste. Colinda al Norte con los depósitos deltaicos del Río Bravo y al Sur con el Río Soto la Marina, al Este con el Golfo de México y al Oeste con la porción continental del Estado de Tamaulipas. Es una albufera hipersalina de la provincia fisiográfica de la llanura costera del Golfo de México. Esta provincia tiene una pendiente suave, y su altitud va del nivel del mar hasta los 200 m. La evolución que ha tenido, posterior al terciario y cuaternario - presenta como característica el que los ríos no han podido labrar su cauce, sino que han formado una plataforma de rellenos, quedando en alto con respecto a los terrenos vecinos. En comunicación del Instituto de Geología (10), se consigna que los sedimentos son de origen deltaico sólo en la

(10) Op. cit.

parte superficial y descansan sobre sedimentos marinos resultado de la erosión y transporte de las rocas cretácias y terciarias, situadas al Oeste.

Se separa de una Laguna muy similar, Laguna Madre de Texas, por el delta del Río Bravo, sin embargo, sus condiciones ecológicas son diferentes, ya que ella está más o menos estabilizada, debido en parte al Canal Intracostero, mientras que la Laguna Madre de Tamaulipas está en franca vía de desaparición por la poca atención que se le ha prestado. Desde un punto de vista geológico puede considerarse como inexistente, aunque como señala atinadamente Carothers (12), al referirse a la Laguna Madre de Texas, geológicamente puede considerarse extinta, sin embargo desde el punto de vista pesquero todavía resta mucha vida a ella, necesitándose un intercambio efectivo de agua para evitar el exceso de salinidad.

La longitud aproximada de la Laguna, medida en dirección NNE-SSW, es de 135 Km. El Río San Fernando, que desemboca en ella, la divide en dos porciones: una Norte de 50 Km. de largo y 20 Km. de ancho medio, y otra Sur, con 135 Km. de largo y ancho variable de 10 a 1 Km. en su extremo meridional.

Del Río Soto la Marina a la boca de Jesús María, el rumbo medio es N 5° E y de esa boca hasta el extremo Norte de la

(12) CAROTHERS H.P.— Development Report on Fish Passes and Water Interchange for the Upper Laguna Madre and Corpus Christi Bay, Coastal Texas.— Lockwood, Andrews & Newman Consulting Engineers. Austin, Texas 1959.

Laguna el rumbo es N 20° E. A partir del extremo Norte se distinguen sucesivamente una serie de depresiones en las dunas, que constituyen una prueba de la existencia de antiguas bocas. Dichos pasos son: Pasos de las Calabazas, de los Bueyes, El Mezquital y San Juan. Hacia el Sur se encuentran (25°03' de latitud) las bocas de San Rafael, Santa María, Boca Ciega y Sandoval. Estas cuatro bocas están frente a la desembocadura del Río San Fernando, donde el cordón litoral es marcadamente angosto, unos 900 m. en comparación con tramos en que tiene hasta 3,000 m. de ancho, si se incluyen las llamadas Lagunas de post-barrera. Hacia el Sur de las cuatro bocas de Santa María, el cordón conserva aquel ancho que es un índice de un mejor grado de evolución hacia la madurez. En esta área se presentan las bocas de la Carbonera, Los Algodones, San Antonio y más adelante la de Jesús María -24°32' N-; esta boca ha permanecido abierta durante mayor tiempo. Entre Jesús María y Soto la Marina, la Laguna se estrecha hasta tener solo 1 Km. en el extremo Sur. El cordón litoral sufre también disminución en su ancho -sólo 300 m.- (Plano LM-1).

En general, en toda la extensión del cordón litoral se presenta una parte de dunas activas y otras ya estabilizadas por la vegetación, con fuerte pendiente hacia la Laguna. La orientación de las dunas activas, puede ser un buen índice de la dirección de los vientos dominantes. La porción entre el extremo Norte y las bocas de Santa María presenta una clara dirección de avance Sur-Norte con ligeras desviacio-

nes hacia el sureste. Su ancho aproximado es de 600 m. y - alturas hasta de 10 m.

La existencia de dunas activas tiene como resultado un transporte eólico intenso, su efecto sobre el azolvamiento de la laguna, es posible que sea similar al estimado en la Laguna Madre de Texas por Carothers (12) es decir, del orden de 0.8 cm. por año.

El cordón litoral presenta en las zonas de las antiguas bocas, abanicos interiores de tipo deltaico formados por el - efecto de corrientes de marea del Golfo de México, cuando - aquellas estaban abiertas.

Respecto a la playa, la arena que la compone es más bien fina, existiendo en tramos largos abundante concha de almeja. La pendiente de la playa es suave 1:50 a 1:100 aproximadamente, sólo al Norte de la boca de Jesús María, se acentúa. En general el perfil playero se compone de una serie de barras paralelas de 30 a 90 cm. de altura que interrumpen localmente la pendiente uniforme de la playa, en la parte exterior - hay una berma de tormenta. Sobre estas barras y en la parte alta de la playa se encuentran los materiales más gruesos, - mientras que los finos se localizan en las fosas y hacia las profundidades.

En planta, el trazo es en general recto y uniforme, no así - la ribera de la laguna que es irregular en extremo.

(12) Op. cit.

La laguna propiamente dicha queda dividida en dos cuencas -- por el delta del Río San Fernando: La Meridional y la Sep-- tentrional. Su influencia ha sido determinante en la evolu-- ción de la laguna, ya que además de que evidencia que su -- delta es más antiguo que la barrera arenosa, o sea, desembo-- caba directamente al Golfo de México, la reducción de su -- gasto debido a su utilización, aceleró el proceso de azolve de algunas bocas.

En su parte Norte, la laguna alcanza en algunos puntos has-- ta 3 m. de profundidad. La parte meridional no presenta va-- riaciones en la profundidad (-1 m. máximo). Uno de los ras-- gos sobresalientes de la cuenca meridional, es la amplia -- Bahía del Catán o Bahía Salada.

Esta bahía está ligada con la Laguna a través de una boca -- con acantilados de ambos lados. Ocupa una depresión semicir-- cular excavada en sedimentos tal vez del pleistoceno; su -- máxima profundidad es de 1.35 m. En la entrada de la bahía existen afloramientos de roca de playa en ambas márgenes. -- Su elevación sobre el nivel medio del mar se estimó (10) en 1.50 m. con un ancho máximo de 11 m. y 200 m. de largo pa-- ra el promontorio Norte.

En general el fondo es plano con suave pendiente hacia su -- parte media. La cuenca septentrional, limitada por los alu-- viones deltaicos del Río Bravo, se vuelve muy irregular con

(10) Op. cit.

la presencia de islas remanentes de erosión; entre ellas, - se extienden llanuras de lodo inundadas intermitentemente - por las mareas provocadas por los vientos.

La cuenca de la Laguna se extiende hasta la Laguna de Morales, sin embargo queda limitada por la ligera elevación que existe a lo largo de 35 Km. al Norte del Río Soto la Marina, y sólo en época de fuertes lluvias se une con la Laguna de Morales.

En la parte Norte de la Laguna, el Río Bravo aportaba, a -- través del arroyo del Tigre, grandes cantidades de agua, en volumen tal que, según Hildebrand (2), durante las inunda-- ciones era posible ir en barco desde la Laguna Madre hasta Puerto Isabel, Texas, sin salir al Golfo de México.

Los sedimentos lacustres han sido estudiados por Yáñez y - Schlaepfer (10), de acuerdo con su granulometría los clasi-- ficaron en tres grupos:

Grupo I. Arenas finas muy bien clasificadas; distribuidas - en las bocas y sotavento de la barrera arenosa; corresponde a sedimentos introducidos por las mareas o llevados a la La-- guna por el transporte eólico desde la barrera arenosa.

En consecuencia su distribución está concentrada a una fran-- ja paralela a la ribera Este de la Laguna en contacto con -

(2) Op. cit.

(10) Op. cit.

el cordón litoral. Es claro que la mayor extensión donde se tienen sedimentos de este grupo es donde ocurren las más -- frecuentes e intensas entradas del mar a la Laguna durante fuertes temporales; el sitio que presenta estas características es frente a las cuatro bocas de Santa María.

Grupo II. Mezcla de arena-limo arcilla mal clasificada con predominio de limos, distribuida en la mayor parte de la -- Laguna, en particular, formando una ancha franja paralela a la orilla continental.

Grupo III. Sedimentos limo arcilloso muy pobremente clasifi-- cados, distribuidos en la parte más profunda del área y en la bahía del Catán. Se mantiene en suspensión cada vez que el viento actúa sobre la superficie del agua.

Por otra parte al estudiar los componentes terrígenos y su origen, se obtuvo el índice (13) de que, de acuerdo con el contenido de minerales pesados, la Laguna y el cordón perte-- necen a la provincia petrográfica del Río Bravo, con una -- tendencia a disminuir hacia el Sur. (Plano LM 21)

Respecto a las condiciones de las bocas de comunicación con la Laguna, están cerradas en su totalidad, se reporta (10)-- que en 1962 y 1963 se encontraban abiertas las bocas de San-- doval y de Jesús María, como consecuencia del huracán Carla,--

(13) SCHLAEFFER, C.- Estudio de los Minerales Pesados en los Sedimentos de la Laguna Madre de Tamaulipas, México.- Reporte interno. Instituto de Geología. 1967.

(10) Op. cit.

de septiembre de 1961, pero que se observaba una tendencia a cerrarse debido a un gran bajo frente a ellas, producto del fuerte transporte litoral hacia el Sur. Gutiérrez Bustamante (9) señala que a principios de 1966, en la parte Norte sólo las bocas de San Rafael, Santa María, Ciega y Sandoval tenían pequeños depósitos de agua de gran concentración salina y 1.50 m. de profundidad máxima. Dichos vasos estaban separados del mar por una faja arenosa de 200 m.

Al Sur, las bocas de Carbonero, Algodones, San Antonio, Jesús María y Barrita estaban cerradas. Osorio (8) anota que en esa época (octubre de 1965) existió en la fracción Sur algo de agua aislada de toda comunicación con el mar, y señalaba que lo más probable es que fuera agua de lluvia.

El cierre de las bocas ha sido un proceso evolutivo y se puede marcar como época de la reciente iniciación de ese proceso que empezó a producir condiciones críticas para la vida acuática, el año de 1951. Sin embargo, además de algunas observaciones (10) sobre las bocas de Sandoval y Jesús María, Hildebrand (2) midió en la boca de Jesús María velocidades por efecto de marea hasta de 2 m/seg., pero no obstante -- ello, señaló que su efecto se restringía notablemente a sólo unos cuantos kilómetros cuadrados, y por tanto la salinidad en el interior de la Laguna se incrementaba constantemente a pesar de que los vientos ayudaban, en -----

(2) Op. cit.

(8) Op. cit.

(9) Op. cit.

(10) Op. cit.

cierta forma, a aumentar el efecto de mezclado. De hecho, la circulación de las aguas no se ha estudiado pero se considera (14) debe guardar similitud con respecto a la que existe en la Laguna Madre de Texas por el efecto de los vientos. Más adelante se examinará con mayor amplitud estos problemas.

A partir del cierre de las bocas, se ha intentado abrirlas, pero los pocos elementos disponibles y la falta de protección contra el acarreo litoral han impedido la consecución de este fin. La apertura de las bocas puede en principio, ayudar a la solución del problema, sin embargo, se requiere que se logre también un intercambio eficaz del agua introducida. En la Laguna Madre de Texas esto se ha logrado en varias zonas, con la construcción del Canal Intracostero.

2.1.2. Clima.

En terminos generales, el clima es desértico todo el año, con precipitación y evaporación medias anuales de 628 mm. y 1896 mm. respectivamente. La temperatura media anual es de 23.7°C aunque pueden alcanzar valores extremos de 42°C en el verano.

De los factores climáticos, dos son predominantes en el comportamiento de la Laguna: la precipitación y los vientos.

Los vientos reinantes soplan del SE durante la primavera y

(14) RUSNAK A.G.- Sediments of Laguna Madre, Texas.- Recent Sediments North West Gulf of México 1951-1968. The American Assoc. of Petroleum Geologists. 1960.

verano, alcanzando velocidades de 35 Km/hr. Durante el otoño y el invierno soplan vientos del NW y el NE que son el resultado de la penetración de masas de aire polar en la región del Golfo. Tienen una frecuencia de 15 a 20 por año soplando durante 1 a 3 días. De ellos 1 a 6 son tormentas severas con vientos de 25 a 50 nudos o más (15).

Los vientos reinantes y dominantes tienen gran influencia en los aspectos:

- Mareas de viento dentro de la Laguna.
- Transporte eólico.
- Acarreo litoral.
-

Estos puntos se examinarán en I-2.1.3.

Por otra parte, las tormentas tropicales de fuerza huracanada, según Hayes (15), cruzan la costa entre Tampico y Puerto Arturo, Texas, con una frecuencia de una tormenta cada dos años. Además de los efectos directos de ellas, la marea de tormenta, resultado de la rápida elevación de la superficie del agua y el descenso de la presión barométrica, incrementa la acción del oleaje sobre la costa.

La precipitación pluvial en área sin ríos definidos puede tener un pronunciado efecto en las lagunas someras, particularmente si, como en la mayoría de las regiones semiáridas,

(15) HAYES O.M.- Sedimentation on a Semiarid Wave Dominated Coast (South Texas) with Emphasis on Hurricanes. University of Texas. Auxtín 1965.

las lluvias ocasionales ocurren muchas veces en forma de aguaceros. En la Laguna Madre de Texas, que tiene en su porción Sur condiciones climáticas similares a la de Tamaulipas, se observa que se requiere una precipitación mensual mínima de 75 a 125 mm. para que exista escurrimiento. La influencia de lo anteriormente expuesto se refleja en el notable incremento de la salinidad que ha sufrido la Laguna Madre en los últimos años. Ya Hildebrand apuntaba que en la zona Norte, la salinidad en 1000 km² era demasiado alta para la vida de los peces, en tanto que la zona Sur era menor, así en octubre y noviembre de 1953 y marzo de 1954 la salinidad en Punta Piedra, cerca del extremo Sur de la Laguna, donde la pesca era más intensa, varió de 41 ppm a 47 ppm. En marzo de 1955 en la parte Norte la salinidad era de 108 ppm a 117 ppm.

A su vez Yáñez y Schlaepfer (10), señalan que la salinidad medida en 1962 varió entre 69.83 ppm y 113.71 ppm con promedio de 75 ppm con un gran incremento hacia el Norte.

Las mediciones hechas en 1963 indicaron salinidades entre 81 ppm a 171 ppm con promedio de 115 ppm. Puede observarse que el aumento es considerable. (Plano LM-21).

El proceso evidentemente continúa año con año, siendo la forma más eficiente de abatir la salinidad, el aporte de agua dulce, ya que con agua de mar, el proceso de mezclado es muy lento y poco eficiente, dando como resultado una disminución pequeña en la concentración de sal.

(10)OP. cit.

2.1.2. Marco Geológico y Biológico.

2.1.2.1. Geología.

De acuerdo con los estudios del Instituto de Geología de la UNAM (10), la Laguna Madre de Tamaulipas está comprendida dentro de la llamada "Cuenca de Burgos", prolongada al Norte por la Cuenca del Río Grande de Texas; sus componentes son sedimentos elásticos terciarios y cuaternarios, con rumbo general N-S, sensiblemente paralelo a la costa y un echado regional hacia el Este.

La "Cuenca de Burgos" está limitada al Este por el Golfo de México, al Sur y Sureste por el Río Soto la Marina y la Sierra de Cruillas, y al Oeste por una línea que sigue el contacto entre las rocas de Cretácico y del Paleoceno, desde la Ciudad de Laredo hasta la Sierra de Cruillas.

Los Ríos Bravo, San Fernando y Soto la Marina, la afectan respectivamente en sus partes Norte, media y extrema Sur..

En cuanto a la barrera arenosa que la separa del Golfo de México, es muy posible que su origen se deba a la acumulación de arena durante el ascenso post-glacial del nivel del mar, similar al caso de la Isla Padre en Texas (14).

2.1.2.2. Aspecto Biológico.

(10) Op. cit.

(14) Op. cit.

Hildebrand -(1958)- hizo un análisis completo de las condiciones biológicas existentes en esa época. Establece, en relación con la pesca, que salinidades superiores a la normal no indican necesariamente áreas de baja producción, ya que en estudios pesqueros hechos en la Laguna Madre de Texas, donde la concentración salina es superior a la normal, se produce aproximadamente el 60% de las capturas de peces comerciales de aguas protegidas. En dicho estudio se marca como límite 72 ppm. En la época del estudio de Hildebrand ya unos 1000 Km² de la zona Norte tenían concentraciones salinas tales que las especies de pesca, habían desaparecido, probablemente a causa de la temporada de secas. Como contraste al Sur de la Laguna, no obstante las concentraciones de 41 ppm a 47 ppm, presentaba zona de pesca muy intensa.

En cuanto a la vegetación de la Laguna, una de las características de una laguna hipersalina en una zona árida, es la carencia de pantanos y vegetación emergente en la zona de variación de mareas.

2.1.3. Marco Hidrodinámico de la Región.

2.1.3.1. Oleaje y sus Efectos.

El oleaje que se presenta en la costa, frente a la Laguna, es típico de una playa de suave pendiente, forma varias líneas de rompiente, y con seguridad el efecto de transporte por corriente longitudinal tendrá gran importancia. (Con

vientos existen hasta 6 u 8 rompientes).

En la zona de la Laguna Madre de Texas, Hayes (15) consigna que el período del oleaje varía entre 4 y 6 segundos y ocasionalmente alcanza 10 segundos. La altura media es de 1.20 a 1.80 m.

Respecto al origen del material del acarreo litoral, Ocampo (4) señala que son dos las fuentes de aporte: el delta del Río Bravo por el Norte y el del Soto la Marina por el Sur, (ver inciso 1.2.1 referencia 13). Bullard (16), estudió la distribución de minerales pesados a partir de la desembocadura del Bravo hacia el Norte y observó que se presentaba una notable disminución en los sitios más débiles del cordón litoral, signo inequívoco de la existencia de bocas.

Esto hace pensar que en el caso de la Laguna Madre de Tamaulipas, exista una zona donde la influencia de los sedimentos aportados sea menor. A este respecto Ocampo (4) señala atinadamente que es probable que dicha zona sea la de las bocas de Santa María. Sin embargo no hay que pasar por alto las observaciones de Gutiérrez (9), quien indica que bajo la acción de los nortes, fuertes volúmenes de arena de las dunas son arrastrados hacia el mar, provocando inclusive una fuerte concentración de material en las olas. En general, el mismo autor señala que en ocasiones el transporte litoral es tan intenso que el mar adopta un color café en una

(4) Op. cit.

(15) Op. cit.

(16) BULLARD M.F.- Source of Beach and River Sands on Gulf Coast of Texas.- Bulletin of the Geological Society of

(9) *America*. Vol. 53 pp 1021-1044. July 1942.

(4) Op. cit.

faja que abarca 1 Km. mar adentro de la línea de playa.

2.1.3.2. Mareas Astronómicas.

El fenómeno de mareas astronómicas aparentemente es poco significativo en esta área, principalmente por su escasa amplitud entre 40 y 60 cm- (45 cm. de variación media diaria en Puerto Isabel). Sin embargo, es muy importante si se toma en cuenta que dado lo plano del terreno, una pequeña variación del nivel del agua, puede provocar la inundación de una extensa zona. El volumen de inundación tendrá que fluir y refluir a través de un paso relativamente pequeño si se considera una boca abierta, generándose por tanto fuertes corrientes de marea. Se ha mencionado ya que Hildebrand (2) midió en la boca de Jesús María corrientes hasta de 2 m/seg.

2.1.3.3. Mareas de Viento.

Uno de los efectos más notables producidos por la acción de viento es el de las mareas de viento, resultado de su actuación sobre las masas de agua de la Laguna. Kusnak afirma que en la Laguna Madre de Texas, la circulación de agua en esta Laguna está controlada por las mareas de viento; aún más, no se presenta una circulación de estero, salvo en las vecindades de la boca del paso de Brazos Santiago en el Sur de la Laguna (entrada a Puerto Isabel). Las mareas de viento normales, continúa, oscilan entre 1 y 4 pies. El avance de las aguas por la acción del viento para velocidades de 8 a 10 millas

(2) Op. cit.

por hora, fue de 0.3 a 0.6 millas por día y para vientos de 19 a 30 millas por día, e inclusive en algunos casos de vientos del Norte, fue de 7.6 millas diarias. Concluye diciendo que se considera que las masas de agua se comportan más como las de un lago que como un estero, aunque el canal intracostero ha cambiado un poco este régimen.

Carothers (12), por su parte, estableció que, no obstante la consideración de la existencia de bocas abiertas, la sobreelevación por viento en las zonas bajas produce más de la mitad de la variación en los niveles de agua.

En el caso de la Laguna Madre de Tamaulipas, Don Eugenio Ur-tusástegui, miembro del Consejo Consultivo de la Dirección General de Obras Marítimas, informa que con nortes fuertes, el nivel del agua se abatía en el extremo Norte, de 0.5 a 0.6 m. sin embargo, no existen registros al respecto.

Por la morfología de la Laguna, para el efecto de mareas de viento, la podemos considerar dividida en dos cuencas, la septentrional, de la desembocadura del Río San Fernando hacia el Norte con fetches efectivos para vientos del SE hasta de 40 Km.-si hubiera agua-y de 30 Km. para los del Norte y la meridional dividida en dos subcuencas. Una entre el San Fernando y la Laguna del Catán frente a la boca de Jesús María y la última de la boca de Jesús María hasta el Soto la Marina.

(12) Op. cit.

El efecto de la marea de viento puede analizarse bajo dos puntos de vista:

- a. Cuando aleja la masa de agua de las bocas.
- b. Cuando acumula el agua sobre las bocas.

En ambos casos y tal vez en el segundo, el efecto sea más favorable como sucede en la Barra de Corazones, al Sur de la Laguna de Tamiahua.

Concluyendo, es evidente que el futuro funcionamiento hidráulico de la Laguna tendrá que estar íntimamente ligado a los efectos de las mareas de viento.

2.1.3.4. Corrientes de Densidad.

Aunque este fenómeno definitivamente no ha sido observado, es necesario señalar que en la Laguna Madre de Texas, se ha demostrado que tiene particular influencia en el mezclado de las aguas hipersalinas con las provenientes del Golfo de México, siendo estas corrientes el resultado de los gradientes vertical y horizontal de salinidad. Innis y Carothers (17) encontraron que el 30% del mezclado de las aguas puede atribuirse a las corrientes de salinidad.

2.2. RECONOCIMIENTO DE LA LAGUNA MADRE DE TAMAULIPAS PREVIO A LOS ESTUDIOS DE CAMPO.

El reconocimiento tuvo como objetivo actualizar la impresión

(17) CAROTHERS H.P. & INNIS H.C.- Design of Inlets for Texas Coastal Fisheries.- Trans. American Society of Civil Engineers. Paper No. 3323 Vol. 127, 1962 Part. IV.

sobre el estado de la Laguna y a la vez poner a punto el programa de Estudios de Campo.

Se hizo una parte desde el aire, utilizando un helicóptero - de Petróleos Mexicanos, bajando a tierra en aquellos sitios donde se tenía interés particular, volando dos días consecutivos a fin de cubrir lo que no hubiera sido posible observar en la primera ocasión. El complemento fue un reconocimiento por tierra en fecha posterior al vuelo.

Las fechas de realización de este reconocimiento fueron 23, 24 y 25 de abril de 1967.

2.2.1. Reconocimiento Aéreo.

En el primer vuelo, el recorrido fue el siguiente: Matamoros hacia el Este, a lo largo del Dren al Mar hasta llegar al pequeño escollerado de protección; observación detenida desde el aire del estado de estas obras; continuándose el vuelo a lo largo del cordón litoral hasta llegar a las 4 bocas de Santa María, eligiéndose desde el aire la o las bocas en las que se requiriese descender a tierra, después de practicar una detallada inspección aérea de cada una de ellas. Se llegó posteriormente, siguiendo la playa, hasta las bocas de San Antonio y Jesús María, descendiendo en cada una de ellas; cruzando enseguida la Laguna para llegar al campamento de Carvajal, y regresar a Matamoros por la ribera Oeste de la Laguna.

El segundo día, saliendo nuevamente de Matamoros, se siguió el curso del Arroyo del Diablo, hasta entrar a la Laguna en su extremo Noreste viajando a lo largo de la ribera Este volviendo a observar desde el aire todas las bocas mencionadas, hasta Carvajal, para reabastecerse de combustible y continuar el vuelo por la ribera Este llegando a la desembocadura del Río soto la Marina donde se hizo una inspección aérea completa de la boca.

En las observaciones realizadas sobre el escollerado del Dren al Mar, se encontró que la escollera Norte está prácticamente cubierta por la arena al grado que puede considerarse inexistente en cuanto a su función. La Sur está algo degradada, presentando un mayor depósito del lado Norte que del Sur sin que la diferencia entre ambos lados sea notable. Sobre el cordón litoral existen dunas activas con su cuerpo orientado según un eje Noreste-Suroeste, es decir, su dirección de desplazamiento será Sureste-Noroeste. La costa es recta y el oleaje presentaba un muy bien desarrollado y definido sistema de transporte por corriente longitudinal, apreciándose claramente corriente de retorno a cada 400 ó 500 m. y hasta 4 líneas de rompiente. La faja donde se acusaba el efecto del transporte litoral tenía un ancho aproximado de 450 m., notándose un cese casi repentino de dicho efecto al terminar esta distancia.

A partir de la zona donde termina el sistema de islotes y canales que se desarrollan en la zona Norte de la Laguna, se -

contró que en todo el cuerpo Norte de ella, entre la desembocadura del Río San Fernando y su límite septentrional hay agua cuya distancia al cordón litoral variaba de los 2 Km. en la zona del Paso de San Juan hasta 6 y 8 Km. aproximadamente. En el área de las bocas de Santa María, la primera de ellas en el recorrido Norte-Sur, la de Santa María, presentaba unos pequeños charcos en sus vecindades, su eje está orientado sensiblemente hacia el SE, y su abertura bien definida entre las dunas que forman el cordón litoral. Existe también un pequeño canal dragado cuyos resultados fueron nulos en cuanto a establecer un flujo del mar hacia la laguna y viceversa.

San Rafael. Había una laguneta pegada a la boca, separada de la línea de playa por una faja de unos 500 m. de ancho y muy baja, lo que hace suponer que esa laguna se formó como resultado del ascenso del nivel del mar, por efectos de las mareas, complementado con la acción del viento del SE que en esta época del año sopla casi ininterrumpidamente. Las dunas adyacentes a la boca se encuentran más o menos fijas por la presencia del zacate de esparto y tienen una altura de 2 a 3 m. La orientación del canal es también SE, la arena es fina en extremo y se aprecia la existencia de algunas conchas pero no en abundancia.

Boca Ciega.- Presentaba un pequeño charco separado del mar una distancia de 400 a 500 m., y un canal artificialmente dragado, que penetra dentro de la Laguna unos 3 Km. sin llegar a alcanzar el espejo actual del agua (ver 1.1.2, refe-

rencia 7).

Sandoval.- En este sitio el ancho del cordón es de unos 2 Km. y únicamente se apreciaban muy pequeños depósitos de agua, el eje del canal, ya no es en una dirección francamente SE, más bien podría decirse que es ESE.

La orientación del canal de salida de estas 4 bocas es posible que se deba en cierto grado a su posición relativa con respecto al cuerpo septentrional de la Laguna, a la dirección de salida de su correspondiente prisma de marea, cuando existía circulación y a la dirección dominante del acarreo litoral.

En la porción septentrional, las áreas de la Laguna, donde existe agua, la profundidad no alcanza el metro, y se estima como profundidad media 60 cm. Según informaciones locales esa agua es consecuencia de las precipitaciones que se tuvieron durante el ciclón Inés ocurrido en octubre de 1966; más hacia el Oeste, estaba totalmente seca y con la presencia del viento SE las tolvaneras alcanzan grandes proporciones cuyas consecuencias sobre la agricultura, la gandería y líneas de transmisión de la Comisión Federal de Electricidad son en extremo costosas. Con respecto a este último punto basta decir que en Matamoros diariamente hay varios "apagones" debido a los costos circuitos que se presentan en las líneas por efecto de la conductividad del polvo atmosférico que se adhiere sobre los elementos aislantes de los conducto-

res de energía eléctrica. Al Sur de las bocas de Santa María existen bocas de menor importancia como es la de Algodones. El espejo de la laguna se acerca hacia el cordón litoral indudablemente debido al avance de la ribera Oeste, por la presencia del delta del Río San Fernando, siendo más o menos a la altura de la Isla del Carrizal donde se encuentra prácticamente la división en dos cuencas (ver 1.2.1 y 1.2.1.3.3) - la septentrional y la meridional-. Desde el aire se aprecia un canal perfectamente definido el cual es deflectado por la presencia de la misma isla y que bien podía tomarse como la liga entre dichas cuencas.

Boca de San Antonio.- La boca de San Antonio presenta algunas características diferentes con respecto a las que se observaron en las cuatro de Santa María, ellas son: la playa - tiene una pendiente más fuerte, trayendo ésto como consecuencia el que la zona de rompientes sea más estrecha y más fuerte, el sistema de corrientes longitudinales no está tan bien desarrollado pero persiste la misma forma de transporte litoral. El extremo Este del canal de salida, está separado del mar unos 200 m. y el agua de la Laguna dista de la línea de playa aproximadamente 2 Km. La arena es más gruesa y está mezclada con conchuela, esto viene a confirmar que la acción del oleaje es más severa, sin que signifique una diferencia notable en extremo, con respecto al resto de la costa hasta el momento descrita.

El eje del canal tiene una orientación sensiblemente E-W e - inclusive huellas de uno secundario con dirección NE. Tal --

vez sea un índice de la presencia de un punto nodal de transporte litoral en esa área de la costa.

Boca de Jesús María.- Existen huellas claras del material que se dragó en la construcción de un canal de dimensiones relativamente pequeñas (ver I.1.2, referencia 3). Se obtuvo el reporte de que después de las lluvias ocasionadas por el ciclón Inés el agua distaba de la costa solamente unos 600 ó 700 m. -2 Km. en la época del reconocimiento-, la orientación del canal es E-W, la arena y la playa tienen características similares a la de la boca de San Antonio.

Cruzando la Laguna, se estimó una profundidad de 50 a 60 cm.- En el campamento de Carvajal por efecto de un viento, de 20 nudos aproximadamente y un fetch corto, quizá 10 Km. el agua avanzaba aproximadamente 80 m. presentando una sobre-elevación de 25 cm. Esta observación se hizo comparando la situación existente durante el primero y segundo días de reconocimiento ya que en el segundo como se mencionará posteriormente, la acción del viento apenas empezaba a dejarse sentir.

De las características restantes observadas durante el viaje de regreso, la más notable fue la relacionada con las tolvaneras que se observaron más o menos a la altura de las 4 Bocas de Santa María; la acción del viento era tan intensa que las tolvaneras alcanzaban una altura superior a los 200 m. - ya que la altura de vuelo del helicóptero era más o menos la señalada y había momentos en que se viajaba dentro de una -

nube de polvo. En el extremo Norte de la Laguna, existen algunas salinas y otras partes en las que el agua por la colocación que tiene está en francas vías de desaparición.

En el segundo día de reconocimiento aéreo, se confirmaron -- las impresiones que se tenían sobre distancia del agua de la Laguna al mar, orientación de canales, existencia de deltas interiores consecuencias del flujo y reflujó de la marea -- cuando las bocas funcionaban; y los sistemas de corrientes -- playeras perfectamente desarrollado. Hubo oportunidad de observar también en las aguas de la Laguna, la presencia de una gran cantidad de material, parte flotando y parte en suspensión, evidente resultado por una parte de la tracción de las aguas sobre el fondo y por otra del transporte eólico.

En el campamento de Carvajal, las aguas se habían retirado -- 30 m. y como el viento del SE empezaba a soplar de nuevo, -- fue posible apreciar la forma como las aguas avanzaban hacia tierra en corrientes superficiales estimadas en unos 10 a 15 cm/seg. El fondo descubierto en la zona de variación de la marea de viento, presentaba las ondulaciones típicas de ese tipo de avance de agua.

Hacia el Sur del campamento de Carvajal se localiza la extensa Bahía del Catán que tenía agua prácticamente en toda su -- extensión.

La parte meridional de la Laguna comprendida entre 8 Km. al Sur del Campamento Carvajal y el Río Soto la Marina se en---

cuentra completamente seca. Bajo la acción de vientos del SE - en esta época se presentaban tolvaneiras fuertes, similares a las de la zona Norte. Después de Jesús María, a lo largo del cordón litoral, existen evidencias del dragado de canales artificiales de comunicación, con los cuales se obtuvieron iguales resultados que en los casos de las bocas de la parte Norte. La acción del oleaje es similar a la que se tiene en la parte Norte, disminuyendo un poco antes de llegar a la boca de Soto la Marina, evidentemente por la presencia del delta de este río.

Barra de Soto la Marina.- El río estaba prácticamente a punto de quedar aislado del mar, ya que el canal de comunicación tenía como máximo alrededor de 20 a 25 m. de ancho y profundidades inferiores al metro según informaciones locales; la causa era que en esta época del año los aportes del río alcanzan apenas 12 a 15 m³/seg. Existía una segunda desembocadura azolvada al Sur que seguramente fue abierta durante el paso del ciclón Inés.

2.2.2. Reconocimiento Terrestre.

Se inició a partir del balneario General Lauro del Villar (antes Playa Washington) habiéndose encontrado, las siguientes condiciones de tránsito.

La playa es perfectamente transitable con marea baja o media, no así en marea alta, pues las olas en algunos sitios llegan a alcanzar el arranque de las dunas, existiendo el riesgo de -

verse detenido. Salvo en tramos en donde la conchuela es abundante, es posible trasladarse en vehículos de tracción sencilla sin mayores dificultades.

Se señaló el camino seguido, colocando tableros en los sitios donde deberían establecerse campamentos, a saber: Boca de Santa María, Boca de San Antonio y Boca de Jesús María. También se localizaron norias de antiguos campamentos de pescadores, en los cuales el agua era potable y en cantidad suficiente, a fin de que las brigadas de estudios la utilizaran.

Las distancias medidas sobre la playa con el odómetro del vehículo a los diversos sitios de interés, tomando como referencia el balneario Lauro del Villar fueron:

L U G A R	DISTANCIA PARCIAL KM.	DISTANCIA ACU- MULADA KM.
Playa Lauro del Villar		0
El Conchillal	10.78	10.78
Escolleras del Dren al Mar	11.74	22.52
Barra de San José	28.16	50.68
El Refugio	6.44	57.12
Las Calabazas	4.34	61.46
El Mezquite	0.72	62.18
Paso San Juan	28.72	90.90
Boca Santa María	6.28	97.18
Boca San Rafael	2.41	99.59
Boca Ciega	2.73	102.32
Boca Sandoval	4.02	106.34
Boca San Antonio	27.67	134.01
Boca Jesús María	24.78	158.79
Barra del Catán	4.82	163.61

ORGANIZACION DEL ESTUDIO

Esta parte formada por dos capítulos presenta aspectos generales referentes a la organización previa al Estudio Regional de la Laguna Madre y la presentación del Plan General de Ingeniería de Proyecto con las modificaciones sufridas a lo largo del estudio.

El primer capítulo tiene como objetivo analizar las comisiones preliminares que visitaron la región en dos ocasiones -- noviembre de 1965 y septiembre de 1966-- a fin de establecer la mejor forma de organizar los estudios así como dejar sentadas las bases para el futuro desarrollo de los mismos.

En el segundo se describen, tanto la organización general de Ingeniería de Proyecto, como el programa integral de estudios y el particular de los trabajos de campo. Posteriormente se mencionan las modificaciones y ampliaciones al programa originalmente previsto, consecuencia del mayor conocimiento que se adquirió sobre el problema, así como también de -- las opiniones del asesor técnico del estudio.

COMISIONES PRELIMINARES

1.1. COMISION DEL 12 AL 15 DE NOVIEMBRE DE 1965.

Esta fue la primera etapa firme para resolver el problema de la Laguna Madre de Tamaulipas. (18)

La misión estuvo integrada por las siguientes personas: Ing. Jorge Cortés Obregón, comisionado a la Secretaría de la Presidencia, Ing. Guillermo Interiano Moyano de la Secretaría de la Presidencia, Sr. Prof. Per Bruun, de la Universidad de Florida, invitado como Ingeniero Consultor, e Ings. Jorge Meyer Corral y Enrique Siller, como invitados especiales. El programa comprendió un amplio recorrido, tanto desde el aire como en tierra, del área de la Laguna Madre. Asimismo se sostuvieron entrevistas con pescadores, agricultores y ganaderos de la región. El complemento al viaje fue un recorrido por la Laguna Madre de Texas, así como una visita a las autoridades del puerto de Brownsville, con objeto de obtener información relativa al caso. Se transcribe enseguida el informe, la proposición inicial de estudios y las conclusiones presentadas por la misión arriba mencionada.

"... C. Informe.

1. Descripción del problema.- La Laguna Madre está separada-

(18) CORTES O.J., INTERIANO M.G., BRUUN P., MEYER C.J. y SILLER F.E.- "Misión a Matamoros, para el Estudio de la Laguna Madre de Tamaulipas". Informe a la Secretaría de la Presidencia. México, noviembre 1965.

del Golfo de México por un cordón litoral. Este cordón litoral ha sido atravesado por varias bocas, las cuales en el tiempo se han abierto y cerrado, dependiendo de las condiciones climatológicas.

El cordón litoral ha sido rebasado por la acción del oleaje y de las mareas de viento, anualmente. La combinación de las entradas de agua salada del mar, de agua dulce de los ríos y del número y posiciones de las bocas, parece que ha sido capaz de mantener abierta la Laguna en el pasado (2 ó 3 bocas).

La frecuencia y magnitud de los huracanes acaecidos en las últimas décadas, ha agravado el problema ya que el mar ha rebasado el cordón litoral y ha arrastrado arena hacia la Laguna quedando ésta ahí atrapada. Ello ha originado una disminución del prisma de marea en la Laguna, lo que ha traído como consecuencia que las bocas no se hayan podido mantener abiertas en forma natural. Este es un ejemplo típico de la forma como evoluciona la costa Oeste del Golfo de México.

La infiltración del agua del Golfo a través del cordón litoral ha sido capaz de mantener parte de la Laguna cubierta con agua, pero a un nivel aproximado de 2 metros abajo del nivel medio del mar.

Los efectos secundarios de este estado de cosas ha sido:

a. La alta salinidad de la Laguna, que es debida a la gran

evaporación que existe en la misma, hasta cierto grado - compensada por la entrada de agua salina del mar. La entrada de agua dulce de los ríos San Fernando y Soto la Marina es relativamente pequeña comparada con las pérdidas por evaporación.

- b. Debido a la alta salinidad mencionada en el punto anterior, las especies marinas que medraban en la Laguna murieron, acabándose la industria pesquera.
- c. Como consecuencia del abatimiento del nivel de agua en la Laguna, existen áreas secas que al ser barridas por el viento aportan arena y polvo que ha perjudicado a la agricultura y ganadería.

Es indudable que el problema general es el expuesto, sin embargo se desconocen cuantitativamente sus características en lo particular, por lo que la mayor parte de las sugerencias que a continuación se proponen, tienen por objeto conocer -- esas características particulares fundamentales para proyectar las obras que permitan la solución más adecuada en un -- tiempo que resulte razonable ante la magnitud del problema.

Una solución sin los estudios considerados como fundamenta-- les y que a continuación se exponen, correría el peligro de constituir otro costoso fracaso ya que como se sabe, tanto -- la iniciativa privada como las autoridades han gastado dinero, tiempo y energías al tratar de resolver el problema sin estos estudios.

2. Estudios propuestos para aclarar el problema y tener la posibilidad de proyectar su solución.

a. Recolección de datos existentes.- Fotografías aéreas, aerofotometrías, topografías parciales, batimetrías, datos de hidráulica marítima, de meteorología e hidrología.

Se considera también indispensable recolectar datos sobre la geología de los suelos y los relativos a la flora y fauna de la región, muy particularmente en las áreas afectadas por el problema expuesto.

b. Aerofotogrametría.- Se recomienda la elaboración inmediata de un mosaico aerofotográfico que abarque toda la Laguna. Para este mosaico se aconseja construir de inmediato los monumentos indispensables para el apoyo de las topografías parciales terrestres y de futuros levantamientos aéreos.

c. Batimetrías locales en los lugares en donde se localizaban las bocas.

d. Medidas de Hidrología Marítima.- Se considera indispensable tomar durante un tiempo no menor de tres meses medidas hidráulicas en la costa, muy principalmente la de la marea, por lo que se aconseja instalar desde luego un mareógrafo en la escollera Sur del dren al mar, así como algunos limnigrafos en la Laguna.

e. Muestreos de materiales.- Conocer las características de los materiales del fondo de la Laguna, del fondo del mar

en la cercanía del litoral y de las dunas del cordón litoral, así como la polución atmosférica de la que se quejan agricultura y ganaderos.

- f. Estudios de infiltración.- A través del cordón litoral - deberán hacerse estudios de infiltración.
- g. Además de los estudios recomendados será necesario contar con un veterinario, con un botánico, y con un geólogo, para hacer los estudios relacionados con estas tres especialidades.
- h. El personal encargado de los estudios deberá contar con la flexibilidad suficiente para poder medir cualquier fenómeno que se presente durante su estancia en el lugar, muy especialmente será necesario contar con la posibilidad de poder disponer de un avión o de un helicóptero, - para medir la altura de los materiales en suspensión en el aire, cuando se presenten los fuertes vientos en la época de secas que se avecina.

Considerando que se trata de un problema serio agravado por la psicosis de los habitantes de la región y considerando -- por otra parte que la época de secas está próxima, la misión aconseja que se realice de inmediato la campaña de medidas, ya que considera que servirá para calmar la alarma de la población y ya que de no iniciarse a tiempo se perderá la posibilidad que presenta la sequía para hacer las observaciones necesarias.

3. Conclusiones.

- 1a. Se aconseja no proseguir ningún trabajo de dragado y no intentar abrir artificialmente ninguna otra boca, — mientras no se tengan los proyectos resultantes de los estudios que se recomiendan.

- 2a. Se aconseja iniciar de inmediato los estudios recomendados pudiéndose aprovechar el tiempo que éstos toman, en ejecutar otros, previendo como solución al problema la construcción de una obra de protección a una boca artificial, esto es, estudios de bancos de materiales para construcción, de agregados, de dosificación de concretos elaborados con arena y agua de mar, de transporte de materiales para construcción y de precios en la zona. Se considera que todos estos estudios pueden tener una duración de tres meses y de acuerdo con lo anotado es de esperarse que basten estos tres meses para iniciar los proyectos.

- 3a. Por las observaciones hechas en esta corta visita, la misión cree que este problema puede solucionarse técnicamente con un gran beneficio para la economía de la región, aunque la solución no satisfaga todas las exigencias de las personas que se sienten afectadas..."

1.2. COMISION DEL 31 DE AGOSTO AL 3 DE SEPTIEMBRE DE 1966.

La siguiente etapa preliminar la constituye este segundo viaje cuyo objetivo primordial fue hacer ver a las fuerzas eco-

nómicas de la región la imposibilidad de iniciar los trabajos de inmediato por lo avanzado de la época de huracanes, señalando que no sería sino a principios del año de 1967 cuando podrían iniciarse los estudios de campo. Se realizó también una nueva inspección aérea de la Laguna para tomar conocimiento del estado que presentaba el área en esa época. En esta ocasión la misión estuvo integrada por: Ing. Jorge Cortés Obregón, comisionado a la Secretaría de la Presidencia, Ing. Guillermo Interiano Moyano, de la Secretaría de la Presidencia, Ing. Enrique Siller, Presidente Municipal de Matamoros y como invitados especiales el Lic. Marco Antonio Rodríguez Macedo, el Ing. Guillermo Macías García, ambos de la Secretaría de la Presidencia. El informe y las conclusiones presentados por las tres primeras personas mencionadas se transcriben en las líneas siguientes: (19)

"... C. Informe.

El estado de la Laguna Madre se ha agravado no obstante estar por terminarse la época de lluvias a tal punto que las áreas secas y batidas por el viento han aumentado considerablemente en relación con la extensión que tenían en el mes de noviembre del año pasado. Esto significa que la infiltración del agua de mar hacia la Laguna, sumada a las lluvias, han sido incapaces de mantener los niveles de agua observados en la visita anterior, en virtud de que la evaporación es un fenómeno muy intenso en esta zona.

En las reuniones celebradas con el Presidente Municipal y

(19) CORTES O.J., INTERIANO M.G. y SILLER F.E. - "Informe del Segundo Viaje de Inspección a la Laguna Madre de Tamaulipas, para el Proyecto de su Estudio". Informe a la Secretaría de la Presidencia. México, septiembre de 1966.

los agricultores y ganaderos, nuevamente se plantearon los - problemas ocasionados por los daños a la agricultura y a la ganadería, debidos a la sequedad de la Laguna.

D. Recomendaciones.

1. Formar la comisión que va a encargarse de organizar los - estudios.
2. Iniciar desde luego la recopilación de datos existentes y la traducción de la literatura científica concerniente a este tipo de problemas.
3. Dotar del presupuesto necesario a la comisión, para sufragar los gastos originados por la recomendación anterior y para que en caso de que desgraciadamente un ciclón azote esa zona esta temporada, puedan hacerse inmediatamente mosaicos aerofotogramétricos, de la Laguna Madre, con las - bocas abiertas, inmediatamente después de la Laguna llena y por último con la Laguna media vacía, ya que los nive--les de agua marcarán en forma precisa las curvas de nive--les del vaso, acusándose además la evolución de las bocas.
4. Preparar el grupo de técnicos y el equipo necesario para- iniciar la campaña de medidas recomendadas anteriormente

****"

ORGANIZACION DE LOS ESTUDIOS DE INGENIERIA DE PROYECTO.

2.1. ESTUDIO REGIONAL DE LA LAGUNA MADRE DE TAMAULIPAS.

En enero de 1967, la Secretaría de la Presidencia, a través de su Dirección de Planeación se abocó a la realización del estudio y proyecto para resolver el problema de la Laguna Madre, designando para organizar el estudio a los ingenieros Jorge Cortés Obregón como Director General y Guillermo Interiano Moyano como Coordinador de la Secretaría de la Presidencia.

La fase siguiente fue integrar el grupo de ingeniería de proyecto. El Ing. Héctor J. López Gutiérrez fue designado como Jefe de Ingeniería de Proyecto, a cuyo cargo quedarían los trabajos de Recopilación y Procesamiento de Datos, Estudio Teórico y Proyecto, los Estudios de Campo y los trabajos de Fotogrametría, y se nombró jefe directo de los estudios de Campo al Ing. Marco Antonio Uribe Rojo. El resto del personal técnico se formó con los siguientes técnicos:

Ing. José Aguilar Alcérreca	Ingeniero consultor
Ing. Daniel Cervantes Castro	Ingeniero consultor
Ing. Agustín Corichi Flores	Ingeniero consultor
Ing. Guillermo Macdonel M.	Ingeniero consultor
Ing. Jorge Galván Sánchez	Ingeniero ayudante

Ing. Anado Rivera Sierra	Ingeniero ayudante
Ing. Mario Echanove	Jefe de brigada
Ing. Isaac Flores Yáñez	Jefe de brigada
Pasante Ricardo P. Vivas	Subjefe de brigada
Pasante Carlos Ortiz	" " "
C. Roberto Carbuno Arana	Dibujante técnico

2.2. PROGRAMA GENERAL DEL ESTUDIO.

El programa quedó dividido en dos grandes partes, Estudios de Proyecto y Estudios de Campo.

2.2.1. Estudios de Proyecto.

Su programa se estableció en forma tal de poder desarrollar una primera etapa sólo con base en las informaciones y estudios previos existentes hasta llevarlo a nivel de anteproyecto. Al mismo tiempo, los estudios de campo se llevaban a cabo, de manera que, los datos aportados por ellos pudiesen irse incorporando al estudio teórico. Finalmente al terminar los estudios de campo, las últimas informaciones recabadas permitirían concluir debidamente el anteproyecto y llevarlo a nivel de proyecto preliminar. De acuerdo con esta idea general, los estudios teóricos se desarrollaron bajo la siguiente secuencia:

- a. Recopilación de datos existentes.
- b. Análisis de datos recopilados.

- i. Determinación de las condiciones medias anuales existentes en la zona con relación a vientos, oleajes y efectos ciclónicos. Precipitación, evaporación, escurremientos y mareas.
 - ii. Determinación de los efectos producidos por los agentes anteriores.
 - iii. Estudios de anteproyecto.
- c. Integración de los datos obtenidos en los estudios de campo a los de proyecto.
 - d. Estudios de proyecto.
 - e. Conclusiones y recomendaciones.

2.2.2. Estudios de Campo.

El programa de estudios de campo se formuló al mismo tiempo que el del estudio teórico. Sin embargo sufrió algunas modificaciones a raíz del viaje de reconocimiento efectuado en abril de 1967 (ver 1-2-2). Aún después de este reconocimiento, los trabajos de campo estaban orientados al estudio de las antiguas bocas, concretamente Santa María, San Rafael, Boca Ciega, Sardoval, San Antonio y Jesús María; además, si las condiciones de tiempo lo permitían, los trabajos se extenderían hasta la desembocadura del Río Soto la Marina. Por esta razón el programa que se transcribe tal y como se planteó, se designó "Programa Condensado para el Estudio de Cada Boca".

"...a. Topografía.

- Poligonación. A cada lado del antiguo eje del canal de salida se levantará una poligonal de 3 Km. de longitud, nivelándola y orientándola astronómicamente el primero y último lados de la misma.
- Seccionamiento.- A cada 200 m. desde la línea de rompientes hasta 1 Km. tierra adentro como mínimo.

b. Hidrografía.

- Mareas.- Para fines de referencia de niveles principalmente, se instalará una regla de mareas, que será leída cada hora en forma ininterrumpida durante el tiempo de estudio.
- Batimetría.- Sondeo del frente marino cubierto por la poligonal hasta la isobata de 10 m.
- Corrientes.- Será necesario medir dos tipos: las litorales y las playeras. Las primeras usando flotadores sujetos, durante un lapso de 24 horas, en dos ocasiones a lo largo del estudio, tomando las mediciones en la superficie, a la mitad del tirante y lo más cercano al fondo. Las mediciones se harán cada hora. Para las corrientes playeras es recomendable el uso de pelotas de playa para su fácil identificación desde tierra. El lapso de medición, el número de veces que se registren y la periodicidad de ese registro, queda a juicio del jefe de estudios de campo.
- Muestreos.- El objeto del muestreo será obtener perfiles de distribución granulométrica, por tanto en cada línea de muestreo se tomarán ejemplares en:

i. Ribera de la laguna.

- ii. Cresta de las dunas.
- iii. Punto índice de la playa.
- iv. Rompientes.
- v. 3 m. de profundidad.
- vi. 6 m. de profundidad.

- Transporte eólico.- Por la importancia de este fenómeno, -- se efectuarán una serie de mediciones orientadas hacia la verificación de los análisis teóricos, usando arenómetros o trampas de arena.

- Acarreo litoral.- En forma tentativa se usarán trampas de arena para el análisis de las tendencias de transporte a lo largo del tiempo de estudio. Podrán usarse aisladamente a diversas profundidades o en conjunto según una línea normal a la de playa.

c. Observaciones diversas.- Comprenderá una serie de informaciones complementarias a las que no podrá dárseles un valor estadístico pero que servirán para la interpretación de algunas mediciones. Entre ellas citaremos básicamente:

- i. Vientos.- Con anemómetro y veleta tres veces por día durante el tiempo de estudio.
- ii. Oleaje.- Principalmente durante las mediciones de corrientes playeras.
- iii. Nivel freático en la Laguna.- Se tratará de observar la variación del nivel freático debido a la intrusión del agua del mar...."

2.3. MODIFICACIONES AL PROGRAMA ORIGINAL.



SECRETARIA DE MARINA
UNIDAD DE HISTORIA
Y CULTURA NAVAL
BIBLIOTECA CENTRAL

Handwritten red numbers: 12, 1263, 1263

El programa original sufrió dos modificaciones substanciales, una de ellas en los estudios de proyecto y la otra en los de campo.

2.3.1. Ampliación de los Estudios de Proyecto.

La ampliación tuvo su origen en la visita realizada por el asesor técnico del estudio Profr. Per Bruun, a principios del mes de junio; la visita se dividió en dos etapas. En la primera comprendió un recorrido a lo largo de la costa hasta la boca de Jesús María; posteriormente hubo una serie de reuniones en Matamoros para discutir el problema. En la segunda se constató el grado de avance de los estudios y al mismo tiempo se hicieron algunas sugerencias que a la postre constituyeron la ampliación de los estudios de proyecto.

En la etapa de Matamoros participaron: Ing. Jorge Cortés Obregón, Director Técnico de los Estudios, Ing. Guillermo Interiano Moyano, coordinador de la Secretaría de la Presidencia con la Oficina de Ingeniería de Proyecto, Profr. Per Bruun, asesor técnico y consultor, Ings. Jorge Meyer y Enrique Siller Flores, invitados especiales, los jefes de la Oficina de Ingeniería de Proyecto y Estudios de Campo, ingenieros Héctor López Gutiérrez y Marco Antonio Uribe Rojo.

Posteriormente durante la segunda fase, en la Ciudad de México, entre las actividades desarrolladas, destacó una reunión conjunta de las siguientes personas: Lic. Enrique Velasco

Ibarra, Subdirector de Planeación de la Secretaría de la Presidencia, Profr. Per Bruun, Ing. Jorge Cortés Obregón, Ing. - Guillermo P. Salas, Director del Instituto de Geología, Dr. - Ismael Herrera E., Director del Instituto de Geofísica, Dr. - Agustín Ayala Castañares, Director del Instituto de Biología e Ingenieros Jorge Meyer y Héctor López, con objeto de plantear la posibilidad de colaboración de los Institutos de la UNAM antes mencionados.

De todo lo citado en los párrafos anteriores se obtuvo una serie de puntos concretos que transcribimos a continuación:

"...3. PLANTEAMIENTO DEL CRITERIO GENERAL Y SOLUCIONES PROBABLES AL PROBLEMA DE LA LAGUNA MADRE DE TAMAULIPAS. (20)

3.1. Introducción.

Es importante que el control del nivel del agua en la Laguna se realice exclusivamente mediante las obras de ingeniería — que garanticen el suministro permanente de agua de mar; es decir, habrá necesidad de evitar que el mar vierta sus aguas en la Laguna pasando sobre el cordón litoral para impedir que el vaso se azolve con la arena procedente de la playa y el mismo cordón. Esto requiere de un estudio sobre la mejor manera de desarrollar y estabilizar las dunas en los sitios que se necesiten.

(20) CORTES O.J., INTERIANO M.G., BRUUN P., MEYER C.J., SILLER F.E., LOPEZ G.H. Y URIBE R.M.A.— Reunión Conjunta para Conocer el Grado de Avance de los Trabajos de Solución al Problema de la Laguna Madre, Tamaulipas.— Informe de la Comisión de Estudios. México, junio 1967.

3.2. Soluciones Probables de Suministro de Agua de Mar.

Para suministrar el agua del mar a la Laguna se consideran - cuatro posibilidades:

3.2.1. Accesos costeros con propagación libre de marea.

3.2.2. Accesos costeros con propagación restringida de marea.

3.2.3. Ductos a presión con control.

3.2.4. Canal abierto-ducto a presión con control.

3.2.1. Accesos Costeros con Propagación Libre de Marea.

Descripción de la Obra.

Canal de sección hidráulica considerable, dragado a través - del cordón litoral, estabilizado a base de la corriente de - marea, protegido por medio de escolleras y probables draga-- dos de mantenimiento.

3.2.1.1. Ventajas.

Es la solución que dará menor salinidad a la Laguna; mayores facilidades de construcción de la obra requerida; permitirá la navegación entre el mar y la Laguna; el llenado será más-- rápido con un nivel del vaso similar al del mar.

3.2.1.2. Desventajas.

El canal requiere estructuras de protección y dragado de cons

trucción costosos y posibles dragados de mantenimiento.

3.2.2. Accesos Costeros con Propagación Restringida de Marea.

Descripción de la Obra.

Canal de sección hidráulica reducida con encauzamiento artificial y flujo unidireccional, originado principalmente por desnivel entre mar y laguna con velocidades mayores que en el caso anterior; el flujo puede ser controlado mediante compuertas.

3.2.1. Ventajas.

Menores dragados de construcción y mantenimiento que en la posibilidad Accesos Costeros con Propagación Libre de Marea. Posibilidades restringidas de navegación.

3.2.2.2. Desventajas.

Nivel de la Laguna inferior al nivel del mar dejando descu---biertas grandes extensiones de fondo; mayor salinidad en las aguas de la Laguna; mayor tiempo de llenado que en el caso - anterior necesidad de proyección y operación de compuertas, - en caso de instalarlas; estructuras de protección del canal - costosas.

3.2.3. Ductos a Presión con Control.

Descripción de la Obra.

Tubos prefabricados que trabajan a presión con velocidades - altas, flujo en una sola dirección, entrada sumergida atravesando rompientes y cordón litoral; protegidos contra la acción del oleaje.

3.2.3.1. Ventajas.

Posibilidad de mínima interferencia con el movimiento de arena en la playa. Dragado de mantenimiento mínimo y concentrado. Menor costo probable de estructura de protección que en los dos casos anteriores.

3.2.3.2. Desventajas.

Mayor desnivel entre la Laguna y el mar exigido por las condiciones de funcionamiento; mucho mayores extensiones de fondo quedarían descubiertas; mayor salinidad en la Laguna; mayor tiempo de llenado; navegación descartada; estudios muy detallados; mayores problemas constructivos.

3.2.4. Canal Abierto Ducto a Presión con Control.

Este sistema es una combinación de los dos anteriores con sus ventajas y desventajas.

Todos los casos permiten en mayor o menor escala, el desarrollo de la industria salinera y de la pesca.

4. RECOMENDACIONES.

De acuerdo con las soluciones probables arriba enunciadas, - se considera conveniente recomendar una serie de estudios y observaciones complementarias tales como:

4.1. Fotogrametría.

Será necesario efectuar los siguientes trabajos fotogramétricos:

4.1.1. Mosaico aéreo de la totalidad de la Laguna Madre (cordón litoral y márgenes incluidas) tomado con película infrarroja para poder conocer la posición de la superficie del agua y si es posible los grados de humedad del fondo descubierto.

4.1.2. Dunas y Bocas. Levantamiento aerofotogramétrico con restitución dando curvas de nivel a cada metro a fin de localizar los sitios de dunas activas que deberán estabilizarse o aquellos donde la carencia de las mismas amerite la formación de ellas, por ejemplo en las bocas.

4.1.3. Liga topográfica terrestre del levantamiento fotogramétrico general del Noreste, realizado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, con el sistema de referencia usado por la comisión de estudios de la Laguna Madre.

4.2. Evaporación.

Por la importancia del fenómeno se ha pensado en la necesidad de determinar con precisión la evaporación en la laguna; a este efecto, se instalarán evaporómetros standard dentro del área lacustre. Los datos obtenidos estarán relacionados íntimamente con mediciones sistemáticas de temperatura y vientos. En el análisis de este fenómeno es necesario considerar el as

pecto de la infiltración ya que por fenómenos de capilaridad podrán existir pérdidas en las márgenes de la Laguna. Cabe señalar que la infiltración entre el mar y la laguna llena se considera despreciable como aportación.

4.3. Mareas.

La determinación precisa del nivel medio del mar que se usará de referencia para todos los trabajos, requiere de la instalación de un mareógrafo. Dicha instalación se hará de inmediato en la escollera Sur de protección del dren al mar construido por la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

4.4. Vientos.

Siendo la marea de viento uno de los fenómenos determinantes en la dinámica de la laguna, se propone realizar un estudio detallado de él mediante la instalación de un grupo de limnigrafos convenientemente localizados, que permitan medir las variaciones de nivel presentadas por el agua de la laguna. Los vientos serán registrados por una estación de observación que los mida a 10 y 30 m. sobre la superficie del agua o a 8 y 20 m. Dicha instalación deberá contar con registro automático.

4.5 Variación de Perfiles Playeros y Línea de Costa.

Para llevar este control se fijarán una serie de puntos a lo largo de la costa a fin de determinar las variaciones estacionales que sufre esta línea; por otra parte, frente a cada

una de las antiguas bocas y en los puntos donde el cordón litoral es más angosto se harán seccionamientos playeros, dos durante el verano y dos durante el invierno, a fin de conocer el efecto de los cambios de oleaje sobre los perfiles de playa.

4.6. Oleaje.

Como complemento a los datos de que se dispondrá a la terminación de la campaña, se sugiere la instalación de un ológrafo que permita obtener el registro continuo de oleaje en un lapso mínimo de un año, debiéndose efectuar simultáneamente observaciones de material en suspensión a diferentes profundidades en un determinado punto a fin de conocer el espesor de la capa del material en suspensión.

4.7. Defensa contra Invasión de Arenas.

Deberá estudiarse también la probable necesidad de proteger la ribera occidental de la Laguna con defensas que eviten el avance de las arenas u otros elementos perjudiciales hacia tierras útiles. Asimismo, de acuerdo con el estudio biológico que determine los posibles daños ocasionados por las grandes concentraciones de polvo en la atmósfera, plantear puntos concretos sobre la forma de resolver este problema.

4.8. Colaboración de los Institutos.

Como resultado de las diversas pláticas sostenidas durante la reunión conjunta, se propuso que los estudios concretos -

que pueden desarrollar los Institutos de Biología, Geología - y Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México serán:

Instituto de Biología:

- Estudio ecológico de la Laguna Madre.
- Vegetación utilizable para la estabilización de dunas y para protección del antiguo lecho de la Laguna, a fin de evitar el ensalitramiento de áreas circundantes al vaso.
- Análisis económico de los daños ocasionados a la agricultura y ganadería por la desecación de la laguna, señalando es pecíficamente en que han consistido dichos daños; posibles efectos de polución atmosférica.

Instituto de Geología.

- Estudio de distribución de dunas en el cordón litoral.
- Análisis granulométricos y de otra índole que requieran las muestras obtenidas por la Brigada de Estudios de Campo.
- Toma de muestras inalteradas y su análisis de laboratorio - para su aplicación en las soluciones probables.
- Localización y análisis de materiales susceptibles de usarse como elementos de construcción (bancos de grava, piedra, etc.)

Instituto de Geofísica.

- Instalación y operación de seis limnigrafos o mareógrafos - en el interior de la laguna para estudio de mareas de viento.

- Instalación y operación de una torre de observación con instrumento para el registro continuo de los vientos a 10 y 30 metros de altura o a 8 y 20 metros. La torre quedará sobre el vaso actual.
- Operación del mareógrafo que será instalado en la escolle^{ra} sur del dren al mar y determinación, con base en los datos obtenidos y los existentes en Brazos Santiago, Texas, del nivel medio del mar.

5. CONCLUSION.

De todo lo anterior se ratifica la conclusión 3.2. del informe del 17 de noviembre de 1965 (18) en la que se decía "... Por las observaciones hechas en esta corta visita, la misión cree que este problema puede solucionarse técnicamente con un gran beneficio para la economía de la región, aunque la solución no satisfaga todas las exigencias de las personas que se sienten afectadas ..."

Por otra parte, al continuar con los estudios de proyecto y profundizar sobre el problema, se encontró que los sitios menos apropiados para localizar entradas a la laguna, por las razones que citaremos en II.2.4., son las bocas en las que originalmente se había pensado; esto llevó a la búsqueda de los sitios más apropiados a este fin. Del análisis de fotografías aéreas se eligieron dos, uno en el Norte en el lugar denominado Médano Prieto y más concretamente: Paso San Juan y otro en el Sur la boca del Catán, frente a la

(18) Op. cit.

laguna del mismo nombre. Para desarrollar los proyectos correspondientes se hizo necesario solicitar los datos de campo correspondientes, circunstancia por la cual el programa de campo se amplió en la forma siguiente.

2.3.2. Ampliación de los Estudios de Campo.

De acuerdo con las necesidades de proyecto se elaboró el programa de trabajo complementario transcrito a continuación:

"... 1. Levantamiento de Paso de San Juan.

En el sitio denominado Paso de San Juan deberá levantarse dicho paso con secciones transversales a cada 50 m. extendiéndose 150 metros a ambos lados del eje del Paso de San Juan y en una longitud según dicho eje de 1500 m. o menos, si antes de alcanzar dicha distancia se llega a la ribera de la laguna.

Deberán también localizarse aproximadamente los obstáculos que existan en el interior de la laguna considerando el posible trazo de un canal de entrada en ese sitio.

2. Boca del Catán.

Bautizada tentativamente con este nombre, esta antigua boca localizada aproximadamente 5 Km. al Sur de Jesús María deberá levantarse en igual forma que la anterior, variando, claro está, la longitud según el eje de dicha boca.

En ambos casos la sección según el eje de dichos pasos llega-

rá si es posible hasta la línea de rompientes.

3. Seccionamiento de la Laguna.

Con apoyo en la poligonal general playera se hará un seccionamiento de la laguna, quedando a juicio del Jefe de Estudios los cambios en la localización de dichas secciones, así como detalles complementarios que se juzgasen necesarios para el desarrollo del estudio ..."

2.4. CRITERIO GENERAL DE SELECCION DE SITIOS PARA OBRAS DE ALIMENTACION.

Como se mencionó en II.2.3.1. el criterio originalmente establecido respecto de la localización de bocas de alimentación, se modificó al establecerse las siguientes condiciones que deberían satisfacer dichas bocas:

- a. Estar en una zona de dunas perfectamente estabilizadas y lo suficientemente robustecidas, para soportar condiciones severas de viento y oleaje.
- b. El ancho del cordón, no obstante lo robusto que fuera, no deberá ser excesivo para evitar excavaciones y dragados considerables, a la vez que longitudes de conducción tales que las pérdidas por fricción obligaran a dimensiones de obras mayores.
- c. Las obras exteriores de protección deberían de quedar perfectamente ancladas a fin de evitar fallas en los arranques.

Con base en estas ideas, se eliminó la posibilidad de utiliza

ción de las bocas tradicionales de la laguna por presentar - los inconvenientes siguientes:

- a. Dunas móviles y pequeñas a ambos lados de la boca; la totalidad de ellas son muy planas y a un nivel muy cercano al medio del mar, lo que facilita la invasión de él durante - tormenta, con grandes problemas si se pretendiese contro-- lar esta invasión.
- b. Extensas plataformas de depósito frente a las bocas que - obligan a dragados interiores considerables.
- c. Problemas de estabilización y desarrollo de dunas y, consecuentemente un aumento de costo en obras especiales para - asegurar el anclaje adecuado de las obras de protección en tanto las dunas llegaran a cumplir esta misión.
- d. No existe protección alguna en contra de la acción del viento si la obra a realizar fuese canal a cielo abierto.

En base a una inspección a los lugares elegidos en aerofoto-- grafías, se encontró que sus características eran las siguientes:

Para la zona Norte de la Laguna se localizó el lugar denominado como Paso de San Juan que reúne las siguientes ventajas:

- Dunas hasta de 5 a 6 metros perfectamente estabilizadas y - protegiendo, dada su orientación, cualquier obra a través - del cordón.
- Ancho de la zona de dunas altas de apenas 100 a 200 m. y total del cordón litoral hasta la ribera de la Laguna de unos 1500 m.
- Las mayores profundidades de toda la Laguna están a sólo -

3 Km. aproximadamente de la línea de costa.

- Valles, entre las dunas, con ancho suficiente para alojar - cualquier tipo de comunicación entre Laguna y mar.

La zona Centro-Sur de la laguna no presenta características - del cordón tan apropiadas como las anteriores, sin embargo se localizó el sitio denominado Boca del Catán (Barra de los Almirantes) cuyas condiciones son:

- Dunas estabilizadas, aunque bajas.
- Corte en el cordón con condiciones de protección y desarrollo adecuado, utilizable para la conexión laguna-mar.
- La Bahía del Catán, sitio señalado como ventajoso en cuanto a capacidad de almacenamiento y punto focal de gran producción pesquera está frente a este sitio.
- Presencia de bancos de piedra susceptibles de utilizarse como material de núcleo.

2.5. PROYECTO PRELIMINAR.

En los capítulos subsecuentes aparece con todo detalle los estudios generales y análisis de los diferentes anteproyectos - propuestos en II.2.3.1. Como resultado de una reunión conjunta celebrada a fines de agosto de 1967 (21), se seleccionó el anteproyecto que debería ser llevado a nivel de proyecto preliminar. En dicha reunión participaron los Ingenieros Jorge - Cortés Obregón, Jorge Meyer, Héctor López Gutiérrez, José Agui - lar Alcérreca, Daniel Cervantes Castro y Guillermo Macdonel. - Después de analizar cada uno de los anteproyectos, se llegó a las siguientes:

(21) CORTES O.J., MEYER C.J., INTERIANO M.G., LOPEZ G.H., AGUI - LAR A.J., CERVANTES C.D. y MACDONEL M.G.- Acta de la Jun - ta Celebrada para Definir el Anteproyecto de Solución al Problema de la Laguna Madre que será llevado a Nivel de - Proyecto Preliminar.- Informe de la Comisión de Estudios. México, agosto 1967.

"... CONCLUSIONES:

- 1o. La solución del canal a marea libre será la que se lleve a nivel de proyecto preliminar, señalando que la longitud de las escolleras propuestas debe tomarse como una primera etapa que pudiera llegar a ser la única si las condiciones de funcionamiento resultan conforme a lo previsto en el estudio teórico, pero conviniéndose que existe la posibilidad de aumentarlas en su longitud cierto tiempo después de terminada la obra, si los resultados no fueren los supuestos.
- 2o. Es necesario continuar con mediciones sistemáticas con el objeto de disponer de los mayores elementos cuando la obra se realice, así como para los fines inmediatos que representa la construcción de un modelo hidráulico reducido.
- 3o. Se sugirió al Ing. Jorge Meyer presentara una proposición respecto de las características y coste que podría tener un primer modelo piloto de fondo fijo cuyo objetivo sería confirmar o modificar los sitios de localización de las bocas elegidas, siempre y cuando las características topográficas locales lo permitiesen.
- 4o. A partir de los resultados del modelo de fondo fijo y una vez hecho los ajustes correspondientes se procedería a la construcción de un modelo de fondo móvil de cada una de las bocas elegidas que permitiría no solo afinar al máximo el proyecto sino además tener la facilidad de llevar un control de las bocas durante la etapa de realización de las obras ..."

ESTUDIO DE CONDICIONES NATURALES

Esta parte analiza y procesa datos generales sobre las condiciones físicas del área, interpretándolos de acuerdo con las necesidades del estudio.

Se incluyen también aspectos de tipo teórico en relación con los fenómenos físicos e hidráulicos presentados.

Los capítulos constituyentes son:

Capítulo 1. CARACTERISTICAS Y FENOMENOS FISICOS GENERALES EN EL AREA.

Es una recopilación de datos tales como precipitación, evaporación, escurrimientos, vientos, oleajes, etc. acompañada en algunos casos de aspectos teóricos sobre el fenómeno respectivo.

Capítulo 2. ESTUDIO HIDROLOGICO.

Está consagrado a estudiar los resultados de las diversas combinaciones: precipitación, escurrimientos, evaporación sobre los estados de la Laguna en relación a sus niveles, áreas y volúmenes.

Capítulo 3. REGIMEN DEL LITORAL Y AREA LACUSTRE.

Se analizan los agentes cuya influencia es directa sobre el régimen del litoral y área lacustre, presentándolos primero bajo un punto de vista teórico y posteriormente su valuación para el caso específico de la Laguna Madre.

Capítulo 4. ENTRADAS A MAREA LIBRE.

Tiene como objetivo enfocar bajo un punto de vista puramente teórico, el funcionamiento de las entradas a marea libre y sus efectos sobre el cuerpo interior de aguas en relación con problemas de disminución de salinidad.

CARACTERISTICAS Y FENOMENOS
FISICOS GENERALES EN EL AREA

1.1. DATOS HIDROLOGICOS GENERALES. (*)

1.1.1. Sistema Fluvial.

El sistema fluvial que integra la región de la Laguna Madre queda comprendido dentro de la región Golfo-Norte (22), de acuerdo con la zonificación de la República hecha por la secretaría de Recursos Hidráulicos.

La región está localizada aproximadamente entre los 22°00' y los 25°40' de latitud Norte y los 97°40' y 100°50' de longitud Oeste de Greenwich. Abarca los ríos que desembocan en el Golfo de México en la parte septentrional de la República, excepción hecha del Río Bravo.

En esta parte del territorio mexicano se encuentran las corrientes que con mayor frecuencia reciben la influencia de los ciclones tropicales (ver III-1.2) los cuales, después de atravesar el Golfo de México, penetran casi todos los años en esta zona. Como consecuencia, y aunque se trata de ríos poco caudalesos, de tiempo en tiempo generan grandes avenidas originadas principalmente por precipitaciones de

(*) Todos los datos utilizados fueron proporcionados por la Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

(22) SECRETARIA DE RECURSOS HIDRAULICOS. Datos de la Región Golfo-Norte. Boletín Hidrológico No. 8, Servicio Hidrológico, México, Julio 1951.

carácter ciclónico.

En particular, los principales ríos, que integran la región de la Laguna Madre son el Río San Fernando y el Río Soto la Marina, además de algunos otros conjuntos de menor importancia que descargan ya sea en la Laguna Madre o directamente al Golfo de México.

Río San Fernando.

El Río San Fernando llamado también Río Conchos, es la primera corriente netamente mexicana que descarga en el Golfo de México. Está formada por los Ríos Potosí y Pablillo que nacen en la Sierra Madre Oriental, a unos 60 Km. al Oeste de Linares. Estos dos ríos se unen unos 30 Km. aguas abajo de Linares para formar el Río Conchos, con cuyo nombre corre una gran parte de su curso, tomando después el de San Fernando al pasar por el poblado de este nombre en el Estado de Tamaulipas. En este tramo se le unen varios arroyos, el San Lorenzo a la altura de Méndez y el de Burgos. Finalmente descarga en la Laguna Madre en un amplio delta, dando lugar a lagunetas, ciénegas y pantanos.

La superficie de la cuenca, hasta el sitio de San Fernando es de 14,180 Km², y la precipitación media anual en el período de 1931 a 1950 ha sido de 678 mm. Su altura sobre el nivel del mar puede juzgarse por la de algunos sitios como:

San Fernando 43 m.

Méndez	128 m.
Linares	360 m.
Iturbide	1494 m.
Galeana	1654 m.

En la sierra llegan a encontrarse alturas que sobrepasan los 2000 m.

El escurrimiento del Río San Fernando puede considerarse perenne, aunque en algunos años se ha llegado a secar completamente durante uno o dos meses del estiaje.

El escurrimiento máximo anual registrado corresponde al año de 1933 en que se observó un volumen de 4678 millones de metros cúbicos -en este año se presentó una gran actividad ciclónica en la zona- y el mínimo del período ha sido el del año 1949, con sólo 227 millones de metros cúbicos.

En esta cuenca se han hecho observaciones sistemáticas y regulares desde 1931 hasta la fecha en la estación hidrométrica de San Fernando, situada cerca del poblado del mismo nombre y a una distancia de 82 km. de la desembocadura por el río y 54 km. en línea recta.

Río Soto la Marina.

Esta corriente nace en la Sierra Madre Oriental y está formada por el Río Blanco que después se llama Purificación, y el

Río Alamos que más adelante recibe el nombre de Santa Engracia.

Después de la confluencia de éstos toma el nombre de Soto la Marina y pasa por el poblado de este nombre, de donde continúa para descargar sus aguas en la Barra de Soto la Marina, directamente en el Golfo de México.

La Dirección de la corriente, como todas las de esta región es de poniente a oriente, con sinuosidades más o menos grande.

La superficie de la cuenca es de 21,481 km² con una precipitación media de unos 800 mm. al año.

1.1.2.1. RESUMEN (ver Plano LM-3).

a. Río San Fernando. Hasta la Estación San Fernando (datos - 1931-1965).

Volumen escurrido máximo anual

(1933): 4678.03 x 10⁶ m³

Volumen escurrido medio anual: 665.44 x 10⁶ m³

Volumen escurrido mínimo anual

(1952): 179.04 x 10⁶ m³

Gasto máximo observado: 1718 m³/seg.

Gasto mínimo observado: 0.0 m³/seg.

Escorrimento medio anual aguas abajo desde San Fernando hasta

la Laguna en su desembocadura: 303.5 x 10⁶ m³

Precipitación media anual: 618.6 mm.

Evaporación media anual: 1907.9 mm.
Temperatura media anual: 23.8°C

b. Río Soto la Marina. Hasta la Estación "La Sonadora" (datos 1960-1964).

Volumen escurrido máximo anual
(1960): $493.381 \times 10^6 \text{ m}^3$
Volumen escurrido medio anual: $425.764 \times 10^6 \text{ m}^3$
Volumen escurrido mínimo anual
(1963): $277.920 \times 10^6 \text{ m}^3$
Gasto máximo observado: $640 \text{ m}^3/\text{seg.}$
Gasto mínimo observado: $0.0 \text{ m}^3/\text{seg.}$
Precipitación media anual: 649.2 mm.
Temperatura media anual: 24.7°C
Evaporación media anual: 2132.4 mm.

c. Estación La Piedad, Tamps.

Precipitación media anual: 521.8 mm.
Evaporación media anual: 2043.2 mm.
Temperatura media anual: 23.4°C

d. Estación Soto la Marina, Tamps.

Precipitación media anual: 743.6 mm.
Temperatura media anual: 24.0°C

e. Estación Matamoros, Tamps.

Precipitación media anual: 644.1 mm.

Evaporación media anual:	1905.2 mm.
Temperatura media anual:	23.2°C

1.1.3. Efectos de Capilaridad e Infiltración.

En el estudio completo de pérdidas y aportes a la laguna es necesario mencionar los aspectos referentes a los efectos de capilaridad e infiltración. Sin embargo una valuación del volumen infiltrado o del evaporado por efectos de capilaridad sin disponer de una información completa de las características de fondo y márgenes en la laguna, carecería de validez aun en primer grado de aproximación, por tanto, nos concretaremos a presentar algunos aspectos generales -- sobre este tema, dejando para el capítulo de conclusiones y recomendaciones, la enumeración de los trabajos de campo re queridos para su evaluación.

1.1.3.1. Capilaridad.- En las riberas de un río o una laguna, existe una zona húmeda llamada margen capilar en la cual el agua llega a ella por efecto de capilaridad. Algunos autores (23) señalan que esa zona puede variar de 30 a 60 cm. en arena, hasta 3 m. en suelos arcillosos. En el caso específico de la Laguna Madre este fenómeno puede ser significativo tanto en lo que se refiere al tiempo de llenado como para el análisis de evaporación. En el primer caso hay que

(23) LEE C.H.- Transpiration and Total Evaporation.- Hidrology Vol. IX.- Physics of the Earth. Mc. Gray Hill Book Co. 1942.

considerar que para elevar el nivel del agua en la Laguna es necesario saturar primero esa margen capilar, en tanto que para el segundo se debe tomar en cuenta que los efectos de evaporación pueden dejarse sentir hasta 6 ó 7 m. de profundidad (24), además por lo plano del terreno en gran parte de las riberas de la Laguna los 30 a 60 cm. de la margen capilar construirán una fuente importante de pérdida de agua.

1.1.3.2. Infiltración.- En acuíferos costeros en contacto con el mar, los niveles freáticos presentan variaciones senoidales resultantes de las mareas. La amplitud de estas ondas varía con la distancia tierra adentro y los retrasos con respecto a un máximo son mayores a medida que esa distancia aumenta. El problema del análisis de propagación se resolvió haciendo una analogía con la conducción del calor en un sólido semi infinito, sujeto a variaciones periódicas de temperatura en el sentido normal a la dimensión infinita.

A partir de las ecuaciones para flujo no permanente, la ecuación que gobierna el movimiento es (25):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots 1.1.3.1.$$

donde:

h = variación de la superficie piezométrica con respecto al nivel medio.

(24) WILLIAMS G.R.- Hydrology. Chapter IV.- Engineering Hydraulics. Edited by Hunter Rouse.- John Wiley & Sons. New York. 1961.
 (25) TODD D.K.- Ground Water Hydrology.- John Wiley & Sons. August 1963 .

x = distancia tierra adentro a partir de la salida del acuífero al mar.

S = coeficiente de almacenamiento del acuífero.

T = coeficiente de transmisibilidad.

t = tiempo.

Si la amplitud de la marea es h_0 , la velocidad angular del movimiento periódico es ω , para un período de marea T_0 , la solución de la ecuación anterior es:

$$h = h_0 e^{-x \sqrt{\pi S / T_0 T}} \sin\left(\frac{2 \pi t}{T_0} - x \sqrt{\pi S / T_0 T}\right) \dots 1.1.3.2$$

Los casos, de acuerdo con el grado de confinamiento del acuífero pueden ser los mostrados en la figura 1.1.3.1. (*)

Hace más de 50 años dos investigadores, trabajando independientemente a lo largo de las costas de Europa, encontraron que el agua de mar se encuentra bajo tierra no al nivel de éste sino a uno más bajo, cerca de 4 veces la altura del agua dulce sobre el nivel del mar. Esta distribución se atribuyó al equilibrio hidrostático entre los dos fluidos de diferentes densidades. A la ecuación obtenida para explicar el fenómeno se llama relación Ghyben-Herzberg.

En la figura 1.1.3.2. se representa una sección transversal costera de un acuífero no confinado.

(*) Se omite la figura.

Ecuación de la relación Ghyben-Herzberg:

$$h_g \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} = h_f \quad \dots\dots\dots 1.1.3.3.$$

Tomando:

$$\gamma_s = 1.025 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma_f = 1.000 \text{ gr/cm}^3$$

$$h_g = 40 h_f \quad \dots\dots\dots 1.1.3.4.$$

La intrusión está limitada por la extensión del acuífero y - la posición del nivel freático.

Por otra parte, en acuíferos costeros en comunicación con el mar, existe, para condiciones normales, flujo de agua dulce hacia el mar. Sin embargo un abatimiento de su nivel puede - ocasionar que el flujo se invierta, entrando agua de mar a - ellos, a este fenómeno se le llama intrusión del agua del - mar.

En virtud de la relación de Ghyben-Herzberg, deberá existir una cuña de agua salada en la intersección de un acuífero --- con el océano. Suponiendo que existe hacia el océano con flujo de agua dulce "q" por unidad de frente de océano, la relación aproximada para un acuífero confinado:

$$q = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f} \right) \frac{K b^2}{L} \quad \dots\dots\dots 1.1.3.5.$$

puede derivarse partiendo de la Ley de Darcy, donde γ_f y γ_s

son las densidades del agua dulce y del agua salada respectivamente, b y L se encuentran en la figura 1.1.3.3 y K es el coeficiente de permeabilidad.

La ecuación (1.1.3.5) indica que para acuíferos uniformes y condiciones fluidas, la longitud de la cuña introducida es inversamente proporcional al flujo de agua dulce. Esta ecuación puede aplicarse a acuíferos no confinados sustituyendo b , por la capa saturada, ya que el flujo no se desvía considerablemente de la horizontal. Pruebas con modelos de arenas hechas en la Universidad de California comprobaron la validez de la ecuación.

Es conveniente insistir en que la aplicación de los conceptos anteriores requiere un conocimiento completo de las condiciones de permeabilidad, confinamiento o no confinamiento, y en general de aquellos factores relacionados con el fenómeno, por tanto para la Laguna Madre no será posible, ni aún en primera aproximación, efectuar cálculos en relación con estos temas.

1.2. VIENTOS, HURACANES Y TORMENTAS TROPICALES.

1.2.1. Vientos.

En el problema que estudiamos, es de primordial importancia el conocimiento de las características del viento, tanto por ser el elemento generador del oleaje, cuya influencia -

sobre el régimen de costas es definitiva, como por su función como agente generador de mareas de viento y además por las fuerzas horizontales y verticales, que produce sobre es estructuras en general.

1.2.1.1. Generación de los Vientos.

El viento tal como lo observamos, es el resultado del desplazamiento horizontal de masas de aire, Cuando este movimiento es en sentido vertical se denomina simplemente corriente de aire.

Los vientos son el resultado de diferencias horizontales de presión, es decir como consecuencia de la diferencia de presión atmosférica habrá un desplazamiento de masas de aire de las zonas de alta presión a las de baja presión. La velocidad de desplazamiento será función del gradiente de presión y en ausencia de factores extraños al fenómeno, el movimiento será normal a las líneas de igual presión o curvas isobáricas.

En consecuencia, tenemos que la fuerza que produce el viento F_g es función del gradiente de presión horizontal $\frac{\partial P}{\partial l}$ y como actúa sobre las masas de aire, le será también de la densidad, ρ , de las mismas, esto es:

$$F_g = \frac{\partial P}{\partial l} \frac{1}{\rho a}$$

Los factores que afectan y modifican las características del

viento por gradiente son:

- i. Fuerza de Coriolis
- ii. Fuerza Ciclostrofica.
- iii. Efectos de fricción.

i. Fuerza de Coriolis. Esta fuerza comunmente llamada tambien fuerza de arrastre es debida al efecto de rotación de la tierra. Una visualización simple del efecto de esta fuerza puede darse en la siguiente forma (26). Suponiendo que un punto de la tierra se considere alojado en un plano horizontal con eje de rotación según los polos. Si del centro de rotación O se lanza un objeto según un radio, hacia un punto A de la periferia, un observador extraterrestre lo verá moverse en una trayectoria recta O A, no obstante que por el movimiento de rotación el punto A pasó a segunda posición A*.

Si ahora el observador se sitúa en O, viendo hacia A, la impresión que tendrá del movimiento es que fue según una trayectoria curva, es decir de acuerdo con el sentido de rotación de la Tierra y en el Hemisferio Norte, el objeto parecerá haberse desviado hacia la derecha. Esta desviación aparente se conoce como efecto de Coriolis y la fuerza de Coriolis por unidad de masa puede expresarse como

$$F_d = 2 \omega v \text{ sen } \phi \quad \dots\dots\dots 1.2.1.$$

ϕ = latitud

ω = velocidad angular de rotación de la tierra.

(26) LINSLEY R.K., KOHLER M.A. & PAULHUS J.L.- Applied Hydrology.- Mc Graw Hill Book Co. 1949.

v = velocidad de la partícula de aire.

Esta fuerza siempre actúa en ángulo recto respecto de la dirección instantánea de movimiento, por lo tanto afecta su dirección pero no su velocidad.

ii. Fuerza Ciclostrófica. Es consecuencia de la fuerza Centrifuga, la cual en general cuando las isobaras son curvas tiende a dirigir el aire en su sentido de acción, a través de las isobaras.

La fuerza ciclostrófica es la componente tangencial a la superficie de la Tierra, de la fuerza centrífuga en un punto dado y vale:

$$F_c = \frac{v^2}{r \operatorname{tg} \varphi} \quad \dots\dots 1.2.2.$$

v = velocidad de movimiento de la partícula

r = radio de la Tierra

φ = ángulo entre la fuerza centrífuga y su componente horizontal.

iii. Fricción. En general el efecto de la fricción es reducir el valor de la velocidad y en consecuencia el de las --- fuerzas de Coriolis y Ciclostrófica. Ese efecto se traduce, en general, en una desviación en la dirección del viento.

1.2.1.2. Clasificación Dinámica del Viento.

De acuerdo con las fuerzas actuantes sobre el viento propia-

mente dicho, se pueden distinguir dos tipos diferentes:

i. Viento geostrófico. Existe como resultado de la acción de la fuerza de gradiente y la de Coriolis. En cuanto a la ciclostrófica, no actúa debido a que las isobaras en este caso son rectas. La dirección del viento es paralela a la de las isobaras.

ii. Viento bórico. La curvatura de las isobaras induce la acción de la fuerza ciclostrófica además de las de gradiente y Coriolis. La dirección sigue siendo tangente a las isobaras. Es decir el viento geostrófico puede considerarse como un caso particular del bórico. Ahora bien la fuerza de fricción deja sentir sus efectos para alturas menores a 700 m. y en la superficie de la tierra ocasiona que la dirección del viento observado varíe entre 15° y 40° con la del viento observado, bórico o geostrófico.

El primer caso es para la superficie del mar, en tanto que el segundo es para tierra firme.

1.2.1.3. Vientos Reinantes y Dominantes.

La observación sistemática de los vientos en un área determinada permite establecer una clasificación de los vientos, basada en su persistencia e intensidad, así se denomina viento reinante el más frecuente, según una dirección dada, independientemente de su intensidad, en tanto que el dominante es el viento más intenso independientemente de su frecuencia. Para determinar las características de estos vientos se acog

tumbra representar el resultado de las mediciones en tres diagramas llamados "Diagrama de Lenz" que a continuación se anotan:

i. El número de veces que ha soplado el viento en cada dirección (en % del número de observaciones hechas), indicando así su frecuencia; se le conoce con el nombre de "Gráfica de Frecuencias" o de "n". Con ella se define la dirección del viento reinante.

ii. En la gráfica "nV", se toma en cuenta en forma conjunta la frecuencia y la velocidad del viento, sumándolas según se observaron para cada dirección. Esta gráfica tiene particular aplicación en los estudios de transporte eólico.

iii. La gráfica denominada simplemente "gráfica de V^2 "; se utiliza para apreciar la presión que se puede ejercer sobre una estructura, ya que ésta es función de la velocidad del viento al cuadrado. Esta gráfica permite determinar el viento dominante.

De las diversas fuentes de información (27), (28), (29), se obtuvo la siguiente documentación en relación con el régimen de vientos en la costa de Tamaulipas y en el área de estudio.

Las gráficas correspondientes se presentan en el plano LM-4 -

-
- (27) U.S. NAVAL OCEANOGRAPHIC OFFICE.- Oceanographic Atlas of the North Atlantic Ocean.- Section IV, Sea and Swell.- Secretary of the Navy. Pub. No. 700, Washington 1963.
- (28) DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y LABORATORIOS.- Estudio de Vientos en Diferentes Puertos de la República Mexicana. Secretaría de Marina. Memoria No. 20, México, Dic. 1964.
- (29) DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y LABORATORIOS.- Estudio en Modelo Reducido para el Puerto de Matamoros, Tamps.- Secretaría de Marina, Memoria No. 5, México, enero 1964.

TABLA 1.2.1.

VIENTO REINANTE "n"

(23° Latitud Norte, 96°30' Longitud Oeste)

Mes	Dirección	n _m (en%)	Calmas _m en %	No. de Observaciones.
E	Norte	22	8	896
F	N, SE	19, 21	10	1002
M	Este	24	10	934
A	Este	30	8	895
M	Este	27	8	892
J	Este	34	11	1067
J	Este	27	13	1057
A	Este	27	20	1108
S	N, NE, S, NW	16, 16, 16, 15	12	1193
O	Norte	19	14	1276
N	Norte	21	7	1092
D	N, Se, NW	18, 21, 19	10	1072

TABLA 1.2.2

"n V"

Mes	Dirección	(nV) m
Enero	Norte	171.1
Febrero	N, SE	174.0, 137.7
Marzo	N, E	126.8, 122.0
Abril	Este	157.1
Mayo	Este	139.5
Junio	Este	182.5
Julio	Este	132.0
Agosto	Este	132.8

Mes	Dirección	(nV) m
Septiembre	N, NW	105.1, 119.9
Octubre	Norte	134.3
Noviembre	Norte	160.3
Diciembre	Noroeste	174.7

TABLA 1.2.3.
VIENTO DOMINANTE

Mes	Dirección	V_3 máx. m ³ /seg.	V^2
Enero	N, NW	18	314
Febrero	Norte	16	256
Marzo	Noroeste	16	256
Abril	Norte	15.4	239
Mayo	Sureste	14	196
Junio	E, SE	14	196
Julio	Sureste	14	196
Agosto	E, SE	15	225
Septiembre	Noroeste	25	265
Octubre	Noroeste	20	400
Noviembre	N, NW	18	314
Diciembre	Noroeste	18	314

RESUMEN:

Viento reinante n anual:

Dirección: Este

n_r (% relativo) = 24, o sea que el 24% de los vientos que soplan en el año vienen del Este.

TABLA 1.2.4.

MATAMOROS, TAMPS.

	N	NNE	NE	SNE	E	ESE	SE	SSE
n	90	51	59	61	237	283	1414	64
nV	490.9	358.3	327.9	379.8	1348.3	1847.8	11307.0	489.3
V _{máx.}	12.9	12.9	10.3	10.3	12.9	12.9	18.0	15.4
V ² _{máx.}	166.4	166.4	106.1	106.1	166.4	166.4	324	237.2

	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
n	42	2	6	28	118	97	445	48
nV	160.4	7.7	22.1	196.3	591.1	703.2	3326.1	419.0
V _{máx.}	7.7	5.1	10.3	25.2	18.0	18.0	18.0	15.4
V ² _{máx.}	59.3	26.0	106.1	686.4	324.0	324.0	324.0	237.2

No. total de observaciones: 3344

Calmas: 310

La velocidad está dada en metros por segundo.

Viento reinante n: SE n= 1414

Viento reinante nV: SE nV= 11307.0 m/seg .*. V media = 8 m/seg

Viento dominante : WSW $V^2 = 686.4 \text{ m}^2/\text{seg}^2$; Vmax. = 26.2 m/seg.

Los vientos huracanados máximos que se han presentado en el área hasta 1964, fueron de 41.2 m/seg. (148 Km/hr).

TABLA 1.2.5.

BOTO LA MARINA, TAMPS.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
n	104	24	97	88	378	595	753	37
nV	432	140	346	307	2000	2097	6165	373
V máx	19.0	18.0	18.0	15.0	12.0	19.0	27.0	22.0
V^2 máx	361.0	324.0	324.0	225.0	144.0	361.0	729.0	484.0

	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
n	26	4	12	5	19	14	201	227
nV	189	18	55	13	58	50	1356	737
V máx	18.0	8.0	18.0	6.0	8.0	10.0	8.0	23.0
V^2 máx	324.0	64.0	324.0	36.0	64.0	100.0	64.0	529.0

No. total de observaciones 3996

Calmas: 1365

La velocidad está dada en metros por segundo.

Los datos fueron tomados de los registros del Servicio Meteorológico Nacional de la Secretaría de Agricultura y Ganadería.

Se tomaron 3 lecturas diarias.

Viento reinante n: SE n = 753

Viento reinante nV:SE nV = 6165 .°. Vm = 8.19 m/seg.

Viento dominante: SE $V^2 = 729$; Vmáx= 27 m/seg.

TABLA 1.2.6
TAMPICO, TAMPS.

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
n	1075	108	412	444	1860	536	284	78
nV	3444.5	363.0	912.5	1082.7	3664.7	1449.3	626.8	165.9
Vmáx	36.0	23.9	28.1	15.9	19.0	18.8	48.0	16.6
V^2 máx	1296.0	571.21	789.61	252.81	361.0	353.44	2304.0	275.56

	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
n	32	7	16	16	55	48	95	86
nV	47.8	7.5	35.4	35.7	94.3	110.6	342.9	240.0
Vmáx	19.4	13.1	20.9	12.8	21.8	36.7	24.7	22.0
V^2 máx	373.36	171.61	436.81	163.84	475.24	1346.89	610.09	501.00

No. total de observaciones: 6869

Calmas: 1717

La velocidad está dada en metros por segundo.

Los datos fueron tomados de los registros del Servicio Meteorológico Nacional de la Secretaría de Agricultura y Ganadería.

Se consideró una observación diaria.

De acuerdo con los Diagramas de Lenz se tiene:

Viento reinante n: E n = 1860

Viento reinante nV:E nV=3664.7 m/seg .*. V = 1.97 m/seg.

Viento dominante: SE $V^2=2304.0 \text{ m}^3/\text{seg}^2$; $V_{\text{máx}}^2 = 48 \text{ m/seg.}$

1.2.2. Huracanes y Tormentas Tropicales.

Los huracanes y tormentas tropicales que se presentan durante los últimos seis meses del año en el Golfo de México, tienen particular interés en nuestro estudio por los efectos que — tienen sobre la laguna.

De hecho, son los únicos capaces de restablecer naturalmente la condición de laguna llena. Antes de analizar el efecto directo sobre la Laguna es conveniente tratarlos en forma general.

1.2.2.1. Introducción.

La denominación de "ciclón" fue propuesta por Henry Piddington presidente del Tribunal Marino de Calcuta, a mediados del siglo XIX, la palabra ha llegado a ser de utilización universal para designar toda clase de tormentas con baja presión atmosférica en el centro (30)

Los violentos vientos de estas tormentas tropicales cubren — usualmente miles de kilómetros cuadrados; generan grandes — oleajes y originan mareas anormales capaces de inundar las zonas costeras bajas.

(30) TANNENHILL I.R.- Hurricanes.- Princeton University Press. Princeton 1950.

Aunque su nacimiento ocurre en la zona tropical, algunas de estas tormentas se mueven largas distancias, dejando sentir sus efectos destructores sobre regiones muy remotas a su lugar de origen.

En el área de la Laguna Madre, se puede considerar que el efecto ciclónico es más positivo que negativo, ya que durante estos meteoros, la laguna recupera parte de sus condiciones originales, tanto por las intensas precipitaciones, como porque la sobreelevación del nivel del mar y la extraordinaria acción del oleaje causan la apertura de las bocas de alimentación.

1.2.2.2. Clasificación y generación de los ciclones.

La atmósfera terrestre está siempre en actividad, el movimiento de masas de aire en gran escala corresponde al sistema general de circulación atmosférica. Dentro de este sistema general, aparecen los movimientos locales que se producen sobre la superficie de la tierra, entre ellos, enfocaremos nuestra atención sobre dos tipos: el ciclónico y el anticiclónico. En el primero, los vientos están dirigidos hacia el interior o más o menos repartidos simétricamente alrededor del centro, donde la presión de la atmósfera es baja. En el anticiclónico, los vientos están dirigidos directamente hacia el exterior a partir de un centro de alta presión. Los ciclones son llamados en algunas ocasiones "bajos" o "depresiones" y los anticiclones "altos".

Los ciclones o "bajos" se clasifican en: tropicales y extra-

tropicales, siendo estos últimos los más numerosos. Los extratropicales se originan diariamente sobre continentes o en los océanos en latitudes medias y altas; son más frecuentes en invierno que en verano y como una regla general, son de mayor diámetro que los ciclones tropicales y de un carácter bastante benigno.

Los ciclones tropicales tienen su origen en las vecindades del ecuador. Se forman sobre los océanos tropicales, a excepción del Atlántico del Sur, pero nunca sobre los continentes. Existen seis regiones (31) en el globo terráqueo donde se localiza este tipo de movimiento (fig 1.2.2.1).

1a. región.- En la región Este de Australia, en el Pacífico Sur. Las tormentas son llamadas "ciclones" y algunas veces "tifones" o "willie-willies". Pueden aparecer en cualquier mes del año, pero la frecuencia mayor se presenta en el período comprendido entre enero y marzo inclusive.

2a. región.- En las costas occidentales de México, las tormentas son generalmente llamadas "ciclones tropicales" o "huracanes" en época de acción comprende los meses de junio a octubre.

3a. región.- Comprende el Caribe, Golfo de México y costa oriental de los Estados Unidos de Norteamérica, las tormentas son generalmente conocidas como huracanes y se presentan en un período de seis meses, junio a noviembre. La fre-

(31) JORDAN C.L.- What are Hurricanes and where and when do they occur .- Ocean Industry. Vol. 2, No. 8, August -- 1967.

cuencia mayor se registra en agosto, septiembre y octubre.

4a. región.- En esta región, que abarca a ambos lados de las costas de la India, las tormentas son llamadas "ciclones tropicales". Su presencia se tiene durante todos los meses del año excepto febrero, con dos períodos de alta frecuencia, en mayo y octubre.

5a.- región.- Situada al Sur del Ecuador, en el Océano Indico, los ciclones aparecen en todos los meses, excepto julio y agosto. El período de máxima frecuencia es entre diciembre y marzo.

6a. región.- En el mar de China y el Norte del Océano Pacifico las tormentas son invariablemente conocidas como "tifones". Ocurren en el período de mayo a diciembre, con una máxima frecuencia en julio, agosto y septiembre. Estas tormentas son generalmente más grandes que las que se presentan en cualquiera de las otras cinco regiones de la Tierra.

Debe hacerse notar que las tormentas tropicales no se presentan en el Sur del Océano Atlántico.

1.2.2.3. Formación de los ciclones tropicales.

Dentro del sistema general de circulación atmosférica existe en el Ecuador una zona de calmas, esta zona es llamada también "zona de convergencia intertropical" (CIT). A ella llegan los alisios del Noreste y los contra-alisios del Sureste.

La diferencia de efectos de estos vientos opuestos producen un desplazamiento de la zona de calmas hacia el Norte o hacia el Sur; mientras ese desplazamiento no sea más allá de los 6° de latitud, el efecto de la rotación de la tierra no tendrá influencia en la formación de movimientos vorticosos.

Cuando la CIT llega a los 12° ó 13° , al Norte del Ecuador, - durante agosto y septiembre, se crean las condiciones más favorables para la formación de ciclones, siendo la región de las Islas del Cabo Verde la cuna de la mayor parte de estos movimientos.

Sin embargo, la zona de calmas del Océano Pacífico, en su parte más oriental, puede invadir el área occidental del Mar Caribe, principalmente al principio o final de la temporada de huracanes -junio o noviembre- creándose una zona tan favorable para la generación de huracanes como lo es la de las Islas del Cabo Verde en el Atlántico.

Resumiendo, cuando la CIT está localizada dentro de unos cuantos grados de latitud (6°), sólo se forman pequeños vortices sobre su curso, pero si se desplaza en dirección Norte, -bajo el punto de vista de nuestro interés- la influencia de la rotación del globo es suficiente para transmitir giro a las corrientes convergentes y permitir el desarrollo de los ciclones tropicales. En el área del Atlántico esto ocurre principalmente en la región de las Islas del Cabo Verde y en el Caribe Occidental, justo al Norte del Istmo de Panamá.

1.2.2.4. Curso de los Huracanes.

Al principio de la estación de huracanes, en junio y algunas veces en julio, éstos se originan como ya mencionamos, en el Oeste del Mar Caribe, desde aquella región todos se mueven -- aproximadamente en dirección Oeste dentro del Golfo de México, cruzando la línea de la costa, entrando a nuestros litorales o a la costa del Golfo de los Estados Unidos de Norteamérica. Durante agosto y septiembre, y con menor frecuencia en julio y octubre, los huracanes se desarrollan sobre la parte Este del Océano Atlántico, al Sur de las Islas del Cabo Verde. La mayoría de ellos se mueve en dirección Oeste sobre el Atlántico, -- algunos alcanzan la costa de México o Estados Unidos de Norteamérica antes que cambien de dirección hacia el Norte o Noroeste.

Al finalizar septiembre, en octubre y noviembre, los huracanes nuevamente tienen su origen en el Oeste del Mar Caribe. Aquellos de la época final de septiembre siguen en general las -- mismas rutas que las tormentas de junio, pero en octubre y noviembre es más probable que se dirijan hacia el Norte y Noroeste en más bajas latitudes, barriendo hacia afuera sobre Florida y las Grandes Antillas.

1.2.2.5. Duración y ciclo de vida de los ciclones tropicales.

Hasta donde ha sido posible obtener datos de observaciones, se concluye que la vida de las tormentas tropicales del Atlántico, del Golfo y Mar Caribe, es de aproximadamente 9.5 días.

Las tormentas de agosto tienen una vida mayor que aquellas - que se han formado en cualesquier otro mes, siendo un promedio de 12 días. Las tormentas de julio y noviembre son de -- más corta vida, aproximadamente 8 días.

Excepcionalmente algunas tormentas tropicales del Atlántico - Norte han tenido recorridos con duración de 3 ó 4 semanas. Muchas de ellas se originaron al Sur de las Islas de Cabo Verde moviéndose hacia el Oeste sobre el Atlántico y después cambiaron su dirección hacia el Noreste y Este.

1.2.2.6. Signos que predicen la aproximación de los huracanes.

Según los observadores, en regiones tropicales y subtropicales sujetas a huracanes y otras tormentas de movimientos girato--- rios, los signos precursores son bien conocidos. En las regio--- nes de la costa, uno de los primeros signos es el oleaje.

Los vientos en la tormenta distante, crean oleaje sobre el mar el que, saliendo de la zona de tormenta, atraviesa una gran -- distancia y rompe sobre la orilla, a distancias del orden de - 600 Km. o más. Cuando el viento es ligero, el sonido de la rompiente a intervalos notablemente regulares pronostica la pre--- sencia de una tormenta. Son también síntomas: las nubes, cambio de viento, presión barométrica, elevación de la marea y algunos otros fenómenos.

Los meteorologistas aseguran actualmente que las nubes altas -

o sea las del tipo cirros se mueven con el estrato general -- de aire en el cual se encuentra la tormenta, coincidiendo, -- en una forma tosca, con la línea de progresión de ella y que el centro del huracán está colocado en el lugar donde los ci rros parecen converger. La frontera del huracán aparece sobre el horizonte, aproximadamente en el lugar en que los cirros divergen, tiene el aspecto de un arco de densas nubes.

Su color al principio es blanquisco o grisáceo cambiando a -- gris oscuro, algunas veces con un tinte cobrizo. Al mismo -- tiempo, aparecen nubes bajas en la dirección desde la cual -- se mueve el huracán, extendiéndose gradualmente sobre el cie lo.

En lo que se refiere a la presión barométrica, las lecturas -- del barómetro en un lugar no son frecuentemente de gran valor hasta que el centro de la tormenta está muy cerca, esto ocu-- rrirá muy poco tiempo antes de que se presenten los vientos -- destructivos.

En los trópicos, la temperatura, presión barométrica y el mo-- vimiento del viento, repiten su cambio diario con una regula-- ridad que tiende a ser constante. Cualquier anomalía de es-- te régimen se nota inmediatamente mientras el huracán se en-- cuentra a una gran distancia --1000 a 1500 millas-- como una re gla la presión barométrica posiblemente se eleve un poco so-- bre lo normal; las brisas usuales caen y algunas veces el -- viento sopla desde un cuadrante poco común en la región.

Los efectos de un ciclón están en función de la localización del punto considerado respecto de su trayectoria. Cuando en el hemisferio Norte dicho punto queda del lado derecho de la tormenta, según su trayectoria, o ella pasa directamente sobre el lugar de la costa, los vientos son más severos, pues el movimiento progresivo de la tormenta incrementa la fuerza del viento.

1.2.2.7. Teorías sobre el origen de los ciclones.

Durante muchos años ha habido dos teorías principales que se han tomado en cuenta para explicar el origen de los ciclones tropicales:

- a. Convectiva.
- b. De contracorrientes o frontal.

i. Teoría Convectiva.

De acuerdo con esta teoría, una gran masa de aire presenta una mayor temperatura y humedad comparada con las que la rodean, dando como resultado un movimiento de aire ascendente en gran escala. Esa masa es reemplazada por otra que fluye del medio circundante y la presión atmosférica se abate sobre la región donde ocurre el fenómeno convectivo debido a la disminución de densidad del aire por el aumento de temperatura. La rotación de la tierra causa una deflexión de las corrientes de aire que fluyen para substituir el aire ascendente, dando origen a un movimiento de tipo ciclónico. Tanto la rotación de la Tierra, como la fuerza centrífuga desarrollada por el giro, retarda el

movimiento de aire hacia el centro presentándose una baja -- mayor en la presión. Este proceso continúa hasta que se de--- sarrolla un sistema de vientos vigorosos. De acuerdo con -- esta teoría, debe haber una substitución efectiva del aire -- ascendente, de otra manera tendería a acumularse, interrumpiéndose la circulación.

ii. Teoría de las Contracorrientes.

La teoría de las contracorrientes parte de la existencia de -- una superficie llamada frente que separa dos masas de aire -- con diferentes temperaturas y movimientos. El ciclón tropi-- cal se desarrolla como una onda a lo largo de la superficie -- de separación o frente.

Las diferentes fases de la formación de un ciclón (32) en la-- titudes medias y altas se ilustran en la secuencia de figuras (A-N) hasta la (E-N) (fig. 1.2.2.2). Las letras A hasta E, -- se refieren a los varios estados de su formación. La letra N se refiere al hemisferio Norte.

En el estado A, las dos masas de aire fluyen una junto a otra, separadas por una discontinuidad o superficie frontal.

La acción de las fuerzas de fricción y Coriolis producen una área de baja presión y una onda en la superficie frontal como se observa en el estado B. En el estado C, la concavidad de la onda aumenta hasta que los dos frentes entran en con--

(32) GARBELL M.A.- D. Sc. Tropical and Equatorial Meteorology. Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. London 1947.

tacto u ocluyen. Si durante el proceso de oclusión el aire -- que avanza con el frente frío es más frío que el aire situa-- do delante del frente caliente, se formará una oclusión del tipo "frente frío", conservándose como una superficie fron-- tal, mientras que el frente caliente es forzado a elevarse -- como un frente caliente superior (vease estado D y la sec-- ción transversal B). Sin embargo si el aire situado detrás -- del frente frío es menos frío que el aire situado delante -- del frente caliente, se forma una oclusión del tipo frente -- caliente, con una superficie caliente en el frente y un fren-- te frío más alto (ver el estado E y la sección transversal -- c-c).

1.2.2.8. Comportamiento del viento en un huracán.

El aire en el huracán converge, mientras gira ciclónicamente por efecto de la rotación de la tierra hacia los bancos de -- cumulo nimbus que se mueven alrededor del ojo de la tormenta.

Esta aceleración se debe a la flotación obtenida del calor -- latente resultado de la condensación en forma de nubes, de -- la humedad del aire que entra. Básicamente esta es la misma cantidad de calor que era necesario para formar vapor de la superficie del océano.

Las líneas de corriente y las isotacas (Figura 1.2.2.3.) (33) son una evidencia del sistema circulatorio de un huracán, --

(33) GOLDMAN J.L.-- Wind Behavior in a Hurricane.-- Ocean Indus-- try. Vol. 2 No. 8, August 1967.

además puede ser un elemento muy valioso para el análisis de la trayectoria del huracán.

1.2.29. Efectos de los huracanes sobre un cordón litoral.

El efecto destructivo del mar durante un huracán sobre una costa, es debido principalmente a la acción combinada de la marea de tormenta (storm tide) o sobreelevación de tormenta (storm surge) con el oleaje (ver III-3.1.2). El aumento en elevación produce inundación, las bermas y líneas de dunas de la playa pueden quedar sumergidas y funcionando, como resultado de ello, como barras de rompiente, acumulando un volumen adicional de agua sobre la playa.

Los efectos de inundación por marea de tormenta pueden dividirse en dos fases, la primera, correspondiente al "flujo" y la segunda al "reflujo".

Se ha observado en la Laguna Madre de Texas, que existe una playa de escasa pendiente que corresponde a la playa de tormenta, en tanto que la playa normal tiene una pendiente mayor.

Otra característica de las playas de huracán de esta área es el alto contenido de material de grueso, concha principalmente que cubre la superficie. Existe también una amplia variedad de materiales en los sedimentos, tales como trozos de coral, fragmentos de areniscas, calizas, etc.

Los efectos de la erosión del oleaje durante el flujo de la -

12)

marea de tormenta en el lado del mar de las dunas vecinas -- a la playa puede ser desde la simple erosión de las mismas -- hasta una rotura total de ellas. Estas roturas pueden aparecer en tres formas:

- Canales mayores de huracán.
- Canales menores de huracán
- Gran rotura longitudinal

Cuando la rotura es tal que se abre un canal cuyo fondo está por debajo del nivel medio del mar estableciéndose una conexión entre la laguna y el mar que se mantiene abierta varias semanas después de la tormenta, se tendrá un "canal mayor".

Este canal generalmente deja un corte semipermanente en la línea de dunas susceptible de ser abierto cada nueva tormenta.

El canal menor es sólo una rotura de la línea de dunas durante la fase de máxima elevación de las aguas pero que no llega a alcanzar un nivel inferior al medio del nivel del mar y por tanto desaparece poco tiempo después de la tormenta.

En el tercer tipo, la línea de dunas es cortada en una gran longitud siendo esta cortadura lugar de depósito creado por la barra de rompiente del oleaje huracanado, formándose, -- delante de ella, una depresión similar a la existente en la

zona de rompientes en una playa normal. Además de este corte por el oleaje, se produce una erosión por efecto de las aguas que regresan al mar (Fig. 1.2.2.3).

1.2.2.10. Huracanes en la zona de la Laguna Madre.

Para el caso de nuestro estudio se hizo un doble análisis el primero en cuanto al estudio de movimientos ciclónicos desde 1900 hasta 1966, únicamente desde el punto de vista de sus trayectorias.

El segundo tuvo como objetivo seleccionar un par de huracanes de los que hubiere suficiente información meteorológica para determinar algunos de sus efectos, marea de tormenta p.e.j. Las fuentes consultadas (30), (34), llevaron a los siguientes datos.

(30) Op. cit.

(34) DIRECCION DE GEOGRAFIA Y METEOROLOGIA.- Cartas del Tiempo. Servicio Meteorológico Nacional, Secretaría de Agricultura y Ganadería (no publicadas).

TABLA 1.2.2.1.

CICLONES QUE HAN OCURRIDO EN LA ZONA
DE LA LAGUNA MADRE, TAMPS.

AÑO	FECHA	No. DE HURACANES
1901		
1902	19 de junio a 10. julio	1
1903	7 a 15 de agosto	1
1904-1908	No hubo	
1909	25 a 30 de junio 21 a 28 de agosto	2
1910	23 a 31 de agosto 5 a 14 de septiembre	2
1911	No hubo	
1912	11 a 17 de octubre	1
1913	22 a 28 de junio	1
1914-1915	No hubo	
1916	12 a 18 de agosto	1
1917-1918	No hubo	
1919	2 a 14 de septiembre	1
1920	No hubo	
1921	6 a 7 de septiembre	1
1922	13 a 16 de septiembre	1
1923-1924	No hubo	
1925	6 a 7 de septiembre	1
1926-1927	No hubo	
1928	10. a 7 de septiembre	1
1929-1930	No hubo	
1931	25 a 28 de junio	1

AÑO	FECHA	No. DE HURACANES.
1932	7 a 17 de octubre	1
1933	27 de junio a 17 de julio 25 de julio a 5 de agosto 17 a 31 de agosto 29 de agosto a 16 de Sep. 11 a 16 de septiembre	5
1934	26 a 31 de agosto	1
1935	No hubo	
1936	17 a 22 de junio 23 a 26 de junio 17 a 19 de agosto 11 a 15 de septiembre	4
1937	No hubo	
1938	23 a 30 de agosto	1
1939-1941	No hubo	
1942	3 a 5 de agosto	1
1943	16 a 20 de septiembre c	1
1944	20 a 22 de agosto 23 a 25 de septiembre	2
1945	19 a 21 de julio 24 a 29 de agosto	2
1946	24 a 25 de agosto	1
1947	31 de julio a 2 de agosto 3 a 13 de agosto	2
1948	No hubo	
1949	2 a 5 de septiembre 7 a 13 de septiembre 24 a 26 de septiembre 10. a 6 de octubre	4
1950	10. a 4 de octubre	1
1951	15 a 22 de agosto	1

AÑO	FECHA	No. DE HURACANES
1952	9 a 13 de septiembre	1
1953	No hubo	
1954	23 a 25 de junio 7 a 13 de septiembre 10. a 4 de octubre	3
1955	12 a 19 de septiembre 22 a 29 de septiembre 6 a 10 de octubre	3
1956	25 a 26 de julio 11 a 12 de septiembre	2
1957	No hubo	
1958	31 de agosto a 6 de septiembre	1
1959	16 a 17 de junio	1
1960	No hubo	
1961	3 a 13 de septiembre	1
1962-1965	No hubo	
1966	27 de septiembre a 10 de octubre	1

Del análisis anterior se llegó a las siguientes conclusiones:

i. De los 55 huracanes que afectaron al área, el 35% correspondió a los ocurridos en el mes de septiembre, 31% a los de agosto, 15% a los de junio; 14% se presentó en octubre y en julio sólo el 5%.

ii. El año de mayor actividad ciclónica en el período fue -- 1933, con 5 perturbaciones, siguiendo 1936 y 1949 con 4 y después 1954 y 1955 con 3 cada uno.

iii. La frecuencia resultante es de 0.833 perturbaciones anuales, es decir 5 perturbaciones en 6 años.

iv. Los huracanes elegidos por el análisis de efectos sobre la costa, fueron:

Carla 3 a 13 de septiembre de 1961.

Inés 27 de septiembre a 10 de octubre de 1966.

1.3 OLEAJE Y CORRIENTES.

1.3.1. Oleaje.

El estudio de oleaje en una zona, con fines de establecer estadísticas anuales, requiere de un mínimo de un año de observaciones, sin embargo aún así no es posible tener una confianza completa en los datos. En el caso de la Laguna Madre, este problema decidió resolverse utilizando informaciones existentes obtenidas (27) en aguas profundas. La información a que se hace mención divide el oleaje en dos formas a saber:

(fig. 1.3.1).

i. Oleaje local (Sea)

ii. Oleaje distante (Swell)

El oleaje en la zona de generación producido por vientos locales se llama oleaje local, en tanto que el conjunto de olas que han viajado fuera de la zona de generación se denomina oleaje distante. La diferencia básica es que mientras el oleaje local es caótico, irregular e impredecible, el oleaje distante presenta crestas redondeadas y de poca altura, es decir es un oleaje más regular y predecible.

1.3.1.1. Valores significantes de la altura y el período.

(27) Op. cit.

La irregularidad de características del oleaje, más acentuada en lo que se refiere a alturas que a períodos, marcó la necesidad de recurrir a análisis estadísticos que permitieran definir valores representativos del oleaje para estudios específicos. El término más usado en ingeniería de costas corresponde al de la altura significativa que se define como el promedio del tercio de olas más altas de un grupo dado. Es decir, un conjunto de olas se divide en tres grupos uno de olas bajas, otro de medias y el tercero de altas. La altura promedio de este último grupo constituye la correspondiente a la ola significativa. El período significativo no tiene la aplicación que la altura, pero su cálculo es similar al de la altura significativa. Este valor de la altura puede relacionarse con otros valores estadísticos característicos usando las proposiciones de Longuet-Higgins (35).

Así por ejemplo:

$$\frac{H_{1/3}}{H_{med}} = 1.60 \quad \dots 1.3.1.1.$$
$$\frac{H_{1/10}}{H_{1/3}} = 1.28 \quad \dots 1.3.1.2.$$

$H_{1/3}$ = altura significativa

H_{med} = altura media

$H_{1/10}$ = altura de probabilidad 1/10

(35) LONGUET-HIGGINS M.S.-- On the Statistical Distribution of Heights of Sea Waves.-- Jour. of Mar. Res. II-pp 245-266. December 1952.

1.3.1.2. Oleajes en el Area.

El criterio seguido para este cálculo fue el siguiente:

- a. Las direcciones elegidas en una rosa de vientos de 8 puntas fueron el Noreste, Este, Sureste y Sur. Las restantes, dada la orientación de la costa $N 5^{\circ} E$ aproximadamente, no se consideró que tuviesen influencia sobre ella.
- b. Como en la presentación de datos, estos aparecen por rangos, se tomó el promedio de cada rango como representativo del grupo.
- c. El análisis se hizo por meses y por estaciones.

Con los conceptos estadísticos mencionados y el criterio anterior se obtuvieron los resultados que aparecen en las tablas 1.3.1.1 a 1.3.1.9. (*)

1.3.2. Corrientes.

Dentro de los diversos tipos de corrientes marinas existentes para los fines del estudio, nos interesan particularmente -- aquellas generadas por el oleaje en las vecindades de la costa, aunque también podrían, en un momento dado, ser significativas las producidas por el viento, principalmente durante -- las tormentas y huracanes. Las primeras pueden, como se indica en III-3.3.3, calcularse en forma teórica, de hecho éste -- será el proceso más indicado, quedando complementados esos -- cálculos con las mediciones en el lugar. Antes de mencionar -- en forma somera el sistema de medición seguido durante los es

(*) Se omiten.

tudios de campo conviene presentar, como introducción, el marco general de corrientes en el Golfo de México (37)

La corriente más frecuente, proviene del Caribe y pasa por el Canal de Yucatán, ramificándose y ampliándose durante el invierno. Los fuertes vientos del Norte intensifican las contra corrientes, acentuándose este fenómeno principalmente en las partes Oeste y Sur del Golfo, creando en ocasiones una corriente hacia el Sur en todo el Golfo.

En el área de la Laguna Madre, el estado general de las corrientes, por estaciones, es el siguiente:

TABLA 1.3.2.1.
CORRIENTES SUPERFICIALES

ESTACION	% DE ACCION	DIRECCION	VELOCIDAD m/seg.
PRIMAVERA	40 a 75	Sur Norte	0.55 a 0.6
VERANO	56 a 75	Sur Norte	0.55 a 0.6
OTOÑO	40 a 55	Sur Norte	0.45
INVIERNO	40 a 77	Sur Norte	0.45

En cuanto a las corrientes generadas por los huracanes es conveniente señalar que la corriente máxima a lo largo de la costa puede presentarse antes de la llegada del centro del huracán y por lo tanto los vientos que la produzcan serán menores que los de máxima intensidad. Esto se debe tal vez, al hecho

(37) U.S. NAVAL OCEANOGRAPHIC OFFICE.- Oceanographic Atlas of the North Atlantic Ocean, Section I. Tides and Currents. Secretary of the Navy 1965 .

de que el viento es perpendicular a la costa a medida que el huracán se acerca a ella. La expresión que permite valuar esta corriente deducida por Bretschneider (38) es:

$$\frac{v}{U} = d^{1/6} \sqrt{\frac{k}{K_f} \operatorname{sen} \varphi} \operatorname{tgh} \left(\frac{U t}{d} \sqrt{\frac{k}{K_f} \frac{\operatorname{sen} \varphi}{d^{1/3}}} \right) \dots 1.3.2.1.$$

en que:

$$v = \frac{1.486}{n} R^{2/3} S^{1/3} \text{ debiendo suponer que:}$$

$R = d$ y que para la plataforma continental $n = 0.02$ a 0.03

v es la velocidad media de la corriente de viento en pies/seg.

$U =$ velocidad del viento en pies/seg.

$d =$ profundidad del agua en pies.

$k =$ parámetro representativo del esfuerzo cortante superficial del viento $= 3 \times 10^{-6}$

$K_f =$ parámetro representativo del esfuerzo cortante en el fondo ($\text{ft}^{1/3}$) $= 0.009$

$t =$ duración del viento en segundos.

$\varphi =$ ángulo entre la dirección del viento y la perpendicular a la costa.

1.3.2.1. Corrientes litorales y corrientes playeras.

El origen de las primeras puede ser debido principalmente a las mareas y al oleaje, en tanto que las segundas se deben fundamentalmente a la incidencia oblicua de las olas con respecto a la línea de la playa. Las corrientes litorales en una costa abierta con una marea pequeña tienen relativa poca importancia, siendo más bien un dato general complementario. Esto claro está, no podría decirse en el caso del estudio de una descarga

submarina, pero para el problema de la Laguna Madre, la aseveración anterior es válida. En los planos LM-6 y 7, se presenta un resumen de las corrientes litorales representativas obtenidas durante los estudios de campo.

Estas corrientes se midieron con flotadores sujetos y pantallas de arrastre colocadas en forma de captar las corrientes superficiales, a 2 y 4 m. de profundidad.

Las corrientes playeras son fundamentales en el análisis del transporte litoral sobre todo en playas de pendiente suave como las del Golfo. En III-3.3.3. se trata el aspecto teórico de ellas; en los planos citados aparecen los resultados de las observaciones de campo.

La medición se efectuó utilizando pelotas de playa de unos 40 cm. de diámetro con una pantalla de arrastre, fácilmente observables desde las dunas, donde se colocaban marcas fijas espaciadas 20 m. La velocidad se obtenía de acuerdo con el tiempo que tardara el balón en pasar por dos marcas consecutivas.

1.4. MAREAS ASTRONOMICAS.

El fenómeno denominado marea astronómica es aquel por medio del cual, el nivel del mar varía en una forma regular y con cierta periodicidad.

Hace casi 2000 años, los naturalistas como Strabo y Pliny ya sospechaban que debía existir una relación entre los cuerpos

celestes y los movimientos del mar.

Kepler descubrió que las fuerzas atractivas del sol y la luna estaban involucradas en el fenómeno; pero fue Newton el primero en discutir el origen de las mareas desde un punto de vista matemático. En su obra maestra, "Philosophiæ Naturalis, Principia Mathematica" (Londres 1687), trató el problema de las mareas considerando a la tierra totalmente cubierta con agua y demostró que la superficie del agua se transformaría en un esferoide como resultado de las atracciones del sol y la luna.

Posteriormente, otros científicos e investigadores han desarrollado notablemente la teoría sobre el fenómeno de las mareas, entre los cuales podemos mencionar: Laplace, Lord Kelvin, Darwin, Lorenz, etc.

1.4.1. Análisis Teórico.

Las fuerzas de primordial importancia en la generación de mareas en los océanos son: las fuerzas gravitacionales del sol y la luna, la fuerza centrífuga debida al movimiento de la tierra alrededor de su órbita, la fuerza de Coriolis debido a la rotación de la tierra alrededor de su eje y la fuerza de fricción debida al movimiento del agua con respecto a las fronteras que contiene.

Se ha demostrado que las fuerzas gravitacionales de otros pla-

netas son despreciables y que, aunque la luna tiene una masa mucho menor que la del sol, por estar más cerca, su campo gravitacional para la generación de mareas es mucho mayor que el del sol.

Si se considera el efecto relativo de dos fuerzas: la atracción gravitacional de la Luna girando alrededor de la tierra (por sencillez en el ecuador), y la fuerza centrífuga de la tierra girando sobre su órbita. Los dos sistemas de fuerzas se muestran en la figura 1.4.1 y la resultante es normal a la tierra a lo largo de la línea que une ésta con la luna a lo largo de un círculo máximo que pase por los polos. En todos los demás puntos existe una componente tangencial a la superficie.

Como en la mayoría de los fenómenos geofísicos, se hace necesario el hacer una simplificación con el fin de entender el fenómeno de una manera cuantitativa.

Si se considera un canal angosto con muros verticales que se extiende alrededor del Ecuador y la Luna girando alrededor de la Tierra, pero siempre sobre el Ecuador, entonces la fuerza de Coriolis originará una pendiente transversal del agua en el canal. El parámetro que controla el fenómeno es el Número de Froude basado en la velocidad v a la cual la proyección de la Luna sobre la Tierra, se mueve sobre la superficie de ésta ($v = \sqrt{g d}$, donde d es la profundidad del agua).

194

Resultará entonces un sistema de ondas, el cual se mueve con la velocidad de la Luna, pero su amplitud y fase dependen del número de Froude.

Si el número de Froude fuera menor que la unidad, se tendría una onda dispersiva; si el número de Froude fuera igual a la unidad, se tendría la generación de una onda de gran amplitud y si el número de Froude fuese mayor que la unidad se tendría una onda de mucho menor amplitud.

Para números de Froude menores de la unidad, la onda está esencialmente en fase con el efecto perturbador, lo que en este caso significa que el máximo nivel de marea ocurre cuando la Luna estuviera sobre el observador ó 12 horas después de que ella estuviera en el lado opuesto de la Tierra. Cuando el número de Froude es mayor que la unidad, la fase se mueve 180° y la onda forzada tiene un defasamiento con la Luna de 180° (6 horas y 18 horas respectivamente).

Para una interpretación más completa del fenómeno se haría necesario el considerar una serie de canales, dando por tanto una gran complejidad a su estudio. Debido a esta gran complejidad asociada con la teoría de las mareas, la mayoría de la información que se ha obtenido, se basa en mediciones directas realizadas en diferentes lugares de la Tierra.

El movimiento vertical de la marea en un punto determinado puede considerarse como la superposición lineal de series de

términos armónicos, dependiendo los períodos de estas componentes de los respectivos del Sol y la Luna.

La observación consecutiva de las mareas, durante un período largo de tiempo, permite un análisis adecuado de la amplitud y fase de las componentes. Al mismo tiempo, esta información se utiliza para la predicción de las mareas astronómicas.

Las mareas astronómicas o mejor dicho, los tipos de curvas de marea que se presentan durante la mayor parte de un mes, se clasifican en:

- Marea diurna. Presenta una pleamar y una bajamar por día.
- Marea semidiurna. Comporta dos pleamares y dos bajamares aproximadamente iguales por día.
- Marea mixta. Se caracteriza por tener dos pleamares o bajamares notablemente diferentes.

Las diferencias de alturas entre dos pleamares o bajamares sucesivas en una curva, se conoce como desigualdad diurna; esta diferencia cambia con la declinación de la Luna y en menor grado con la del Sol. En general, esta desigualdad tiende a aumentar con la declinación Norte o Sur de la Luna, y a disminuir conforme la Luna se aproxima al Ecuador. Esta diferencia permite también distinguir entre las mareas semidiurnas y mixta.

Las mareas altas así como las mareas bajas presentan sus máximos valores cada 14.3 días, constituyendo así las mareas de si

136

cigias. Esto ocurre cuando se tiene Luna llena o nueva. En el otro extremo, cada 14.3 días las mareas altas y bajas presentan sus mínimos valores, constituyendo así lo que se denomina mareas muertas.

A la vez y durante dos ocasiones al año se presentan mareas máximas-maximorum de sicigias, lo cual ocurre de acuerdo con la posición de la Tierra en su órbita (equinoccios de primavera y otoño).

La variación de niveles del agua motivada por las mareas, ha dado lugar al establecimiento de diferentes planos de mareas, que a continuación se definen:

- Pleamar máxima registrada. Es el máximo nivel registrado para una marea alta.
- Nivel de marea alta media. Es el promedio de las mareas altas ocurridas en un lapso dado.
- Nivel medio del mar. Es la altura promedio del nivel del mar.
- Nivel de marea baja media. Es el promedio de las mareas bajas ocurridas en un lapso.
- Bajamar mínima registrada. Es el mínimo nivel registrado para la marea baja.

Es conveniente aclarar que para conocer con buena precisión los planos de mareas mencionados anteriormente, es necesario el haber observado las variaciones de ella durante un lapso

137

de 18.6 años. Sin embargo, el tiempo mínimo que se requería -- para poder establecer los planos anteriores en algún lugar de interés, es de 1 año, en el entendido de que la determinación así realizada no será lo suficientemente precisa. Si el estudio es preliminar, se acepta 1 mes lunar.

1.4.2. Análisis para la Laguna Madre.

Las mareas en la zona de la Laguna Madre son del tipo mixto, pero predominantemente diurnas; por lo que será necesario realizar un análisis de dichas curvas para obtener una curva representativa y estar en condiciones de evaluar efectos que dicha curva pueda tener en los diferentes fenómenos que ocurren en la Laguna.

En el puerto de Tampico, Tamps. y desde el año de 1952, el Instituto de Geofísica de la UNAM, estableció una estación mareográfica cuyos datos permiten constatar el tipo de marea -- que se presenta en la zona y además, el poder predecir de una manera correcta, las pleamares y bajamares del año (39).

El citado Instituto ha definido los diferentes planos de marea para este puerto con bastante aproximación, los cuales se indican a continuación:

Pleamar máxima registrada:	0.919 m.
Nivel de pleamar media:	0.162 m.
Nivel medio del mar:	0.000 m.
Nivel de media marea:	- 0.012 m.

(39) INSTITUTO DE GEOFISICA.- Tablas de Predicción de Mareas 1967. Puertos del Golfo de México.- Departamento de Oceanografía, UNAM. México 1967.

138

Nivel de bajamar media:	-0.185 m.
Nivel de bajamar media de sicigias.	-0.460 m.
Bajamar mínima registrada:	-0.697 m.

Debido a que este Instituto tiene solamente en proyecto la - instalación de una estación en Matamoros, Tamps., no es posible hacer una interpolación entre este sitio y Tampico; por lo cual fue preciso recurrir a las tablas americanas de predicción para Puerto Isabel, Texas (40). De estas tablas se - puede apreciar que el rango de mareas diurnas es de 0.5795 m. el cual no difiere grandemente de los 0.62 m. que se obtienen para Tampico, por lo cual se pueden utilizar los datos de es te último para la determinación de las características de una marea tipo.

El análisis de mareas comprende la clasificación de los siguientes tipos:

Tipo I. Marea semidiurna, que incluye:

- 1.- Mareas vivas
- 2.- Mareas muertas
- 3.- Mareas medias

Tipo II. Marea diurna, que incluye:

- 1.- Mareas vivas
- 2.- Mareas muertas
- 3.- Mareas medias

El análisis de mareas se realizará mes por mes, considerando

(40) COAST & GEODETIC SURVEY.- Tide Tables. High and Low Waters Predictions. East Coast North & South America.- U.S. Dept. of Commerce. Washington 1967.

para ello, la clasificación anterior y los valores que presenten las predicciones para el año de 1967.

Se considerará además la media geométrica (41) que defina una curva de mareas para el caso de mareas vivas y muertas, tomando en cuenta la amplitud y el período, las características de las mareas medias se obtendrán simplemente como el promedio aritmético de las vivas y muertas, tanto en lo que se refiere a amplitud como a período.

Se utilizará la convención gráfica indicada en las figuras 1.4.2.1. ó 1.4.2.2. según que se trate de marea semidiurna o diurna.

En la tabla 1.4.1 que se muestra a continuación, se consignan los valores tomados de la tabla de predicciones para las mareas diurnas y semidiurnas en sus dos tipos: vivas y muertas.

TABLA 1.4.1
 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS CURVAS DE MAREAS
 H (cm) y T (hs)

MES	TIPO I								TIPO II			
	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	A ₁	B ₁	t ₁	t ₂
E 1	34	34	12	9	7.6	7	5.5	5.3	73	73	9.6	15
2	3	9	15	15	4	6.6	7.3	6	15	18	17	8
F 1	46	43	8	15	8.3	7.3	5	5	61	61	10	15
2	7	3	37	6	2.7	8.3	8	5	38	34	14	10.

(41) PARADINE C.G., RIVET B.H.P.- Statistical Methods for Technologists. The English Universities Press Ltd. 1964.

MES	TIPO I								TIPO II			
	A ₁	B ₁	A ₂	B ₂	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	A ₁	B ₁	t ₁	t ₂
M 1	37	28	15	27	8	6.5	5.5	6.3	61	61	8.7	16
2	9	9	15	15	5.3	5.3	7	6.3	34	34	16.6	10
A 1	24	19	24	33	6.6	5.7	6	7	76	73	15.7	9.6
2	12	15	15	12	5.8	6	6.3	5.5	37	37	19.5	8.7
M 1	21	27	9	3	7	7.7	6	3.3	82	79	15.5	9.8
2	8	8	9	15	6.6	6	7	6.3	34	39	15.1	9
J 1	21	21	9	8	7	7	5.5	4.5	82	79	15	10
2	5	9	3	9	7	6.6	4.5	5.8	37	37	15.5	8.5
J 1	17	17	6	6	7	7.4	6	4	69	69	14.8	10
2	9	6	12	12	5.7	5	6.6	6.9	24	24	8	13.9
A 1	9	12	27	21	5.2	5.5	7.0	6.1	54	51	15	9.3
2	15	18	9	6	6.17	7.0	5.7	5.0	18	18	7.2	16.4
S 1	18	27	24	12	5.5	6.5	6.6	5.1	55	55	14.8	9.5
2	9	15	24	18	5	4.7	7	6	33	33	16	10
O 1	30	39	9	33	7.3	8.2	6.7	10	64	64	16	9.75
2	9	6	19	19	5.3	4.8	7.0	6.8	42	39	14.9	9.5
N 1	33	48	18	43	7	7.6	6.3	10.8	79	76	15.8	10
2	12	15	15	15	6.4	6.50	6.3	6.3	24	21	16.3	7.7
D 1	9	12	18	18	4.5	6.1	6.4	6	79	79	15.4	9.83
2	6	12	18	15	5.5	6.6	6.6	7.1	21	18	16.2	7.7

De los valores anteriores y calculando tanto la media geométrica como el promedio aritmético, se llega a las mareas tipo que se consignan a continuación:

TABLA 1.4.2.

CARACTERISTICAS DE LAS MAREAS TIPO PARA LA LAGUNA MADRE

TIPO		A_1	B_1	A_2	B_2	t_1	t_2	t_3	t_4
I	1	27.9	32.3	19.04	10.66	7.202	7.212	6.173	4.9
	2	7.59	10.25	15.42	14.95	5.23	5.86	6.72	5.9
	3	11.74	21.27	17.23	21.80	6.22	6.53	6.45	5.4
ZONA II	1	69.88	75.34			12.87	10.47		
	2	30.67	36.51			16.09	13.75		
	3	50.27	55.94			14.48	12.11		

1.5. GEOLOGIA, SEDIMENTOLOGIA Y DATOS COMPLEMENTARIOS. (10)

1.5.1. Geología General.

La Laguna Madre se localiza en la provincia fisiográfica de la llanura costera del Golfo de México, en la subprovincia llamada Cuenca de Burgos, cuyos límites son: al Este, el Golfo de México; al Sur y Sureste el Río Soto la Marina y la Sierra de Cruillas; al Oeste la línea que sigue el contacto entre el Cretácico y el Paleoceno desde la Sierra de Cruillas hasta la Ciudad de Laredo; y al Norte por la llanura deltaica del Río Bravo. Hay indicios de que las rocas de basamento de edad Paleozoica o Precámbrica están a más de 10,000 m. de profundidad cerca de la desembocadura del Río Bravo.

La cuenca comprende sedimentos terciarios con rumbo general -

(10) Op. cit.

142

paralelo a la línea de costa actual y echado regional hacia el Este. Es muy probable que la línea de costa actual se formó al final de la transgresión holocénica.

En general la llanura costera de Tamaulipas se ensancha de Sur a Norte, en tanto que la plataforma continental sigue la misma tendencia, teniendo 90 Km. en la desembocadura del Río Bravo.

Las Lagunas Madre de Tamaulipas y de Texas han sido sometidas a procesos geológicos similares, por lo tanto el origen de la Laguna Madre de Tamaulipas puede establecerse tomando como base el de la de Texas.

Existen antecedentes de su formación a partir del último interglacial principal; los aluviones y algunas barreras de esta edad, así como arcillas compactas encontradas en la parte Norte de la Laguna de Tamaulipas, indican que el nivel del mar era aproximadamente 8 m. más alto que el actual. Al presentarse la regresión marina correspondiente a la siguiente glaciación, quedaron al descubierto gran parte del delta submarino y de la plataforma en cuyos sedimentos los ríos labraron sus cauces. Al terminar este período, el nivel del mar volvió a ascender, invadiendo los valles de los ríos. Se piensa que a esta época corresponde la formación de la Bahía del Catán.

La última fase del período de transgresión holocénica, no está bien definida en lo que se refiere al estado que guardaba la -

laguna, sin embargo, hay indicios de que las fajas arenosas situadas actualmente a 4 ó 5 m. sobre el nivel del mar, pudieron haber constituido una antigua línea de costa.

Por lo que se refiere a los ríos Bravo y San Fernando, sus sedimentos se depositaron sobre los rasgos más antiguos de la costa, y los del último de ellos dividieron con su delta a la laguna en dos partes, aun más, se tienen informaciones que a principios de este siglo, el Río San Fernando desembocaba hacia el mar por encima de una barrera sumergida, esto es un índice de que la barrera actual, cuando menos en su parte central, es de época reciente.

1.5.2. Sedimentología.

Los sedimentos de la Laguna Madre se han clasificado en 3 grupos, de los cuales, el primero está constituido por arena fina muy bien clasificada resultado del transporte hacia la costa de las corrientes y el oleaje y posteriormente, a partir de la berma y dunas, sea por acción del mar durante las tormentas o debido al transporte eólico. Su distribución, por tanto, está restringida a una franja sensiblemente paralela a la barrera litoral. Además, como resultado de su forma de transporte, la mayor extensión de estos depósitos se tiene frente a los sitios donde la invasión del mar es mayor, esto es, frente a las cuatro bocas de Santa María.

Un segundo grupo está formado por sedimentos mixtos mal cla

140

sificados, Constituyen los depósitos más importantes de la laguna, extendiéndose paralelamente a la ribera continental; en la zona Norte son resultado de los aluviones deltaicos del Río Bravo, en tanto que en la parte central, provienen de la erosión de la limolita que constituye esta parte de la costa. En la zona Sur, los sedimentos están constituidos por mezclas de finos continentales y arenas del cordón y en el extremo meridional, por aporte del Río Soto la Marina.

El tercer grupo está formado principalmente por sedimentos finos arcillas y limos muy pobremente clasificados; son el resultado de acarreo fluvial hacia la laguna o también por erosión del oleaje sobre las riberas. Dado su pequeño diámetro se mantienen fácilmente en suspensión en el agua de la laguna a consecuencia de la acción del Viento, depositándose únicamente en las partes más profundas y protegidas.

Los componentes de los sedimentos pueden separarse en dos grupos: los de la fracción arenosa y los de la fracción fina.

Para los primeros se tiene que su parte terrígena está constituida principalmente por cuarzo, feldespato y minerales pesados. Los componentes de origen químico están constituidos por oolitos en tamaños que van de 0.25 a 1 mm., forman también agregados cementados con carbonato de calcio, quedando distribuidos en las zonas de mayor concentración de dicho carbonato en los sedimentos. Finalmente existen también agregados de fragmentos terrígenos y orgánicos cementados con

carbonato de calcio, tienen un tamaño mayor de 0.25 mm. En las vecindades del Río San Fernando y de la Bahía del Catán existen también pequeños agregados ferruginosos.

De la fracción fina no se tiene información detallada.

En cuanto a la estructura interna de los sedimentos, se observa que en los finos predominan las estructuras laminares, esto se atribuye tal vez a la interestratificación de sedimentos arenosos transportados por el viento y de finos en suspensión.

Las estructuras homogéneas aparecen en extensas zonas de la laguna como una evidencia de la continuidad de los procesos de la sedimentación. Así estructuras homogéneas arcillosas aparecen al Sur de los depósitos deltaicos del Río San Fernando, en tanto que las arenosas predominan en los bajos adyacentes a la barrera litoral, como resultado del transporte eólico y acción erosiva del oleaje en el cordón. Esta constitución varía a medida que aumenta la influencia de materiales arcillosos y de grano fino. Las estructuras de aspecto moteado, consecuencia de la mezcla de conchas y fragmentos de ellas con sedimentos limo-arcillosos, cubren una amplia zona desde la desembocadura del Río San Fernando hacia el Norte a lo largo de la ribera continental. Este tipo de estructuras es característica de zonas de alta productividad orgánica acompañada por abundante aportación de terrígenos resultantes de la erosión costera.

Con respecto a los materiales playeros, se tiene apenas una -- información preliminar, obtenida durante los estudios de campo, consistente en una determinación de sus características -- granulométricas. De muestreos realizados según perfiles que -- iban desde la ribera Este de la laguna hasta 2 m. de profundi-- dad en el mar, resulta que, en general, el material constitu-- yente es arena fina muy bien clasificada, presentando, en al-- gunos casos, un alto contenido de concha --25% de la muestra--. En cuanto a su diámetro medio este varía desde 0.11 mm. a 2 -- m. de profundidad hasta 0.17 mm. Los datos correspondientes -- al análisis de ciertas muestras representativas tomadas en el curso del estudio aparecen en la tabla 1.5.1. (*)

1.5.3. Datos Complementarios.

Salinidad del agua.-- No se tienen por el momento informacio-- nes recientes sobre la concentración salina en el agua de la laguna, se sabe que en abril y mayo de 1963 (10) la concentra-- ción salina tenía un valor máximo de 140 partes por mil en el extremo Norte de la laguna, disminuyendo hasta menos de 110 -- ppm. frente a las cuatro bocas de Santa María; incrementándo-- se de nueva cuenta hasta 130 al Sur del Río San Fernando, man-- teniendo este contenido aproximadamente hasta los 24° 15' de latitud, o sea 15 Km. al Sur de la boca del Catán, disminuyen-- do a partir de este punto hasta 100 ppm en el extremo meridio-- nal de la laguna. Es conveniente señalar que el contenido de sal del agua de mar en el Golfo de México varía entre 26 y 30 partes por mil.

La información gráfica correspondiente a este inciso aparece en el plano LM-21

(10) Op. cit.

(*) Se omite tabla.

ESTUDIO HIDROLOGICO

2.1. FUNCIONAMIENTO DE VASO.

Para el análisis de funcionamiento de vaso de la Laguna Madre, fue necesario hacer una serie de consideraciones, algunas de ellas de carácter simplificadorio, sobre todo por la carencia de información principalmente en lo que se refería a los parteaguas de la cuenca directa a la laguna. Estas consideraciones son las siguientes:

- Aún cuando el vaso propiamente dicho puede quedar dividido en 4 vasos más pequeños cuando el nivel de la superficie del agua sea igual o menor de 0.50 m., se consideró para fines de análisis de funcionamiento de vaso la cuenca de la laguna constituida por un solo vaso.
- Las áreas de la laguna se fueron obteniendo para batimétricas separadas a cada 0.50 m., y sus correspondientes incrementos de volumen se calcularon de acuerdo con la fórmula:

$$V_{0.0-0.5} = \frac{A_{0.0} + A_{0.5} + \sqrt{A_{0.0} A_{0.5}}}{3} \times h$$

Una vez obtenidas las áreas anteriores y sus correspondientes volúmenes se procedió a obtener 2 gráficas, una de volúmenes y otra de áreas relacionadas con las profundidades.

- Con los planos hidrológicos facilitados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos se definió el parteaguas que delimita la cuenca propia de la Laguna Madre, dividiéndola de

acuerdo con la zona de influencia correspondiente a cada una de las estaciones climatológicas que se encuentran cerca de ella y que son, de Norte a Sur: Matamoros, La Piedad San Fernando y Soto la Marina.

- Una vez efectuada la división de la cuenca, se procedió a obtener la evaporación media mensual en milímetros sobre la cuenca de la Laguna, adoptándola como válida para el vaso propiamente dicho. El cálculo de la precipitación media de la cuenca, se hizo aplicando el método de Thiessen (ver 26 por ejemplo).
- Para el cálculo del escurrimiento se usó un coeficiente $K_c = 0.1$ similar al empleado para los estudios de la Laguna Madre de Texas (12), por no disponer de datos suficientes para estimarlo adecuadamente.
- A falta de datos de evaporación en la Estación de la Piedad en los años de 1955 a 1960, se utilizaron valores promedios de los años 1960 a 1966; lo mismo se hizo para el caso de la estación de Matamoros.
- Para iniciar el funcionamiento de vasos se consideró que en octubre de 1955 la Laguna estaba llena como consecuencia de las precipitaciones producidas por los ciclones Hilda y Janet. Los escurrimientos del Río San Fernando correspondieron sólo a los registrados en la estación de San Fernando, quedando en una posición conservadora en lo que se refiere a aportes de este río al vaso.

(12) Op. cit.

(26) Op. cit.

- El almacenamiento final mensual se obtuvo sumando el almacenamiento inicial las aportaciones del San Fernando y el escurrimiento de la cuenca de la laguna.
- El almacenamiento medio es el promedio aritmético del almacenamiento inicial y el almacenamiento final.
- Las pérdidas por evaporación neta mensual se obtuvieron -- multiplicando las diferencias $\text{Evaporación} - \text{Precipitación}$ -- por el área correspondiente al nivel medio mensual en la Laguna.
- Las pérdidas por evaporación promedio mensual se restaron al almacenamiento final para encontrar el almacenamiento inicial a principio del siguiente mes.
- Se efectuaron dos análisis de funcionamiento de vaso, uno de ellos consideró que en octubre de 1961 la Laguna se llenó nuevamente por los efectos producidos por el huracán -- Carla; en el otro se supuso que las aportaciones a la Laguna sólo se debieron a los escurrimientos del San Fernando y cuenca propia, con los cuales no alcanzó a llenarse. -- (Ver planos LM-22, 23, 24 y 25.

2.2. ANALISIS ESTADISTICO DE NIVELES Y VOLUMENES.

De los resultados obtenidos al efectuar el análisis de datos correspondientes a las estaciones climatológicas de --

Matamoros, La Piedad, San Fernando, Soto la Marina y La Sona dora se deduce que la evaporación es mayor en la parte Sur de la Laguna Madre, disminuyendo hacia el Norte, sin embargo, esa disminución es muy pequeña, lo cual es acorde con las temperaturas obtenidas, ya que ellas son mayores en el Sur que en el Norte. Se observa también, al comparar los resultados de evaporación con los datos de salinidad facilitados por el Instituto de Geología de la UNAM, que en general la salinidad aumenta de Norte a Sur, con la discordancia única de que en la parte central de la laguna hay una salinidad mayor. En el extremo Norte existen concentraciones de hasta 140 ppm., pero es debido a lo relativamente aislado de esa área con relación a los eventuales movimientos del fluido y a lo somero y poco extenso de los espejos de agua.

Del estudio de funcionamiento de vaso tenemos que:

Precipitación media mensual:	54.6 mm/mes
Escurrimiento medio mensual:	$65.4 \times 10^6 \text{ m}^3$
Pérdida por evaporación promedio mensual:	$80.2 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación media mensual:	162.7 mm.
Precipitación máxima en el período (septiembre de 1961):	215 mm.
Escurrimiento máximo en el período (octubre (1958):	$608.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación máxima en el período (julio 1960):	264 mm.
Pérdida por evaporación máxima en el período:	$253 \times 10^6 \text{ m}^3$

12

Precipitación promedio mensual mínima (en marzo):	21 mm.
Esgurrimiento promedio mensual mínimo (en marzo):	$17 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación promedio mensual mínima (en diciembre):	89 mm.
Pérdida por evaporación promedio mensual mínima (en septiembre)	$47.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Precipitación mensual más frecuente con 33.5%	0 - 25 mm.
Esgurrimiento mensual más frecuente con 35%	$0 - 25 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación mensual más frecuente con 19%	200 - 225 mm.
Pérdida por evaporación mensual más frecuente con 21.4%	$50 - 75 \times 10^6 \text{ m}^3$
Precipitación mínima mensual (abril 1958 y febrero 1962):	0
Esgurrimiento mínimo mensual (febrero 1962)	$0.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación mínima mensual (enero 1966):	67 mm.
Pérdida por evaporación mínima mensual (noviembre 1958):	$-76 \times 10^6 \text{ m}^3$
Precipitación promedio mensual máxima:	112 mm.
Esgurrimiento promedio mensual máximo (septiembre)	$168 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación promedio mensual máxima (en julio):	234 mm.

130

Pérdida por evaporación promedio mensual máxima (en julio):	$112 \times 10^6 \text{ m}^3$
Precipitación media anual:	655 mm.
Escurrimiento medio anual:	$784 \times 10^6 \text{ m}^3$
Evaporación media anual:	1955 mm.
Pérdida por evaporación prom. anual:	$963 \times 10^6 \text{ m}^3$
El 50% del tiempo la precipitación es:	$17.5 \text{ mm} < \text{Precip} < 225 \text{ mm}$
El 50% restante la precipitación es:	$0 < \text{Precipit} < 17.5 \text{ mm}$
El 50% del tiempo el escurrimiento vale:	$11 \times 10^6 \text{ m}^3 < \text{Esc} < 225 \times 10^6 \text{ m}^3$
El 50% restante el escurrimiento vale:	$0 < \text{Esc} < 11 \times 10^6 \text{ m}^3$
El 50% del tiempo la evaporación es:	$168 \text{ mm} < \text{Evap} < 175 \text{ mm.}$
El 50% del tiempo la pérdida por evaporación es:	$45 \times 10^6 \text{ m}^3 < \text{Evap} < 300 \times 10^6 \text{ m}^3$
El 50% restante la pérdida por evaporación es:	$-75 \times 10^6 \text{ m}^3 < \text{Evap} < 45 \times 10^6 \text{ m}^3$
Nivel promedio mensual:	-0.80 m.
Area promedio mensual:	781.4 km^2
Volumen promedio mensual:	$542.5 \times 10^6 \text{ m}^3$
Nivel promedio máximo (en octubre):	-0.606 m.
Area promedio máxima (en octubre):	1004 km^2
Volumen promedio máximo (en octubre):	$707 \times 10^6 \text{ m}^3$
Nivel mínimo en el período (mayo 1965):	-1.67 m.
Area mínima en el período (mayo 1965):	240 km^2
Volumen mínimo en el período (mayo 65):	$118 \times 10^6 \text{ m}^3$

Nivel mínimo en el período (octubre 1955):	-0.01 m.
Area máxima en el período (octubre 1955):	2160 Km ²
Volumen máximo en el período (Octubre 1955):	1500 x 10 ⁶ m ³
Nivel promedio mensual mínimo (en agosto)	-0.99 m.
Area promedio mensual mínima (en agosto)	598 Km ²
Volumen promedio mensual mínimo (en agosto):	388 x 10 ⁶ m ³
Nivel mensual más frecuente (13.0%):	-0.9 - 1.0 m.
Area mensual más frecuente (21.4%):	600 - 700 Km ²
Volumen mensual más frecuente (27.7%):	400 - 500 x 10 ⁶ m ³
El 50% del tiempo se tienen niveles mayores que:	-0.85 m.
El 50% del tiempo se tienen áreas menores que:	575 Km ²
El 50% del tiempo se tienen volúmenes - menores que:	450 x 10 ⁶ m ³

2.2.1. Conclusiones.

De la gráfica de funcionamiento de vaso, podemos darnos cuenta que la Laguna Madre nunca llega a alcanzar estados de sequía completa aún cuando deje de estar en contacto con el mar (salvo condiciones anormales de precipitación). Ello se debe

al hecho de que la pérdida volumétrica neta por evaporación = (evaporación - precipitación) x Área, alcanza un estado para el cual las aportaciones tanto del San Fernando como el de la cuenca propia de la Laguna son mayores que la mencionada pérdida neta; el factor que más influye para alcanzar ese estado es la variación del área de agua expuesta a la evaporación de la Laguna.

Además se observa que existe una fuerte tendencia a estabilizar su funcionamiento en un lapso relativamente corto después de haber sido afectado por algún ciclón. Esta estabilidad - consiste en que, aún cuando hayan existido aportes marinos - para alcanzar un mayor nivel dentro de la Laguna y aún llenarla, al cerrarse las bocas abiertas a raíz del ciclón el funcionamiento tiende a ser el mismo que si no hubiese habido ciclón. Este tiempo de estabilización es de aproximadamente 1.15 años después del meteoro.

Ello se debe a que, cuando se tiene la laguna muy llena, las pérdidas volumétricas por evaporación son muy fuertes además, si las comparamos con las aportaciones del San Fernando y cuenca propia de la laguna estas últimas son más pequeñas que las pérdidas, así la laguna tiende a disminuir rápidamente el volumen contenido. Tenemos también que cuando el volumen se considera no afectado por el ciclón y es relativamente pequeña, las áreas expuestas serán también menores, y de esa manera las pérdidas netas por evaporación serán aproximadamente iguales a las aportaciones del río San Fernando y de cuenca directa de la Laguna Madre, por ello tenderá a la estabilidad del volumen contenido en la Laguna.

REGIMEN DEL LITORAL Y AREA LACUSTRE

3.1. MAREAS DE VIENTO Y DE TORMENTA.

3.1.1. Mareas de Viento.

El viento al soplar sobre la superficie del agua, además de generar oleaje, induce una corriente superficial en la dirección general de su movimiento y ocasiona una sobreelevación del cuerpo del agua del lado de sotavento con el consecuente abatimiento del lado de barlovento; este fenómeno conocido como marea de viento, es muy importante en el estudio de la Laguna Madre, tal y como se señaló en I-2.1.3.3. Existen varios métodos para calcular la sobreelevación, todos ellos suponen condiciones de fondo liso; sin embargo, es bien conocido, por observaciones hechas en el Lago Okeechobe, Florida, que un fondo rugoso o lleno de plantas influye mucho sobre el fenómeno; en el caso de la Laguna Madre, la suposición de fondo liso concuerda en buen grado con la realidad.

El efecto de la rugosidad sobre la amplitud de la marea de viento está en función de la profundidad del cuerpo de agua. A mayor tirante los efectos son menores, llegando a ser 10% a 20% mayor para escasa profundidad cuando el fondo es rugoso que cuando es liso (42)

En aguas profundas el efecto de arrastre superficial debido -

(42) SIBUL G.- Laboratory Study of Wind Tides in Shallow Water. U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 61, August 1955.

156

al viento, es equilibrado por un sistema de contra corrientes que se presenta en las capas inferiores. Para aguas muy someras, la rugosidad frena las contracorrientes y ocasiona una sobreelevación cuya magnitud es tal que permita dar la carga adicional requerida para equilibrar nuevamente el sistema de corrientes y contracorrientes. Es evidente que a mayor fricción, la sobreelevación será mayor.

Entre los métodos para predecir la marea de viento se encuentran los de Hellstrom (43), Keulegan (44) y Thijsse (45), este último, ha sido aplicado sucesivamente en una gran variedad de condiciones de campo.

3.1.2. Análisis Teórico.

El análisis completo de los datos para el cálculo de mareas de viento requiere el conocer numerosas variables, que incluyen: la velocidad del viento y energía transferida entre el aire y el agua, gradientes de temperatura, etc., además de la profundidad y la forma geométrica del cuerpo de aguas, su configuración y la rugosidad del fondo. Teóricamente, se suponen las condiciones de flujo y la viscosidad cerca de la frontera aire-agua.

El análisis teórico más completo y confiable es el de Hellstrom (43)

-
- (43) HELLSTROM B.- Wind Effects on Lakes and Rivers.- Handlenger Ingeniors Vatenkass Akademien No. 158, 1941.
 - (44) KEULEGAN G.H.- Wind Tides in Small Closed Channels.- Journal of Research, U.S. Nat. Bureau of Standards RP2207 Vol. 46, 1951.
 - (45) THIJSSE J. TH.- On Wind Effects. U.S. Waterways Experiment Station Bull. Vol. 2, 1938 .

partiendo de la ecuación de Euler-Navier para el movimiento de un fluido viscoso incompresible de temperatura constante y suponiendo que:

- a. El flujo es laminar.
- b. La profundidad es constante y reducida.
- c. La pendiente de la superficie del agua es pequeña.
- d. La presión depende sólo de la profundidad.
- e. El viento es constante.
- f. El movimiento es uniforme y así las velocidades son independientes del tiempo.

Con estas consideraciones, se obtienen las expresiones:

$$u = \frac{\gamma_a}{\mu} \frac{\partial z_s}{\partial x} \left(\frac{z^2}{2} - z_s z \right) \frac{\tau_0}{z_s} \quad \dots 3.1.1$$

$$v = \frac{\gamma_a}{\mu} \frac{\partial z_s}{\partial y} \left(\frac{z^2}{2} - z_s z \right) \quad \dots 3.1.2$$

donde:

$$\frac{\partial z_s}{\partial x} = \lambda \frac{\tau_0}{\gamma_a z_s} \quad \dots 3.1.3$$

$$\lambda = 3/2$$

u = componente de la velocidad del viento según el eje x .

v = componente de la velocidad del viento según el eje y .

μ = coeficiente de viscosidad.

z = distancia según el eje z .

z_s = profundidad a partir del nivel medio de la superficie del agua.

τ_0 = esfuerzo cortante en la superficie del agua.

γ_a = peso volumétrico del agua.

λ = coeficiente que depende de la turbulencia del flujo.

La fórmula (3.1.3) es independiente del método de derivación y puede considerarse como la básica para calcular el efecto de marea de viento y demuestra que para cuerpos de agua de poca profundidad, la rotación de la tierra tiene un efecto insignificante en los resultados. Hay que recordar que en la fórmula de Euler-Navier aparecen las tres componentes de la fuerza de Coriolis debida a la rotación de la tierra.

Aún más, de acuerdo con Ekman (46), la rotación de la Tierra reducirá el gradiente de la superficie del agua a razón de 0.98 cuando la profundidad del agua está entre 150 y 300 pies; a razón de 0.77 cuando la profundidad está entre 400 y 750 pies; y a razón de 0.66 cuando la profundidad es infinita. Por lo que se refiere a las corrientes, Forel (47) encontró que la dirección de la corriente de superficie en el agua del Lago de Ginebra era la misma que la dirección del viento, y que la de retorno a lo largo del fondo tenía dirección opuesta a la superficial. O sea que también sobre las corrientes el efecto de la rotación de la Tierra para las condiciones señaladas, es despreciable.

Combinando las ecuaciones 3.1.1 y 3.1.2 con las 3.1.3 se obtienen las velocidades "u" y "v", de las partículas de agua, suponiendo que existe un flujo laminar.

(46) EKMAN V.W.- On The Influence of the Earth's Rotation on Oceans Currents.- Arkiv for Matematik. Vol. 2 No. 11, - Stockholm 1905.

(47) FOREL F.A.- Study of Seiches and Wind Tides on Lake Geneva.- Le Léman, I-III, Lausanne, 1892-1904.

$$u = \frac{3}{4} \frac{\tau_0}{\mu} \frac{z_s}{z_s} z^2 - \frac{\tau_0}{2\mu} z \quad \dots\dots 3.1.4$$

$$v = 0 \quad \dots\dots 3.1.5$$

La curva de distribución de velocidades dada por la expresión 3.1.4 es parabólica y las velocidades son cero cuando $z = 0$ o $z = 2/3 z_s$, y la máxima velocidad de retorno se obtiene -- cuando $z = 1/3 z_s$. (ver Figura 3.1.1 para definición de literales).

La distribución de velocidades podrá estudiarse también dividiendo la corriente total en una de arrastre (causado por el viento) y una de gradiente (causada por la sobreelevación).

Resumiendo los resultados para flujo laminar, la ecuación para el gradiente de la superficie del agua en cuerpos de agua limitados de cierta profundidad es la 3.1.3; la fuerza de la fricción por unidad de superficie en el fondo, τ_b , es la mitad del valor de la fuerza de arrastre del viento, τ_s , sobre la superficie y $\lambda = 3/2$.

Si se hace intervenir el efecto de la turbulencia, de acuerdo con Boussinesq, es necesario sustituir el coeficiente de viscosidad cinemática por uno de viscosidad vorticosa, ϵ . Al hacer ésto, Hellstrom vuelve a partir de las ecuaciones de Euler-Navier y llega a la misma expresión 3.1.3 obtenida para flujo laminar con la sola salvedad de que:

$$\lambda = \frac{3}{2} \frac{(C_F \sqrt{\beta} + 2)}{(C_F \sqrt{\beta} + 3)} \quad \dots\dots 3.1.6$$

donde:

β = coeficiente de Boussinesq que da la rugosidad de la frontera.

C_f es un coeficiente que depende de las características del fluido = $45 \frac{m^{1/2}}{seg.}$

si $K \sqrt{\beta} \rightarrow \infty$ $\lambda \rightarrow 3/2$; condiciones de flujo laminar

si $K \sqrt{\beta} \rightarrow 0$ $\lambda \rightarrow 1$

o sea: $1 \leq \lambda \leq 3/2$

Otros investigadores dan la ecuación diferencial para la superficie libre del agua afectada por una fuerza de viento -- constante en forma idéntica a la ecuación 3.1.3.

3.1.3. Cálculo de Perfil de la Superficie del Agua y Sobre-elevación.

Las fórmulas deducidas a la fecha tendientes a calcular el efecto de la marea de viento, pueden dividirse (48) en dos grupos:

- i. Las que dan la elevación h' de la orilla de sotavento sobre el nivel del agua en reposo.
- ii. Las que dan la diferencia S entre el nivel de la superficie del agua de la orilla de Barlovento con respecto de la de sotavento. (Ver figura 3.1.1).

(48) LÓPEZ G.H.- Estudio Teórico Preliminar de la Barra de Tonalá, Chis.- Secretaría de Marina, Depto. de Estudios y Laboratorios, Memo. No. 12, Abril 1964.

Entre las primeras citaremos la de Hellstrom (43):

a. Método de Hellstrom.

La integración de la ecuación 3.1.3 llega a la siguiente expresión:

$$z \frac{2}{3} = \frac{2 \lambda z_0}{\gamma_a} (x + C_1) \quad \dots\dots 3.1.7$$

La ecuación 3.1.7 indica que la superficie del agua es de forma parabólica y puede escribirse en coordenadas (η, ξ) como sigue:

$$\eta^2 = \frac{2 \lambda z_0}{\gamma_a} \xi \quad \dots\dots 3.1.8$$

La ecuación 3.1.8 es la "parábola característica de la superficie del agua" de Hellstrom.

Se pueden considerar 3 casos de acuerdo con la posición relativa del cuerpo de agua respecto de la margen de barlovento (figura 3.1.2).

El primero se tiene cuando no obstante el abatimiento, el fondo no llega a descubrirse. El segundo cuando el fondo está a punto de ser descubierto, y el tercero cuando el desplazamiento de la masa de agua deja parte del fondo al descubierto. El índice del caso de que se trate es la constante C_1 . Para el primero C_1 es positiva, cero para el segundo y negativa para el tercero.

Finalmente la sobreelevación sobre el nivel de reposo puede calcularse con la ecuación 3.1.9:

(43) Op. cit.

$$h = \sqrt{\frac{2 \lambda \zeta_s}{\gamma} (x + c_1) - d} \quad \dots\dots 3.1.9$$

La posición de la línea nodal se obtiene haciendo $h = 0$ en 3.1.9.

b. Análisis de Langhaar (49).

Este análisis se basa en el principio del momentum separando sus efectos en componentes estáticas y dinámicas.

La marea estática es la marea que el viento puede mantener si persiste indefinidamente; la marea debida a los seiches se llama marea dinámica. Hay dos fórmulas diferentes para las mareas estáticas, dependiendo de la magnitud de las mareas de viento.

i. Para mareas pequeñas donde el fondo no está descubierto, la fórmula de cálculo es:

$$h' = \frac{\zeta_s F}{2 \gamma d} \quad \dots\dots 3.1.10$$

ii. Para el caso en que parte del fondo de barlovento está descubierto.

$$P = 3 \sqrt{\frac{3 \zeta_o f d}{\gamma}} \quad \dots\dots 3.1.11$$

P en la ecuación 3.1. 11 representa la profundidad en la orilla de sotavento; la sobreelevación sobre el NMR es $h' = p - d$. La ecuación 3.1.11, determina la marea estática en cualquier lago que no tenga una pendiente de fondo pronunciada, siempre que el viento sea tan fuerte que el fondo quede descubierto en

(49) LANGHAAR H.L.- Wind Tides in Inland Waters.- Proc. Mid. - Western Conf. on Fluid Mechanics. Ann Arbor Mich. 1951.

la orilla de barlovento. Esta ecuación indica que la profundidad del agua en la orilla de sotavento del lago, varía con la potencia 2/3 de la velocidad del viento y con la raíz cúbica de la longitud del lago.

En el segundo grupo de fórmulas mencionaremos la obtenida por Keulegan (44) a partir de una ecuación diferencial para la superficie del agua, idéntica a la ecuación 3.1.3, definiendo al coeficiente como:

$$\lambda = \frac{\zeta_s}{\zeta_0} + 1 \quad \dots\dots\dots 3.1.12$$

Para flujo turbulento, Keulegan adoptó temporalmente el valor $\lambda = 1.25$.

En su estudio experimental dividió la sobreelevación total S en dos partes; a) S_1 , sobreelevación debida a la fricción entre el viento y la superficie del agua; y b) S_2 sobreelevación por efecto de la resistencia del oleaje.

S se define como la diferencia entre las elevaciones de la superficie del agua entre las orillas de barlovento y de sotavento:

$$\begin{aligned} h' &= h_1 + h_2 \\ S &= S_1 + S_2 \quad \dots\dots\dots 3.1.13 \end{aligned}$$

La sobreelevación sin considerar la acción del oleaje vale:

$$S_1 = C_2 \times 10^{-6} \frac{U^2 F}{gd} \quad \dots\dots\dots 3.1.14$$

Y la debida al oleaje:

$$S_2 = C_3 \left(\frac{U - U_0}{gd} \right)^2 F \left(\frac{d}{F} \right)^{1/2} \quad \dots\dots\dots 3.1.15$$

(44) Op. cit.

Keulegan da además los siguientes valores: $C_2 = 3.3 \times 10^{-6}$ y $C_3 = 2.08 \times 10^{-4}$.

U_0 es 1.3 veces la velocidad del viento más baja necesaria para formar oleaje en un gran cuerpo de agua, su valor aproximado es de 1 m/seg. La ecuación de la sobreelevación para un gran cuerpo de agua queda finalmente:

$$s = 3.3 \times 10^{-6} \left[1 + 63 \left(\frac{d}{F} \right)^{1/2} \right] \frac{U^2 F}{gd} \dots 3.1.16$$

Se aplica cuando el cuerpo de agua, tenga aproximadamente la forma de un canal rectangular de sección transversal uniforme.

d. Otros Métodos.

Además de las fórmulas mencionadas para mareas de viento en aguas bajas, hay otras cuyas bases y consideraciones generales son idénticas en forma, pero en la expresión final varían en las constantes usadas. Entre estas puede mencionarse la de Zuider Zee propuesta por Thijase (45).

$$s = \frac{U^2 F}{800 d} \dots 3.1.17$$

Donde s es también como antes la diferencia en elevaciones de la superficie del agua entre barlovento y sotavento, U es la velocidad del viento en millas por hora, F es el fetch en millas y " d " la profundidad en pies. La fórmula fue modificada por Creager et al (50) obteniendo la expresión:

$$h' = \frac{U^2 F}{1400 d} \cos \alpha \dots 3.1.18$$

(45) -Op. cit.

(50) CREAGER W.P., JUSTIN J.U & HINDS J.- Engineering for Dams. Vol. II, John Wiley & Sons, New York 1945.

h^s = sobreelevación en pies del extremo de sotavento a partir -
del nivel del agua en reposo, U está en millas por hora
y α es el ángulo entre la dirección del viento y el eje de ma-
reas, F está en millas y "d" en pies; por su parte Saville (51)
propone:

$$s = \frac{K \lambda \rho_a U^2 F}{\rho g d} \cos \alpha \quad \dots\dots 3.1.19$$

s , es la diferencia en elevaciones de la superficie del agua -
entre las márgenes de barlovento y sotavento del lago o cuerpo
de agua considerado, ρ_a es la densidad del aire, K es una --
constante numérica aproximadamente igual a 0.003, tiene el mis-
mo valor definido en la ecuación (3.1.12) y α , es el ángu-
lo entre el viento y el fetch.

Finalmente en la revisión que hace Sibul (42), de las diversas
fórmulas complementado con sus ensayos de laboratorio estable-
ce la siguiente expresión adimensional:

$$\left(\frac{h}{d}\right) = f \left(\frac{F}{d}\right) \left(\frac{U^2}{Fg}\right)^a \quad \dots\dots 3.1.20$$

Con base en gráficas experimentales se plantea la posibilidad
de predicción de mareas de viento, y más propiamente, de so-
breelevación por mareas de viento, para cuerpos de agua peque-
ños y cuerpos de agua mayores. En la expresión anterior:

a = factor experimental = $2.02 (F/d)^{-0.0768}$
 $f (F/d) = 2.44 \times 10^{-5} (F/d)^{1.66}$ su condición de empleo es -
para áreas de agua que tengan profundidades y anchos unifor-
mes a lo largo del fetch y el eje de la marea sea paralelo a

(51) SAVILLE T. Jr. - Wind Set up and Waves in Shallow Water.
U.S. Army Corps of Engineers. Beach Erosion Board. - Tech.
Memo. No. 27, June 1952.

(42) Op. cit.

la dirección del viento.

Finalmente Bretschneider (52) y (53) aplicando la ecuación 3.1.9 de Hallstrom y la correspondiente a la velocidad uniforme de la corriente de arrastre dada por Rossby y Montgomery obtiene una expresión en función de un coeficiente adimensional k

$$k = \frac{\lambda z_0}{a U_0^2} \dots\dots 3.1.21$$

donde U_0 velocidad del viento.

La función ha sido tabulada poniendo $\frac{h}{d}$ en función de x/F y $\frac{k U_0^2 F}{gd}$ para dos condiciones, fondo expuesto y fondo no expuesto.

3.1.4. Mareas de Viento en la Laguna Madre.

La información de vientos reinantes y dominantes obtenida en el III-1.2 será utilizada para los cálculos de marea de viento, no obstante que el valor preciso del viento, sólo podría conocerse mediante registros a diferentes alturas sobre la superficie de la laguna para obtener la distribución de velocidades según la vertical, es decir de acuerdo con Bretschneider (38) esta distribución presenta características similares a las de las velocidades del agua en su canal.

Los datos resumidos de vientos aparecen en la tabla 3.1.1.

(52) BRETSCHNEIDER C.L.- Engineering Aspects of Hurricane Surge.- Proc. Technical Conf. Hurricanes. Miami, Fla. Nov.1958
 (53) _____ How to Calculate Storm Surge Over the Continental Shelf. Part 2A.- Ocean Industry Vol. 2 No. 7, July 1967.
 (38) Op. cit.

TABLA 3.1.1

VIENTOS REINANTES Y DOMINANTES PARA LA LAGUNA MADRE, TAMP.S.

Mes	Viento Reinante		Viento Dominante	
	Direc.	Velocidad media	Direc.	Velocidad media máxima.
Enero	N	7.75 m/seg.	N	8.91 m/seg.
Febrero	SE	6.55 "	N	10.25 "
Marzo	E	5.08 "	N	8.79 "
Abril	E	5.24 "	N	8.81 "
Mayo	E	5.16 "	SE	6.46 "
Junio	E	5.37 "	E, SE	5.90 "
Julio	E	4.89 "	SE	5.89 "
Agosto	E	4.92 "	E	5.45 "
Septiembre	N	6.37 "	NW	8.90 "
Octubre	N	7.08 "	NW	9.63 "
Noviembre	N	7.64 "	N	8.55 "
Diciembre	SE	6.15 "	NW	10.0 "

(*) Velocidad media máxima = $\frac{R V^2}{R}$

Una vez conocidas las características medias de los vientos reinantes y dominantes se consideró a la Laguna dividida en 4 zonas (Ver plano LM-26).

Zona I. Desembocadura de Soto la Marina.

Zona II. Boca del Catán.

Zona III. Boca de San Antonio.

Zona IV. Zona de las 4 bocas de Santa María y Paso de San Juan.

La posición del espejo libre del agua se obtuvo tanto de diversas fotografías aéreas, como de las inspecciones realizadas, verificándolas con secciones transversales en la laguna y suponiendo que en toda la laguna el nivel es más o menos estable. A partir de esas informaciones se determinaron los diversos fetches para cubrir las diversas posibilidades de marea de viento.

TABLA 3.1.2
FETCHES CONSIDERADOS PARA MAREA DE VIENTO.

Zona	Dirección	Fetch	Prof. media
I	NW y SE	1200 m.	0.95 m.
	E	3000 m.	0.58 m.
II	NW y SE	4500 m.	0.184 m.
	E	14500 m.	0.9 m.
	N	34000 m.	0.50 m.
III	NW y SE	4900 m.	0.455 m.
	E	4500 m.	0.367 m.
	N	19000 m.	0.67 m.
IV	NW y SE	16000 m.	0.60 m.
	E	10200 m.	0.70 m.
	N	31700 m.	0.425 m.

3.1.5. Conclusiones Relativas al Efecto de las Mareas de viento en la Laguna Madre.

Del análisis realizado es posible concluir los siguientes -

puntos:

- Las mareas de viento en la Laguna Madre calculadas por el método directo, para las condiciones en que se encuentra actualmente y con la aproximación que se tiene en la delimitación de las zonas de agua, no difieren grandemente con las que se obtendrían por el método de los incrementos finitos.
- Los valores máximos de marea de viento se encuentran tabulados a continuación:

TABLA 3.1.10

VALORES MAXIMOS DE LA MAREA DE VIENTO (m)

Zona	VIENTO REINANTE				VIENTO DOMINANTE			
	N	E	SE	NW	N	S	SE	NW
I. Desembocadura de Soto la Marina.	No hay influencia							
II. Boca de Catán.	Sep. 0.54		No hay infl. 0.155		Feb. 0.716	Junio 0.091	Mayo 0.142	Dic. 0.246
III. Boca de San Antonio.	Nov. 0.267	Jun. 0.058	Feb. 0.075		Feb. 0.46	Junio 0.069	Mayo 0.073	Dic. 0.162
IV. Paso de San Juan.	Enero 0.52	Junio 0.068	Feb. 0.179		Feb. 0.695	Junio 0.081	Mayo 0.174	Dic. 0.39

- Los valores máximos maximorum se encontraron para la dirección N, aunque para los fetches estudiados, el cálculo puede quedar un poco excedido, ya que las distancias que se desplazan los cuerpos de agua son considerables.
- La dirección SE y NW, que son las que más influencia tienen en el funcionamiento hidráulico de cualquier solución al problema de interconexión con el mar, presentan valores bastante aceptables desde un punto de vista práctico.

3.1.2. Marea de Tormenta.

El avance de un huracán hacia la costa, trae consigo un aumento anormal en el nivel de mareas, siendo en ocasiones, para huracanes muy severos, superior a 5 m. sobre la marea normal.

Es conveniente separar dos términos, sobreelevación de tormenta (storm surge) y marea de tormenta (storm tide). El primero corresponde a la diferencia entre la marea astronómica normal y la real observada durante el meteoro. El segundo corresponde simplemente a la marea observada durante el huracán.

En general, en el análisis de la marea de tormenta deben considerarse las sobreelevaciones debidas al esfuerzo de corte por el viento y a la producida por el efecto de reducción de presión atmosférica sobre la normal.

La marea de tormenta se inicia con una elevación gradual de

nivel de la marea, algunas ocasiones más de 24 horas antes de que la tormenta alcance su distancia mínima al lugar.

Ocasionalmente, la marea llega a ser menor que la normal durante el lapso en que la tormenta se aproxima. Generalmente sigue una rápida elevación del nivel del agua en el momento que los vientos de cierta magnitud, asociados con el huracán se dejan sentir. El punto de elevación máxima de la marea de tormenta se presenta generalmente una o dos horas después de que la tormenta alcanzó la mínima distancia al sitio en cuestión. En áreas con buenas condiciones de drenaje, el descenso del nivel de marea es generalmente más rápido que la elevación y la marea en algunas ocasiones baja más allá de lo normal unas pocas horas después de que la tormenta ha pasado. En tierras pantanosas y otros lugares con drenaje deficiente, pueden requerirse muchos días para que el nivel de las aguas retorne a niveles normales. Es frecuente considerar la onda de tormenta como una onda cuya longitud es del orden de ciento cincuenta kilómetros y período entre 8 y 24 horas. Por esto, es fácil ver que la altura de la onda sobre una costa abierta se modificará sensiblemente en tanto se propaga a través de una bahía o de un río.

La amplitud de ella puede duplicarse fácilmente a unos cuantos kilómetros de la boca de entrada, si la geometría de la bahía presenta orillas convergentes. Análogamente dicha amplitud puede decrecer hasta la mitad de su valor original cuando se propaga dentro de una bahía ancha con una conexión angosta con el mar.

En otros casos, si la marea de tormenta en la costa sobrepasa el cordón litoral en una zona donde exista esta formación, -- las modificaciones sobre este cordón serán tan notables como intensa sea la marea, rompiéndolo y abriendo canales que posteriormente podrán cerrarse o no (ver III-1.2).

En general se ha observado que la marea de tormenta es mayor en regiones en las cuales la plataforma continental es más plana, caso típico del litoral de la Laguna Madre.

Cuando se presentan inundaciones en una zona costera, el -- efecto del oleaje es muy considerable por tanto es conveniente efectuar predicciones cuantitativas del oleaje, asociadas a huracanes y otras tormentas. Sin embargo, las características y efectos sobre el área mencionada depende de la topografía local y pueden variar mucho en pequeñas distancias.

Es sabido que la altura máxima de la ola rompiendo normalmente no será mayor de 0.78 veces la profundidad donde se presenta. Así por ejemplo, si la marea de tormenta alcanza un nivel sobre el nivel medio del mar de 3 m. en una región en la cual la elevación de la tierra es de 1 m., sobre el nivel medio -- del mar, la profundidad del agua será de 2 m. y la máxima altura de ola probable será de 1.6 m. aproximadamente. Dicha al tura podría adoptarse como de diseño en los casos que se re-- quiera protección tierra adentro contra huracanes.

El primer valor máximo maximorum de la marea de tormenta es -- seguido algunas veces de una serie de máximas.

El segundo máximo de la marea de tormenta, se presenta algunas horas después de que la tormenta ha pasado y puede ser tan alto como el primero. Si el primer máximo de la tormenta ocurre aproximadamente al mismo tiempo que el nivel normal de marea baja y el segundo con el de marea alta, este segundo máximo será el más importante.

La marea de tormenta se mueve a través de cuerpos de agua, — bahías por ejemplo, como una onda progresiva, consecuentemente el máximo de la onda en la parte más tierra adentro de la bahía, tendrá lugar horas después de presentación de las condiciones máximas en la costa. De diversas observaciones se ha encontrado que las alturas máximas y mareas superiores a las normales de la onda de tormenta generalmente se presentan predominantemente a la derecha del centro de la perturbación.

3.1.2.1. Teorías de las Mareas de Tormenta.

Las ecuaciones completas de movimiento que gobiernan la generación de ondas de tormenta no han sido resueltas en forma precisa. Hay varias formas de obtener soluciones analíticas simplificadas, una de ellas es suponer el mar como un lago rectangular de profundidad constante no sujeto a efectos de la fuerza de Coriolis. Otra es partir de la consideración de mar ilimitado con una sola frontera, el fondo, variando la profundidad según una pendiente constante. En el caso de cuerpos de agua alargados y estrechos se pueden introducir la simplificación adicional de suponer un flujo unidireccional y horizontal. Más

aún, las ecuaciones para este tipo de flujo son compatibles -- con las principales variables de generación de la onda de marea de tormenta.

Por otra parte, en lo que se refiere a las características de la pendiente de la superficie del agua, ello está en razón directa de una cierta potencia de la velocidad, e inversa de la profundidad de propagación.

Cuando el fenómeno se estudia en una costa abierta, hay que tomar en cuenta que la tormenta es de dimensión finita y tiene además un movimiento que, en algunos casos, generará una corriente paralela a la costa debido al gradiente producido por las distintas elevaciones de la superficie del agua a lo largo de la playa. Esta corriente traerá consigo un abatimiento de los valores de la marea generada sólo por la componente del viento normal a la costa.

También hay que considerar que la fuerza de Coriolis, actuando sobre la corriente paralela, producirá una sobreelevación a la derecha de la corriente. Todos estos factores tendrán influencia si la duración de la tormenta es suficiente para su desarrollo completo.

Resumiendo, los factores más importantes en la generación de mareas de tormenta son el arrastre superficial del agua del mar por efecto del viento y la reducción de la presión atmos

férica consecuencia del paso del ojo del huracán. Hayes (15) señala que otros factores que influyen sobre las características de la marea de viento en la costa, son:

- Configuración de la línea de playa.
- Tamaño y pendiente de la plataforma continental. A menor pendiente y mayor extensión, la marea se amplifica considerablemente.
- Angulo entre la trayectoria del huracán y la línea de costa. El efecto mayor se tiene cuando el ángulo entre la costa y el lado exterior derecho de la tormenta forman 90° .
- Fase con la marea astronómica.
- Efectos de lluvia.
- Transporte de agua por rotura del oleaje.
- Topografía costera.
- Convergencia de corrientes generadas por el viento en el mar.

3.2.2. Métodos para valuar la marea de tormenta.

Existen diversos métodos para valuar la marea de tormenta, entre ellos citaremos el de Harris (54) y el de Bretschneider (52). El primero se basa en una serie de observaciones realizadas en la costa Atlántica de los Estados Unidos de América.

3.1.2.3. Análisis para la Laguna Madre.

(15) Op. cit.

(52) Op. cit.

(54) HARRIS D.L.- The Hurricane Surge.- Proc. 6th Conf. on Coastal Engineering. Council on Wave Research 1958.

Para el caso particular de la Laguna Madre es de importancia considerar el efecto de la marea de tormenta, ya que su influencia es decisiva en el llenado de ella.

De acuerdo con la información recabada, y asentada en capítulos anteriores, se ha podido apreciar que la Laguna Madre recupera una buena cantidad de agua en la época de ciclones.

Este hecho se debe principalmente a que la marea de viento sobrepasa la cota de las dunas en el cordón litoral permitiendo así un llenado parcial de la laguna.

Para el caso particular del cálculo de la marea de tormenta se escogieron los ciclones Carla (septiembre 9 de 1961) e Inés (10 de octubre de 1966). Los datos correspondientes a estos se consignan a continuación:

Huracán Carla:

Fecha: 9 de septiembre de 1961

Hora: 0 hs.

Viento formativo + 38 nudos = 19.5 m/seg.

Dirección: NE

Presión mínima: 1002 mb.

$F = 82 \text{ Km.} = 44.23 \text{ mi. naut.}$

Prof. media = 40 m.

Huracán Inés:

Fecha: 10 de octubre de 1966.

Hora: 6 hs.

Viento formativo 65 nudos = 33.5 m/seg.

Dirección: SE

Presión mínima: 1002 mb.

Fetch $F = 46 \text{ Km} = 24.8 \text{ mi. naut.}$

Prof. media = 20 m.

Evaluación de la marea de tormenta.

Huracán Carla:

Calculemos primero el efecto de reducción en presión atmosférica:

Si $r = R$

$$h_1 = 1.14 \times 0.63 \Delta P_o = 0.719 \Delta P_o$$

$$\Delta P_o = 1002 \text{ mb} = 34.6 \text{ in. de Hg}$$

$$P_n = 30 \text{ in de Hg}$$

$$P = 4.6 \text{ in de mercurio}$$

$$h_1 = 0.719 \times 4.6 = 3.3 \text{ ft} = 1.0 \text{ m.}$$

El efecto del viento será:

Dirección: NE

$$U = 38 \text{ nudos} = 19.5 \text{ m/seg.}$$

$$F = 8200 \text{ m.}$$

hasta $d = 100 \text{ m.}$

$$d_m = 40 \text{ m.}$$

$$h_2 = 40 \left[\frac{6 \times 10^{-6} \times 3.8 \times 10^2 \times 8.2 \times 10^4}{9.81 \times 1.6 \times 10^3} + 1 - 1 \right]$$

$$h_2 = 40 (\sqrt{1.0119} - 1)$$

$$h_2 = 0.40 \text{ m.}$$

$$h_{TOT} = 1.0 + 0.4 = 1.40 \text{ m.}$$

Ciclón Inés:

El valor del efecto de reducción en presión atmosférica es igual al caso anterior ya que las presiones mínimas son iguales en cada caso.

$$h_1 = 1.00$$
$$h_2 = 20 \left[\frac{6 \times 10^{-6} \times 1.12 \times 10^3 \times 3.2 \times 10^4}{9.81 \times 4 \times 10^2} + 1 - 1 \right]$$

$$h_2 = 0.5 \text{ m.}$$

$$h = 1.5 \text{ m.}$$

3.1.2.4. Conclusiones Relativas.

De los cálculos realizados se puede observar que la marea de tormenta adquiere valores de 1.50 m. que equivalen a 5 ft. Si se compara este valor con el registrado en Puerto Isabel (55) en la parte Sur de la Isla Padre se puede constatar que este valor calculado coincide con él. Este hecho confirma que los cálculos realizados se ajustan bastante bien a la realidad y que para condiciones similares a las de los ciclones Carla e Inés, es posible esperar valores de la marea de tormenta semejantes.

Es importante hacer notar que esta marea de viento registrada se presenta con una forma similar a la de una onda de avenida, siendo el tiempo de duración de 4 días.

(55) U.S. DEPT. OF COMMERCE.-- Weather Bureau Climatological Data, National Summary, Sept. 1961, Vol. 12 No. 9.

3.3. REGIMEN DEL OLEAJE, PROPAGACION. OLEAJE DE TORMENTA.

La influencia del oleaje en el litoral de la Laguna Madre es definitiva, máxime si se considera la débil variación de mareas que se tiene en la zona, ya que de acuerdo con Hayes (15), si se establece una clasificación energética de las costas de depósito de acuerdo con la variación de marea, para un rango entre 0 y 1.50 m., la costa en cuestión pertenecerá al grupo de las dominadas por el oleaje.

Los efectos del oleaje sobre el litoral se tratarán ampliamente en (III-3.4), por tanto nos concretaremos a analizar el oleaje hasta la etapa anterior a su acción sobre la playa.

3.3.1. Generación del Oleaje.

El principal agente productor de oleaje es el viento; el fenómeno es un caso típico de transmisión de energía. El viento puede hacerlo por empuje directo, por efectos de corte y por diferencias de presión.

En las consideraciones sobre la relación entre, la transmisión de energía con las características del oleaje generado, es necesario tomar en cuenta los siguientes factores que tienen influencia definitiva en ellas.

a. Fetch (F). El área del océano donde actúa el viento, se denomina zona de generación; dentro de dicha zona el oleaje -

(15) Op. cit.

presenta características caóticas, de hecho existen las llamadas ondas de cresta corta en las cuales las partículas comportan condiciones tridimensionales de movimiento, a diferencia del oleaje común en el que dicho movimiento se analiza en dos dimensiones. Por otra parte, dada la forma de acción del viento con respecto a su origen según la disposición de las curvas isobáricas, de la zona de generación salen oleajes en muy diversas direcciones, por ello bajo el punto de vista de un estudio particular se analizan aquellas cuya dirección forme un ángulo de 30 a 45° con respecto a la dirección media de viento; la longitud del área de generación en esa dirección es lo que se llama fetch.

b. Velocidad del viento, (v). La diferencia de presiones atmosféricas entre dos puntos determinados, da lugar a un gradiente cuya consecuencia es el viento que denominaremos viento de gradiente. Agentes externos como la fuerza de Coriolis debida a la rotación de la tierra, la fuerza centrífuga y los efectos de fricción por el contacto con la superficie de la tierra dan lugar al viento "real" (ver III-1.2.1).

La intensidad del viento tal y como se observa sobre la superficie del globo sea tierra firme o el mar dependerá entonces de:

- i. Gradiente bórico
- ii. Latitud de la zona de generación
- iii. Grado de curvatura de las isobaras

iv. Efecto de fricción

c. Tiempo de duración (t_d), su influencia es definitiva en cuanto a que la cantidad de energía cedida por el viento dependerá de su tiempo de acción.

Dentro de los tres factores fundamentales mencionados (F , v , t_d), se distinguen ciertos conceptos y relaciones que determinan las características del oleaje al salir de la zona de generación. Así por ejemplo para un fetch determinado y de longitud suficiente, la acción de un viento de velocidad U podría o no llegar a desarrollar el oleaje de máximas características correspondientes a estos dos parámetros, siendo el factor de dependencia el tiempo de duración si éste es lo suficientemente prolongado para alcanzar ese estado, el tiempo de duración corresponderá a lo que se llama tiempo de saturación o tiempo mínimo, en caso contrario el oleaje quedará acotado en cuanto a su desarrollo, por el tiempo de acción del viento.

El caso contrario es cuando no se tiene limitación de tiempo, pero el fetch que se requiere para un crecimiento completo del oleaje sea mayor que el disponible (fig. 3.3.1).

Hasta aquí se ha supuesto constante la velocidad del viento en un lapso dado, pero cuando hay variaciones de velocidad, es necesario hacer una serie de consideraciones de remanentes energéticos y formas de cambio de la velocidad, para llegar a determinar las características del oleaje. Estas consideraciones son:

- a. La variación de velocidad es instantánea y se presenta a la mitad de la diferencia de tiempo entre dos lapsos consecutivos.
- b. La energía absorbida en un lapso anterior es guía para establecer las nuevas relaciones de velocidad, tiempos y fetches de duración.

En general todos estos aspectos volverán a tocarse al realizarse los cálculos de predicción de oleaje, por lo que se continuará con el estudio de la propagación del oleaje al abandonar la zona de generación y entrar a la llamada área de decaimiento.

A medida que las olas se alejan de la zona de generación, van sufriendo una transformación gradual, perdiendo pequeñas irregularidades por efectos viscosos y de fricción. Las características que adquiere el oleaje generado serán función de las condiciones encontradas en la zona de decaimiento y de la longitud de ésta en la dirección de propagación de aquel. Es decir su comportamiento como ondas libres se inicia en la zona de decaimiento, dentro de ella podrá encontrar inclusive vientos en dirección opuesta que lo afecten substancialmente; en este caso consideramos únicamente que el oleaje se transformará en función de la longitud de la distancia de decaimiento. El límite de esta distancia en un caso general es el de aguas profundas, es decir, la zona para la cual la profundidad "d" es igual a la mitad de la longitud de onda; a partir de ese -

momento el oleaje se verá afectado por el fenómeno de refracción.

3.3.2. Propagación

Introducción.

En la teoría lineal de ondas progresivas, la celeridad está dada por la ecuación:

$$C = \sqrt{\frac{g L}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \dots\dots 3.3.1$$

Esta celeridad depende tanto de la profundidad, como de la longitud de onda. La relativa importancia de la profundidad y longitud de onda depende del coeficiente de estas variables independientes $(\frac{d}{L})$.

Cuando la relación d/L es grande, mayor que $1/2$, la celeridad es función tan sólo de la longitud de onda, es decir del período.

$$\frac{L}{T} = C = \sqrt{\frac{g L}{2\pi}} \text{ y } L = 1.56 T^2 \dots\dots 3.3.2$$

Esto se debe a que cuando $\frac{d}{L} = 0.5$, $\tanh \frac{2\pi d}{L} = 0.9963 = 1$

Cuando esa relación es pequeña, digamos menor que $1/10$ la ecuación 3.3.1 se transforma en la siguiente:

$$C = \sqrt{g d} \dots\dots 3.3.3$$

en donde la celeridad es función de la profundidad y la onda oscilatoria se convierte en onda de translación.

Para ondas en las que la relación $d/L < 1/2$; cada parte de la onda viaja con una celeridad que depende de la profundidad; si la profundidad no es constante, la onda se deforma.

A esta deformación de la onda se le conoce como "refracción" del oleaje, por la similitud que guarda con el fenómeno luminoso.

Por esto, el tratamiento del fenómeno de refracción del oleaje desde el punto de vista ingenieril se puede hacer a partir de lo que en óptica se conoce como Ley de Snell (*).

$$\frac{\text{Sen } \alpha_2}{\text{Sen } \alpha_1} = \frac{C_2}{C_1}$$

..... 3.3.4

En donde α_1 y α_2 son los ángulos formados por las crestas del oleaje y las respectivas batimétricas y C_1 y C_2 son las celeridades de propagación de la onda a las profundidades d_1 y d_2 respectivamente.

Diagramas de Refracción.

El análisis práctico del fenómeno de refracción se hace empleando el "método de los planos de oleaje". Para el trazo de estos planos hay diversas técnicas, sin embargo en todas ellas los principios básicos de representación son los mismos y los cuales se mencionan en seguida.

- La energía de la onda y del conjunto se representa mediante canales de energía limitados por líneas llamadas ortogona-

(*) La analogía en este caso sería: α_1 y α_2 ángulos de incidencia y refracción de la onda luminosa y C_1 y C_2 velocidades de propagación en medios de diferente refringencia.

lva, es decir, líneas normales siempre a los frentes de onda.

- La energía es constante a lo largo de esos canales de energía.
- El período es constante.

De acuerdo con lo anterior, cuando el fondo no afecta el oleaje, los planos de olas son una cuadrícula perfecta, es decir frentes sucesivos son paralelos y consecuentemente las ortogonales también.

Al rebasar el límite $\frac{d}{L} = \frac{1}{2}$ la onda empezará a deformarse y el paralelismo dejará de existir, manteniéndose solamente la condición gráfica de perpendicular entre frentes de onda y ortogonales. Sin embargo para trabajos que requieren menor precisión, el límite de aguas profundas puede modificarse, así si se toma el valor de la profundidad relativa $\frac{d}{L} = 0.25$ como dicho límite, el error introducido en el cálculo de la celeridad es de sólo 8%.

El método de trazo elegido (70) requiere del uso de una regla especial de forma de triángulo donde en el cateto mayor aparecen valores de la relación $\frac{d}{L_0}$, siendo L_0 la longitud de la ola en aguas profundas y d la profundidad particular que se considere; las ordenadas correspondientes a esas graduaciones o sea el cateto menor de esos triángulos representan a una cierta escala, los avances o la distancia que la ola es capaz de recorrer, de acuerdo con sus características,

(70) JOHNSON J.W., O'BRIEN M.P. & ISAACS J.D.- Graphical Construction of Wave Refraction Diagrams.- U.S. Navy Hydro. Office. Pub. No. 605, Jan. 1948.

en esa profundidad d .

Cuenta además con una recta que divide por mitad a dichos avances partiendo del vértice del triángulo hacia la mitad del cateto menor, esto es debido a que se supone que la profundidad d es una profundidad media de propagación.

A partir del primer frente de onda, que se traza recto por estar fuera de la zona de refracción se inicia el trazo del diagrama apoyando el cateto mayor sobre dicho frente; cuando con la recta de profundidades medias se corta a la batimétrica d correspondiente, se marca sobre el extremo de la ordenada un punto que formará parte del siguiente frente de onda. Repitiendo este proceso se obtendrá el conjunto de frentes para un instante dado o sea la imagen de la propagación de una sola onda.

Con los frentes ya dibujados se procede al trazo de las ortogonales y posteriormente al cálculo de la altura de ola, a partir de la hipótesis básica de conservación de energía. Este cálculo se hace así:

Considerando que en general la potencia de una ola está dada por la expresión

$$P = n \frac{E}{T} = \frac{1}{8} \gamma H^2 C \quad \dots\dots\dots 3.3.5$$

donde:

n = factor de grupo

E = energía del oleaje = $\frac{1}{8} \gamma H^2 L$

T = período

C = celeridad de la onda

Como $C_G = n C$, es decir C_G representa la celeridad de la familia de ondas a la que pertenece la ola considerada, C_G se denomina celeridad de grupo y C es la celeridad de la onda fundamental.

Introduciendo el principio de conservación de energía y el aspecto gráfico de que la energía de una onda en una posición cualquiera está representada por la separación "b" entre ortogonales, se llega a la expresión buscada o sea:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{Go}}{C_G}} \sqrt{\frac{b_0}{b}} \dots 3.3.7$$

en donde:

- H = altura del oleaje en la zona por estudiar
- H_0 = altura del oleaje en aguas profundas
- C_{Go} = celeridad del grupo en aguas profundas
- C_G = celeridad del grupo en la zona por estudiar
- b_0 = ancho entre ortogonales en aguas profundas
- b = ancho entre ortogonales en la zona por estudiar

En la expresión (3.3.7) se llama:

$$\text{Coeficiente de refracción } K = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \dots 3.3.8$$

$$\text{Coeficiente de aguas reducidas } D = \sqrt{\frac{C_{Go}}{C_G}} \dots 3.3.9$$

3.3.3. Estudios de Refracción para la Zona de la Laguna Madre.

De III-1.3, se obtuvieron entre otras conclusiones aquellas — que nos servirán para el trazo de los diagramas de refracción. Dentro del conjunto de oleajes para aguas profundas tanto en — lo que se refiere a oleajes (sea) locales como a distantes — (Swell) las direcciones específicas para nuestro caso son: Nor-
reste, Este, Sureste y Sur.

En cuanto a los períodos, se adoptó un valor único de $T = 6$ — segundos como período medio para las cuatro direcciones, tanto para oleaje local como para el distante, lo que da como resul-
tado una longitud de onda $L_0 = 54.7$ m. En consecuencia el lí-
mite de aguas profundas es $d = \frac{L_0}{2} = 27.3$ m. Con esos datos y aplicando el procedimiento detallado en III-3.3.2, se traza-
ron los planos de oleaje, cuyos resultados se consignan en los planos LM-30, 31, 32, 33. En III- 3.4 se explica su aplicación al estudio del transporte litoral.

3.3.4. Predicción del Oleaje.

La predicción del oleaje se hace a partir de la información su-
ministrada por las cartas del tiempo, es decir cartas represen-
tativas del estado de la atmósfera en un área determinada. En
general, independientemente del método usado, es necesario de-
finir previamente los factores que se señalaron en III-3.3.1
es decir, fetch, velocidad de viento y tiempo de duración.

Por lo que se refiere al Fetch hay que considerar, como se ha -
indicado, que los oleajes que salen de la zona de generación, -
cuyas características son interesantes de conocer pueden formar
ángulos entre 30° y 45° con respecto a la dirección media del -
viento. Para la delimitación del fetch se puede seguir el criteri
rio anterior, es decir fijar la frontera en forma tal que la líne
a que una al sitio en cuestión forme con las isobaras en la -
zona de generación, ángulos de 30 a 45° dependiendo del grado -
de curvatura de dichas curvas. Una segunda forma es la limita---
ción por frente atmosférico, es decir, fronteras entre dos masas
de aire de diferentes características; la tercera forma es con---
siderar el fetch limitado por la costa propiamente dicha.

La velocidad generadora se determina a partir de la separación
entre isobaras, en grados de latitud y de acuerdo con la lati---
tud de la zona de generación.

Este primer análisis permite calcular la velocidad del viento -
geostrófico.

$$V_g = \frac{1}{2 w \rho_a \text{ sen } \phi} \frac{\partial p}{\partial l} \quad \dots\dots 3.3.10$$

V_g = velocidad del viento geostrófico

w = velocidad angular de la tierra (0.279×10^{-4} rad/seg)

ϕ = latitud en grados

ρ_a = densidad del aire

$\frac{\partial p}{\partial l}$ = gradiente bórico

Corrigiendo posteriormente por efecto de la fuerza centrífuga,
de acuerdo con la curvatura de las isobaras y tomando en cuen---
ta la influencia de la fricción, en función de la diferencia -

de temperatura entre el mar y la atmósfera en sus capas en contacto con él, se obtiene la velocidad U del viento generador. El tiempo de duración se estima en base a las características isobáricas en cartas consecutivas de tiempo, generalmente reportadas cada 6 horas.

Los métodos de predicción más usados son dos, el primero idealiza las condiciones del mar para una cierta relación entre la acción del viento y el océano, representando dichas condiciones con una ola significativa (ver III-1.3.1). El segundo método utiliza el espectro de energía del oleaje para describir los efectos producidos por el viento. Es conveniente establecer el concepto de ESPECTRO, antes de comparar los dos métodos y desarrollar el empleado para el caso de la Laguna Madre. Se ha mencionado que para una velocidad dada de viento, con fetch y tiempo de duración suficientes, la energía transmitida por él al mar alcanzará un punto límite o de saturación. Conviene agregar que en la zona de generación, la energía total del oleaje se distribuye en un amplio rango de longitudes de onda (L) o períodos (T) o frecuencias (f). La función que describe matemáticamente la distribución del cuadrado de la altura de la ola, (energía de la ola, ver fórmula 3.3.6) relacionado con la frecuencia ($f = \frac{1}{T}$) se llama espectro del movimiento de la ola, o más simplemente espectro del oleaje.

Ahora bien, como el cuadrado de la altura de la ola está relacionado con la energía del oleaje, el espectro puede llamarse también espectro de energía.

La energía total acumulada por el oleaje entre la frecuencia más alta $f = \infty$ y la más baja $f = 0$ se obtiene integrando la función del espectro del oleaje. Este integral se llama el

espectro coacumulativo o espectro coacumulativo de potencia. - De los dos métodos anteriores, eligiremos el primero, ya que el segundo no ha tenido una aplicación muy amplia aún, que haya permitido la comparación de resultados no obstante que en los pocos casos en que se ha hecho, no hay gran diferencia con el primero. Concluyendo, del segundo método nos concretaremos sólo a hacer una breve descripción de su aplicación.

La predicción del oleaje por el método del espectro, de acuerdo con lo establecido por Pierson, Neumann y James (71) se apoya en la utilización de las curvas C.C.S. (Co Cumulative Spectra) o curvas del espectro coacumulativo de potenciales de viento, determinándose las características del oleaje según que el tiempo de duración o el fetch limiten o gobiernen esas características. La combinación de velocidad de viento, fetch o tiempo de duración aplicada en las curvas CCS da como resultado valores de la frecuencia $f = \frac{1}{T}$ y de la energía E_f , a partir de la cual pueden calcularse diversos valores de altura de ola de acuerdo con las siguientes relaciones establecidas por Longuet-Higgins (35)

Altura de la ola más frecuente	1.41 E_f
Altura mediana	1.77 E_f
Altura significativa	2.83 E_f
Altura media del 10% de olas más altas	3.60 E_f

3.3.3.1. Análisis para la Laguna Madre.

(35) Op. cit.

(71) PIERSON W.J. Jr., NEUMANN G. & JAMES R.W.- Practical Methods for Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectra and Statistics.- H.O. Pub. No. 603 U.S. Hydrographic Office. 1960.

La predicción de oleaje para la Laguna Madre, tendrá por objeto conocer los efectos que pueden tener los huracanes sobre su litoral. El problema que representa la predicción en el caso de una tormenta que se desplaza sobre el mar, puede resolverse aplicando el método de Wilson (72) aunque según experiencias diversas (73), si el desplazamiento de la tormenta no es muy rápido y su configuración isobárica es más o menos regular puede aplicarse más simplemente el método de Pierson Neumann y James (71) o el de Sverdrup-Munk-Bretschneider (74). En el caso que nos ocupa, se optó por seguir esta recomendación y usar el segundo método cuyas consideraciones generales de aplicación se describen enseguida.

El método S-M-B parte de la consideración original de Sverdrup y Munk (75) de tomar variables a la velocidad U del viento formativo, la longitud del fetch F y el tiempo de duración del viento t_d y obtener la altura y período de la ola significativa en el frente del fetch. La modificación introducida por Bretschneider fue la de suponer que cuando se presente un cambio en la velocidad U del viento formativo, entre dos cartas de tiempo separadas por un lapso β , dicho cambio se producirá instantáneamente a la hora $\beta/2$, después de la primera

(71) Op. cit.

(72) WILSON B.W.- Graphical Approach to the Forecasting of Waves in Moving Fetches.- Technical Memo. No. 73. Beach Erosion Board, April 1955.

(73) BRETSCHNEIDER C.L.- Revision in Wave Forecasting Deep and Shallow Water.- Proc. 6th Conf. on Coastal Engr. Council on Wave Research 1958.

(74) PRETSCHNEIDER C.L.- Revised Wave Forecasting Relationships. Proc. 2and Conf. on Coastal Engr. Council on Wave Research 1952.

(75) SVERDRUP H.Y & W.H. MUNK.- Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting.- H.O. Pub. No. 601, U.S. Navy Dep. 1947.

carta; las olas producidas por la segunda velocidad de viento formativo se calculan considerando que la duración mínima del tiempo de acción de la velocidad obtenida de la primera carta, se incrementa en $\beta/2$ horas, o que en su caso el fetch se incrementó en $\Delta F/2$ siendo ΔF la diferencia entre los fetches de las dos cartas. Resumiendo la velocidad de viento U genera una ola cuyas características serán función de:

Velocidad de viento	$-U_1$
Tiempo de duración	$t_m + \beta/2$
Fetch	$F_m + \Delta F/2$

Las olas para el lapso siguiente agregarán algebraicamente, - para las nuevas condiciones de velocidad, la energía absorbida durante el primer lapso.

La serie de combinaciones posibles se hace utilizando las gráficas de Bretschneider (74).

La ola así obtenida corresponde al límite anterior del fetch, - Para el estudio completo de esa ola es necesario aplicar, en la mayoría de los casos, una corrección por efecto de decaimiento. El límite de la zona de decaimiento lo marca la profundidad para la cual $d = \frac{L_0}{2}$. La corrección por decaimiento se hace utilizando las curvas de decaimiento preparadas por Bretschneider (74) en las que se ligan los valores del fetch mínimo, la distancia de decaimiento y la relación entre las características de la ola en el fetch a las que tendría al final

(74) Op. cit.

de la distancia de decaimiento.

Es decir tomando como datos

F_{min} = fetch mínimo

D_c = distancia de decaimiento

H_f = altura de ola en el frente del fetch

T_f = período de la ola en el frente del fetch

Se obtienen relaciones

T_d/T_f y H_d/H_f

donde T_d y H_d = período y altura de la ola al final de la zona de decaimiento.

Huracanes Analizados.

Entre los huracanes que se han presentado en el área, se seleccionaron dos:

Carla (Septiembre de 1961)

Inés (Octubre de 1966)

El primero por haber sido el más violento de los últimos años; en tanto que el segundo por haber incidido directamente sobre el litoral en la zona considerada.

El resumen de características de oleaje se consigna en las tablas 3.2.5 a 3.2.8.

TABLA 3.3.5
 PERIODOS
 AL FINAL DEL FETCH T_p (segundos)

HURACAN	FECHA	LUGAR	H O R A			
			0 0:00	06:00	12:00	18:00
CARLA	8-IX-61	Sur		6.6	9.4	11.3
"	9-IX-61	Sur	10:8	11.7	9.6	8.5
"	8-IX-61	Norte		6.6	9.4	11.6
"	9-IX-61	Norte	10.7	12	9	8.3
"	10-IX-61	Norte	10.1			
INES	8-X-66	Sur		5.8	8.8	11.5
"	9-X-66	Sur		14.5	12.8	11.8
"	10-X-66	Sur		15	13.8	
"	8-X-66	Norte		8.5	10.9	10.8
"	8-X-66	Norte		9	9.2	9.9
"	10-X-66	Norte		9.9	10.6	

TABLA 3.3.6
 PERIODOS
 AL FINAL DE LA ZONA DE DECAIMIENTO T_d (segundos)

CICLON	FECHA	LUGAR	H O R A			
			00:00	06:00	12:00	18:00
CARLA	8-IX-61	Sur		9.2	11.5	12.4
"	9-IX-61	Sur	10.8	11.7	9.6	8.5
"	8-IX-61	Norte		9.6	11.9	12.2
"	9-IX-61	Norte	11.8	12	9	8.3
"	10-IX-61	Norte	10.1			
INES	8-X-66	Sur		8.1	11.5	13.8
"	9-X-66	Sur		16.4	11.5	13.8
"	10-X-66	Sur		15	13.8	

CICLON	FECHA	LUGAR	H O R A		
INES	8-X-66	Norte	12.3	13.4	12.7
"	9-X-66	Norte	10.1	10	9.9
"	10-X-66	Norte	11.1	13.1	

TABLA 3.3.7

ALTURAS DE OLA AL FINAL DEL FETCH H_p (m)

CICLON	FECHA	LUGAR	H O R A			
			00:00	06:00	12:00	18:00
CARLA	8-IX-61	Sur		2.50	4.27	4.21
"	9-IX-61	Sur	5.64	4.33	2.38	3.54
"	8-IX-61	Norte		2.50	4.27	4.09
"	9-IX-61	Norte	5.03	4.48	2.14	3.42
"	10-IX-61	Norte	3.81			
			00:00	06:00	12:00	18:00
INES	8-X-66	Sur		1.92	4.27	5.95
"	9-X-66	Sur		10.07	8.24	5.95
"	10-X-66	Sur		11.90	8.54	
"	8-X-66	Norte		4.58	5.43	5.03
"	9-X-66	Norte		2.96	3.63	4.58
"	10-X-66	Norte		4.03	5.83	

TABLA 3.3.8

ALTURAS DE OLA AL FINAL DE LA ZONA DE DECAIMIENTO H_d (m)

CICLON	FECHA	LUGAR	H O R A			
			00:00	06:00	12:00	18:00
CARLA	8-IX-61	Sur		0.61	2.26	2.84
"	9-IX-61	Sur	5.64	4.33	2.38	3.54
"	8-IX-61	Norte		0.60	1.84	3.39

tud de ella y las fuerzas hidrodinámicas que genera son muy débiles, por tanto es el efecto directo de oscilación el que tiene mayor influencia sobre un fondo arenoso poniendo las partículas en equilibrio inestable, siendo así fácilmente transportadas por una corriente por débil que sea.

La mecánica del transporte de las partículas requiere de varias etapas previas, ellas son:

- i. Desarrollo de una capa límite laminar oscilatoria.
- ii. Aparición de turbulencia en la capa límite.
- iii. Iniciación del movimiento de arena.
- iv. Movimiento general de los granos.
- v. Desarrollo de ripples.
- vi. Transporte general.

Es decir, con un incremento constante de la velocidad de las partículas de agua en las vecindades del fondo, algunos granos de él entran en movimiento; después debido a la turbulencia generada por el aumento en la velocidad, un mayor número de granos participan de ese movimiento hasta que se establece un movimiento general. Enseguida aparecen los rizados (ripples) cuyo tamaño va en aumento a medida que la velocidad sigue creciendo para finalmente desaparecer, mientras que en el fondo, un "tapete" de material se mueve creando un transporte general o masivo en la dirección de la propagación del oleaje.

Posteriormente por efectos del fondo sobre el oleaje, se pro

duce la rompiente del mismo, originando, cuando se presen--
tan con una cierta dirección frente a la línea de playa, una
corriente por la fosa producida por la rotura de la ola, co--
nocida con el nombre de corriente longitudinal (long-shore -
current) o bien en el caso de no existir dicha fosa, una co--
rriente en zig-zag o diente de sierra, producida por el avan--
ce de la masa de agua sobre la playa y su retroceso por la -
línea de máxima pendiente. Como esta masa de agua en movimien--
to lleva considerables partículas en suspensión, se origina -
el transporte litoral a lo largo de la costa, pero principal--
mente por la parte alta de la playa.

Basados en el esquema clásico de corrientes litorales de --
Shepard e Inman (76) y Arlman et al (77), es posible comple--
mentar el diagrama de corrientes y transporte litoral (figura
3.4.1), en el que se aprecia básicamente la zona exterior de
la playa, la zona interior, el estrán, la línea de rompiente,
las corrientes longitudinales, las de "diente de sierra" y --
las de retorno (rip-currents). Estas últimas se producen en -
forma normal a la playa rompiendo la línea de rompientes y --
tienen como objetivo fundamental, desalojar hacia mar adentro
la masa de agua y de material en suspensión que va siendo acu--
mulado sobre la zona interior de la playa ya sea por corrien--
te longitudinal o por la corriente "diente de sierra". Gene--
ralmente produce atrás de la línea de rompientes, una zona de

-
- (76) SHEPARD F.P., INMAN D.- Near Shore Circulation.- Proc. -
of First Conference on Coastal Engineering. Council on -
Wave Research, 1951.
- (77) ARLMAN J.J., SANTEMA P. & SVASEK J.N.- Movement of Bottom
Sediment in Coastal Waters by Currents and Waves; Measure--
ments with the Help of Radioactive Tracers in the Nether--
lands.- Beach Erosion Board.- Tech. Memorandum No. 105,
March 1958.

acumulación de material que servirá posteriormente como zona de alimentación para el siguiente tramo de playa.

En el estado actual de los conocimientos sobre este fenómeno no se ha podido definir el espaciamiento de estas corrientes a lo largo de una playa, sabiéndose solamente que su separación puede variar en algunas centenas de metros.

3.3.1. Zonas de Transporte.

Zona Exterior.

Cuando el oleaje empieza a ser sometido a los efectos de la fricción con el fondo, se presenta, a partir de una cierta profundidad, una interacción entre las moléculas de agua y las partículas del fondo. Esta interacción se produce como resultado del movimiento oscilatorio de las moléculas de agua, que somete a los granos de sedimento a fuerzas hidrodinámicas que tienden a ser equilibradas por el peso propio de los granos. La resultante de estas dos acciones determinará la magnitud y dirección del transporte de arenas en esta zona, que generalmente resulta ser paralelo a la dirección de propagación del oleaje hasta llegar a la zona de rompientes donde las características de movimiento son diferentes.

Línea de rompientes.

Se denomina así a la zona donde se producen las rompientes del oleaje y dependiendo de las características de éste y la

pendiente de la playa, es posible que se tengan una o más líneas de rompientes.

Zona Interior.

Limitada por la línea de rompientes y por la traza del nivel medio de mareas bajas, esta zona presenta un intenso movimiento de material debido a la turbulencia generada por la rotura de las olas. La mayor parte del material se mueve en suspensión. Por otra parte la rotura de las olas trae como consecuencia la formación de barras arenosas cuyo seno sirve de canal natural a la circulación de corrientes a lo largo de la playa (long-shore currents).

Estrán.

Comprendido entre la traza del nivel medio de mareas bajas y el punto de alcance máximo del oleaje. El material se mueve en suspensión y por el fondo, el porcentaje de una y otra forma depende del tipo de rotura de la ola, así por ejemplo, para rotura gradual el gasto sólido será principalmente de fondo, en tanto que para rotura de clavado se tendrá el caso inverso. La trayectoria de movimiento es en ZIGZAG o "diente de sierra", dando ésto origen a una rompiente neta a lo largo de la playa que constituye el arrastre o acarreo playero.

Fundamentalmente el transporte litoral se realizará según las condiciones prevaletientes del oleaje, las que a su vez originarán una forma específica del perfil playero, por lo que en-

focaremos nuestra atención sobre el estudio de los perfiles de playa, para posteriormente, de acuerdo con el tipo de éstos, evaluar el transporte litoral existente y los posibles fenómenos que éste pueda ocasionar.

3.3.2. Perfiles de Playa.

En términos generales se considera que existen básicamente dos formas definidas de los perfiles de playa que se han designado genéricamente como perfil de verano y perfil de invierno, con el objetivo de hacer notar la diferencia de las características del oleaje que los modelan; así en verano por ejemplo, se supone que las condiciones de agitación del mar son menos severas que en la época de invierno, produciéndose un perfil en el que se nota una acumulación considerable de material en la parte alta del estrán, dando lugar a una berma bien definida.

Para las condiciones de invierno se tienen una mayor agitación, esto da lugar a una serie de rompientes que forman barra y fosas, típicas de los perfiles de invierno (Fig. 3.4.2.) Sin embargo considerando que el factor determinante para un tipo de perfil es la relación de esbeltez del oleaje H/L , se puede establecer que un perfil con formación de barras (invierno) será característico de una relación $H/L > 0.025$ y el perfil de verano corresponderá a la relación $H/L < 0.025$.

En términos generales se puede establecer que la pendiente

en el estrán aumentará o disminuirá si la relación de esbeltez aumenta o disminuye, análogamente variará en forma inversa si se toma en consideración las características del diámetro del material playero como indicativo.

La variación de estas relaciones es estacional, y más aún, - pueden en algunos casos variar considerablemente en un mismo día. Por ello, diversos investigadores han tratado de obtener un perfil llamado de equilibrio que representa la acción conjunta de parámetros que intervienen en la formación del perfil de playa, esto es, características de material de fondo, amplitudes del oleaje, período, variaciones de nivel, etc.

Generalmente consideraron que los perfiles de playa tienen la forma de una parábola fraccionaria a partir de un origen materializado por la intersección de la línea de playa con el nivel medio del mar y que además sobre este perfil se desplazan, de acuerdo con las características del oleaje, la barra y la fosa cuando se forman.

3.4.4. Perfiles Frente a la Laguna.

Los diferentes trabajos de campo realizados frente a la Laguna Madre permiten tener una idea de las variaciones registradas en las diferentes épocas en que fueron realizados, observándose una cierta regularidad, según se muestra en el plano LN-34.

Los perfiles fueron analizados según el criterio de Sitarz, -

ya que se considera el más aplicable de acuerdo con las bases y fundamentos como fue establecido y el de más fácil verificación.

De acuerdo con la forma del perfil podemos considerar que las playas se encuentran en un estado de equilibrio o cercano al mismo ya que observando la tabla 3.4.1 se nota que existe una cierta constancia en los valores de a y Xo y por consiguiente en los de aXo, denominado constante de playa. Con las relaciones siguientes:

$$a = \frac{1}{\rho^{1/2} D_2 H^{3/2}} \dots\dots\dots 3.4.34$$

$$Xo = \frac{60}{D^{1/2}} H^{3/2} \dots\dots\dots 3.4.30$$

Se determina que $aXo = \frac{45}{D D_2}$

lo que expresa que en un perfil de playa su forma dependerá, del valor de la constante mencionada, que a su vez es función de los diámetros de su material constitutivo.

Del análisis de los diferentes perfiles obtenidos del levantamiento topohidrográfico de las bocas: San Rafael, Santa María, Ciega y Sandoval, efectuado por la Secretaría de Marina, se pueden obtener los valores promedios de los parámetros que definen el perfil de playa según la tabla siguiente.

TABLA 3.4.1

CARACTERISTICAS DE LOS PERFILES DE PLAYA

Sección	Xo	a	aXo	d ₁	d ₂	d ₃
I	150	11	1650	1.80	2.70	0.30
II	150	10	1500	1.80	2.60	0.50
III	145	14	2030	1.40	2.60	0.70
IV	135	15	2025	1.70	2.10	0.70
V	200(170)	5(13)	1000(2210)	1.00	2.70	0.40
VI	125	15	1875	1.85	2.70	0.70
VII	185	12	2200	1.90	2.70	0.70
VIII	160	11	1760	1.80	2.60	0.65
IX	143	11.5	1745	1.90	2.30	0.50
X	166	10	1660	2.00(1.70)	2.90(2.20)	0.75
XI	145	14	2030	1.65	2.85	0.75
XII	160	11	1760	1.90	3.40	0.60
XIII	170	10	1700	1.90	2.60	0.60
XIV	190	5	950	1.90	2.00	0.50
XV	250	7	1400	2.00	2.70	0.70
XVI	155	8	1240	1.90	2.10	0.75
			<u>1684</u>	1.77	2.57	0.62
	$\frac{\Sigma}{n}$					

Dado que en la zona de perfiles analizados se considera que $D_1 = 0.4$ mm (diámetro del material en la zona del estrán) podemos encontrar el diámetro de material de la zona comprendida entre la zona de rompientes y la plataforma continental es decir que si $aXo = 1684$

$$D_1^{1/2} D_2 = \frac{45}{aX_0} \quad D_2 = \frac{45}{1684 (0.4)^{1/2}} = 0.042 \text{ mm.}$$

Tomando estos valores como los representativos del material de la playa encontramos que:

Según Sitarz (88):

$$X_0 = \frac{60}{D_1^{1/2}} H^{3/2} \quad \text{y para } X_0 = 150 \text{ m.}$$

$$H^{3/2} = \frac{X_0 D_1^{1/2}}{60} = \frac{150 \times 0.4^{1/2}}{60} = 1.58$$

$$\therefore H = 1.35 \text{ m.}$$

3.4.5. Evaluación del Transporte Litoral.

El problema de la evaluación del transporte litoral ha sido estudiado por diferentes investigadores, ya sea en forma teórica, experimental o por mediciones directas en el campo, mediante seccionamientos periódicos y cuantificación de volúmenes retenidos por obras, o bien por mediciones de concentración de material sólido en las corrientes litorales.

Los resultados que se han obtenido varían mucho unos con respecto a otros, no pudiéndose decir a la fecha cual de los criterios sea el de más conveniente utilización, ya que las condiciones en que se han realizado los estudios son muy variadas. Sin embargo todos los investigadores han concordado en la conclusión de que el transporte litoral es una función de la energía del oleaje, por lo que en una primera instancia podríamos considerar que:

(88) Op. cit.

$$Q_s = f (E) = f \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 L \right) \dots\dots 3.4.36$$

variando el valor de la función, para evaluar el transporte, considerando las características del oleaje incidente sobre una playa.

Los primeros intentos para relacionar el transporte con las características del oleaje o las condiciones meteorológicas son debidos a Munch-Petersen (89) que propuso para la zona del Báltico:

$$Q = K U^2 \rho_v D \text{ sen } \alpha \dots\dots 3.4.37$$

modificada posteriormente por Knaps (90):

$$Q = K V^3 \rho_v \sqrt{D} \text{ sen } \alpha \text{ cos } \alpha \dots\dots 3.4.38$$

donde:

Q = capacidad de transporte del oleaje generado por el viento actuante.

V = velocidad del viento.

ρ_v = es la frecuencia del mismo en %.

D = la duración de la acción del viento.

α = el ángulo que forma la dirección del viento con la línea de playa.

Posteriormente se trató de expresar la relación del transporte de acuerdo con las condiciones directas del oleaje, en cuanto su amplitud, período, porcentaje de acción y ángulo de incidencia.

Según mediciones efectuadas por Caldwell (91), en una playa

(89) MUNCH-PETERSEN.- Material Wonderung Longs Meershusten - ohne Ebbe und Flut.- IV Hydrologische Konferenz der Baltischen Straten. 1933.

(90) KNAPS R.J.- Profung der Formal von Prof. Munch-Petersen uber Material Wonderung on der Lettischen Kuste. VI Hydrologische Konferenz der Baltischen Straten. 1938.

(91) CALDWELL J.M.- Wave Action and Sand Movement near Anaheim

20

de 5 kilómetros en Anaheim Bay, Calif., U.S.A., resultó que la función buscada sería una proporción lineal de la energía incidente del oleaje, es decir que:

$$Q_s = K E_i = 135 E_i \dots\dots\dots 3.4.39$$

donde E es la energía incidente en ft-lbs/ft de playa/día y Q_s es el material transportado en yardas cúbicas/día.

Las condiciones de la playa estudiada por Caldwell se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Playa sujeta a la acción de un oleaje con incidencia comprendida entre los 9 y 21°.
- Material playero con diámetros medios de 0.2 a 0.3 mm., siendo el diámetro del estrán de 0.4 mm. a 0.1 mm. en la parte anterior a la línea de rompientes.

Watts (92) realizó un trabajo semejante en las costas de Florida proponiendo para el caso de esas playas con diámetro medio de 0.3 mm., la siguiente expresión:

$$Q_s = 240 E_i^{0.9} \dots\dots\dots 3.4.40$$

Lee (93) encontró en la zona del Lago Michigan que la relación podía ser expresada por la forma

(92) WATTS G.- A study of Sand Movement at south Lake Worth Inlet, Florida.- Technical Memorandum No. 42, Beach Erosion Board. October 1953.

(93) LEE C.E.- Filling Pattern of the Fort Sheridan Groin System.- Proceedings of Fourth Conference on Coastal Engineering. Council on Wave Research 1953.

$$Q_s = K E_i^{0.97} \dots\dots 3.4.41$$

El Dr. Bajorunas (94) en estudios realizados en el Lago Superior, con diámetro característico del material playero comprendido entre 0.2 y 0.4 mm., propone que:

$$Q = 19 E_0 \text{ sen } \alpha_0 (1 - e^{-0.023D \cot \alpha_0}) \dots\dots 3.4.42$$

donde D es la longitud en millas de la playa considerada como recta entre dos ondulaciones al punto en estudio.

E_0 = energía anual del oleaje en aguas profundas en 10^6 lb-ft - por pie de cresta.

α_0 = ángulo de incidencia del oleaje.

19 y 0.023 = constantes.

Según los anteriores investigadores la forma de la función del-transporte es:

- Caldwell: $Q_s = 135 E_i$
- Watts: $Q_s = 240 E_i^{0.9}$
- Lee: $Q_s = K E_i^{0.07}$
- Bajorunas: $Q = K E_0$

por lo que podemos concluir que una función directa de la energía del oleaje es lo más aconsejable, tomando la constante como una función de las características del material playero para cada caso en estudio. Según lo anterior la expresión más aconsejable parece ser la propuesta por Larras (95):

$$Q = K g H^2 T \text{ sen } \frac{T}{4} \alpha \dots\dots 3.4.43$$

(94) BAJORUNAS L. Dr.- Littoral Transport in the Great Lakes. - Proceedings of the Seventh Conference on Coastal Engineering. Council on Wave Research 1961.

(95) LARRAS J.- Plages et Cotes de Sable.- Collection du Laboratoire National d'Hydraulique. Eyrolles, Paris.

en la que:

Q = gasto sólido por unidad de tiempo

H = altura de ola

T = período

K = función adimensional que depende de la relación de esbeltez y de las características del material playero.

α = ángulo de incidencia del oleaje

ya que se puede aceptar que dicha expresión reporta una función directa de la energía del oleaje, considerando además la función dada por el ángulo con que el oleaje ataca a la playa, pues según diferentes investigadores la función máxima del transporte varía entre los 52 y 63°.

El valor de K se puede expresar según experiencias de laboratorio (96) como:

$$K = 0.118 \times 10^{-5} D^{-1/2} \left(\frac{L_0}{H_0}\right) \dots\dots 3.4.44$$

en la que D representa el diámetro medio del material playero.

3.4.5.1. Tendencias de Acarreo.

Con el fin de tener una idea de la magnitud del transporte paralelo en la zona de la Laguna Madre, se procedió a realizar el presente análisis teórico.

Se considera a la laguna dividida en 5 zonas (Plano LM-35) de acuerdo con el ángulo de incidencia del oleaje y el valor del coeficiente de refracción K^2 , es decir, cada zona tiene características parecidas en cuanto a los valores anteriores.

(96) LAVAL D.- Cours de Travaux Maritimes.- Tome II. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Paris 1961.

Las direcciones de oleaje consideradas fueron: NE, E, SE y S.

Se calcularon únicamente tendencias de acarreo, con el valor siguiente

$$H^2 t \text{ sen } 2 \alpha$$

donde:

H = altura de la ola en la batimétrica -5 (m)

t = tiempo de acción del oleaje por estaciones (seg)

α = ángulo de incidencia del oleaje en la batimétrica -5.

A partir de los datos de oleaje (ver III-1.3.1) se obtuvieron los valores de "t". Como valores de H_0 se tomaron los promedios de cada uno de los rangos que aparecen en las tablas 1.3.1.2 y 1.3.1.3 de III-1.3.1.

En cuanto a la dirección de acarreo, se consideró como positiva la N-S (para las incidencias de oleaje NE y E) y como negativa la S-N (para las incidencias SE y S).

Analizando las tendencias de acarreo de la manera anterior se obtuvieron los resultados que aparecen en la tabla 3.4.2.

3.4.5.2. Cuantificación del Transporte.

De acuerdo con la tendencia anterior es posible cuantificar el transporte complementando la expresión dada para las tendencias, con la propuesta por Larras (95).

$$Q = K g T (H^2 t \text{ sen } 2 \alpha)$$

(95) Op. cit.

aceptado que la función 2 es muy parecida a la $\frac{7}{4}$ y que el valor de la constante K es para el caso de la Laguna Madre de

$$K = 0.18 \times 10^{-5} (0.15)^{-1/2} \left(\frac{56.2}{1.4}\right) \dots\dots 3.4.44$$

$$\therefore K = 1.86 \times 10^{-4}$$

Por lo que podemos resumir que el transporte litoral en la zona es el registrado en la tabla siguiente y en el plano LM-35.

TABLA 3.4.3

RESUMEN DE GASTOS SOLIDOS ANUALES SEGUN LAS DIFERENTES DIRECCIONES

(m³/año)

Zona	I	II	III	IV	V
Dirección					
NE	115,800	74,800	74,800	95,000	109,500
E	129,600	122,000	64,200	44,500	- - - -
SE	80,500	-54,000	-77,600	-67,100	-99,500
S	<u>- 4,230</u>	<u>- 4,790</u>	<u>- 1,870</u>	<u>- 2,250</u>	<u>- 2,930</u>
N-S	245,400	196,800	139,000	139,500	109,500
S-N	<u>-84,730</u>	<u>-58,790</u>	<u>-79,470</u>	<u>-69,350</u>	<u>102,430</u>
Totales (N-S)	160,670	138,010	59,530	70,150	7,070

CANALES A MAREA LIBRE

4.1. GENERALIDADES.

Dentro de los diversos tipos de canales a marea libre (*) de acuerdo con su origen -geológico, hidrológico o de transporte litoral- para el problema que se trata, analizaremos aquellos cuyo origen es el transporte litoral. La laguna Madre es el caso de una albufera conectada al mar a través de un conjunto de bocas cerradas en la actualidad. El movimiento de volúmenes de marea entre la laguna y el mar dió lugar a la formación de deltas lagunarios y marinos. De acuerdo con Armstrong (100), el tipo más simple de deltas es el simétrico con respecto a la disposición interior de áreas activas de la laguna, ya que el canal sufrirá desviaciones por efecto del transporte litoral. Este caso es poco común pues la mayoría de los deltas son asimétricos con canales diagonales y zonas lagunarias desiguales.

El problema fundamental de los canales a marea libre es mantener el equilibrio entre el volumen de agua movido en cada ciclo de marea y el acarreo litoral que llega a su desembocadura. Este equilibrio o estabilidad puede analizarse en dos formas, - la primera considerando la posición de la entrada con respecto a su localización en planta -estabilidad horizontal- y la segunda tomando en cuenta las características de la sección transversal -estabilidad vertical-.

4.2. ESTABILIDAD HORIZONTAL.

(*) Un canal a marea libre es una comunicación entre el mar y una bahía, laguna o estuario, a través de la cual fluyen corrientes de marea y otras corrientes, siendo el área de la conexión muy pequeña comparada con la del cuerpo de agua separado del mar.
(100) ARMSTRONG P.W. - Reduction of Maintenance by Proper Orientation of Ship Channels Through Tidal Inlets. - Proc. of 2nd Conf. on Coastal Engr. Council on Wave Research, Houston 1952.

Los canales podrán ser estables o migratorios. La estabilidad o la migración es función de su "edad". En el caso de albuferas, puede abrirse un canal durante una tormenta, cerrándose de inmediato; pero si las condiciones interiores de la laguna son favorables, es posible que permanezca abierto, iniciando un proceso migratorio, que de no existir interferencias, puede adoptar una situación estable. En este proceso, tiene una gran influencia el acarreo litoral M , el área de entrada a y la longitud L del canal. Consideremos una entrada cuyas características están cerca del ideal (figura 4.1). En este caso la barra tiene una disposición tal, que su centro de curvatura está muy próximo a la sección principal de salida. El oleaje, por efectos de refracción, generará un sistema de transporte tanto normal como paralelo a la costa y orientado hacia la boca. Dicho material es susceptible de ser arrastrado hacia el interior de la laguna, principalmente en el caso de las costas del Golfo de México, donde existe un predominio de las corrientes de flujo sobre las de reflujó. Si llamamos M_t al acarreo litoral total y p al porcentaje del mismo que es llevado por el flujo hacia el canal, $(1 - p) M_t$, será el que pase por barra.

Por otro lado, llamemos M_s a la capacidad de transporte que tiene el canal debido al flujo y reflujó. Se puede examinar la estabilidad horizontal a la luz de las relaciones de longitud de canal, material que entra al canal y capacidad de transporte del mismo. Mientras que estas relaciones se mantengan dentro de un valor tal que $M_s \geq p M$ total y el canal no

sea demasiado largo, la estabilidad está asegurada en un cierto grado.

Hay que considerar también el efecto que pueda tener sobre la boca la presencia de escolleras. En términos generales, según O'Brien (101), las escolleras no sólo estabilizan la posición de una entrada sino que la protegen contra el cierre de ella -- por acción del oleaje, aún más, la dimensión del área puede -- ser muy reducida, siempre y cuando esté debidamente protegida.

También es necesario considerar el efecto que tendrán las escolleras en el régimen costero. Si se constituyen en una barrera completa, las playas adyacentes sufrirán la reorientación típica que se presenta por la presencia de un obstáculo normal a la playa. En términos generales se estima que las escolleras -- pueden reducir en un 33% el material que entra a las bocas. -- Cuando un cierto porcentaje del material pasa de un lado a -- otro de las escolleras, se presentará una situación similar a la anterior dando también lugar a la formación de bajos.

En todos los casos hay que prever que el cordón litoral sea lo suficientemente robusto para no debilitarse por las erosiones y dar lugar a la apertura de nuevas bocas que restarían eficiencia a la original.

4.3. ESTABILIDAD VERTICAL.

La estabilidad de la sección transversal está ligada con la -- estabilidad horizontal en el aspecto relativo a la forma de pa -- so del acarreo litoral de un lado a otro de la entrada, inde -- pendentemente de la estabilidad de la sección transversal -- propiamente dicha. Examinemos con cierta amplitud cada uno de

(101) O'BRIEN M.P.- Equilibrium Flow Areas of Tidal Inlets on Sandy Coast.- Proc. of 10 th Conf. on Coastal Engr. ASCE 1966.

los factores que es necesario considerar para el análisis completo de estabilidad.

Los agruparemos en dos tipos fundamentales:

- a. Los que generan estabilidad
- b. Los que la contrarrestan.

El primero lo representa el intercambio de agua debido a la marea, en tanto que el segundo el acarreo litoral.

4.3.1. Factores de Estabilidad.

Entre ellos, el básico para los análisis es el prisma de marea, Ω que es el volumen en la laguna comprendido entre el nivel de mareas bajas y de mareas altas (marea viva). Sin embargo esta definición pierde generalidad a medida que aumenta el área de la laguna debido a: defasamientos, pérdidas y modificaciones por la configuración del fondo. Es decir en general se tiene que la pleamar y la bajamar tienen, en el interior de la laguna un retardo con respecto a la entrada. Además, el tiempo de flujo es menor a medida que el punto considerado se aleja de la entrada, variando este tiempo de acuerdo con el tipo de marea y también la amplitud de la misma no es necesariamente menor en el interior de la laguna que en la entrada.

4.4. CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA VALUAR EL PRISMA DE MAREA.

Se han señalado ya la importancia que tiene en los análisis de

estabilidad del valor del prisma de marea. Sin embargo hay casos, como el de la Laguna Madre, en que se requiere no sólo - mantener un cierto grado de estabilidad en la boca sino también asegurar un aporte de agua con salinidad normal al interior de una laguna hipersalina, a fin de disminuir gradualmente el contenido de sal hasta un nivel aceptable, máxime si se considera que los aportes de agua dulce son mínimos y que prácticamente - no es posible contar con ellos para ese fin. Además, como los volúmenes de agua, diferentes a los de origen marino, que lle-- gan a la laguna, no son capaces de compensar las pérdidas por - evaporación, un porcentaje del prisma deberá utilizarse también para esta compensación. Resumiendo, hay que incluir dentro del cálculo del prisma de marea necesario dos volúmenes adicionales:

- i. Volumen para control de salinidad.
- ii . Volumen para compensar pérdidas.

4.4.1. Control de Salinidad.

El control de salinidad tiene primordial importancia desde el - punto de vista ecológico. Simmons (107) señala, que una salini- dad de 45 ppm es el valor máximo aceptable para el adecuado de- sarrollo de las especies, valor confirmado por las observacio-- nes de Hildebrand (2) en la Laguna Madre de Tamaulipas donde pa- ra concentraciones salinas entre 41 ppm y 47 ppm la pesca era - aún muy intensa y productiva. Por su parte Hedgpeth (108) encon- tró que a partir de 72 ppm los peces empiezan a morir, por tan- to es conveniente considerar como concentración máxima acepta-- ble, en las áreas pesqueras, 45 ppm y excepcionalmente 50 ppm.

(2) Op. cit.

(107) SIMMONS E.G.- An Ecological Survey of the Upper Laguna Ma- dre of Texas.- Inst. of Marine Science, Publ. Vol. IV No.2, July 1937

(108) HEDGPETH J.W.- The Laguna Madre of Texas.- Trans. 12 th N. Amer. Wildlife Conf. pp. 364-380. 1947.

Sverdrup, Johnson y Fleming (109) proponen la siguiente expresión para el cálculo del volumen requerido a fin de mantener la salinidad en un cierto límite:

$$V_e = E_n \frac{S_r}{S_r - S_f} \dots\dots 4.30$$

V_e = volumen requerido en un cierto tiempo

E_n = evaporación neta

S_f = salinidad promedio del agua al entrar (flujo)

S_r = salinidad promedio a la salida (reflujo)

Esta fórmula tiene el inconveniente de no tomar en cuenta los efectos de mezclado por la influencia de las corrientes de marea. De observaciones efectuadas en la Laguna Madre de Texas, Carother (12) sugiere la inclusión de un factor representativo de la eficiencia de mezclado; este factor tiene un valor inicial de 0.2 para una concentración de 40 ppm aumentando a razón de 0.005 por cada parte por mil sobre 40. La fórmula entonces puede expresarse como:

$$V_e = \frac{1}{\eta} \left(E_n \frac{S_r}{S_r - S_f} \right) \dots\dots\dots 4.31$$

A partir de esta expresión es posible establecer curvas de igual salinidad de acuerdo con las áreas afectadas por el prisma requerido para fines de estabilidad y serán en última instancia consideraciones económicas relativas a las dimensiones de la entrada, las que permitan decidir si se usa el prisma de marea requerido por estabilidad o el adecuado para fines pesqueros, siempre y cuando este último arroje relaciones de estabilidad

(12) Op. cit.

(109) SVERDRUP, JOHNSON Y FLEMING.- The Oceans.- Prentice Hall, June 1960.

acceptables.

4.4.2. Volumen para Pérdidas.

Se ha establecido ya en incisos anteriores que el prisma de marea debe considerarse no en función del área total de laguna --- afectada por las variaciones de nivel dentro de ella, sino de acuerdo con el volumen real que se mueve por el canal de acceso en cada ciclo. Como los análisis de estabilidad están en función de él, es necesario considerar que hay casos, como el que nos ocupa, en que por efecto de pérdidas por evaporación el volumen que entra no es necesariamente el que sale. Dicho en otra forma, no toda el área afectada por mareas es tributaria de la boca, en cambio las pérdidas de agua si se tienen sobre toda su extensión, por tanto el prisma de marea usado para fines de estabilidad, tomando en cuenta las pérdidas deberá calcularse como:

$$\Omega R = \Omega F - E_n \times A \cdot T \quad \dots\dots\dots 4.32$$

ΩF = prisma de flujo

E_n = evaporación neta en $m^3/km^2/t$ (t en seg.)

A = área total afectada por marea (km^2)

T = ciclo de la marea (seg).

ΩR = prisma real para análisis de estabilidad.

ESTUDIOS DE PROYECTO

El objetivo de esta parte es plasmar la solución al problema de la Laguna Madre en un proyecto de gabinete, de acuerdo con datos de campo obtenidos e información diversa recopilada. Se ha dividido esta parte en dos capítulos cuyas finalidades son:

Capítulo I. Anteproyectos. De acuerdo con el programa establecido, era necesario analizar las tres posibilidades de soluciones, es decir, canales a marea libre, canales de flujo unidireccional y tuberías. Cada una de estas posibilidades se llevó hasta la etapa de diseño preliminar con una estimación aproximada de su costo, dejando la última sección de este capítulo para hacer un juicio crítico sobre cada uno de los anteproyectos y seleccionar de entre ellos el que debería llevarse hasta nivel de proyecto preliminar.

Capítulo II. Proyecto Preliminar. Constituye la etapa final de los estudios de ingeniería de proyecto, ya que aquí se presenta la proposición de solución cuya diferencia con la que pudiera llegar a construirse será pequeña. En el capítulo se afina el anteproyecto aceptado en el Capítulo I con los datos de campo, principalmente los relacionados con el aspecto topohidrográfico, valuando enseguida las cantidades de obra correspondientes y analizando precios unitarios para hacer finalmente un estimado de costo del proyecto.

ANTEPROYECTOS

1.1. INTRODUCCION.

En el programa original para estudios de gabinete se había previsto, como solución única a estudiar, la de canales a marea libre localizados en uno o varios de los sitios donde se encuentran las "bocas" principales de la laguna. Posteriormente, y como se mencionó en II-2.1, el programa sufrió una serie de modificaciones que llevaron a la necesidad de estudiar dos posibilidades más de solución:

- Canales a flujo unidireccional
- Tuberías.

En cuanto a la localización de los sitios de probable obra, también se cambiaron por las razones citadas en II-2.1. Concluyendo, los estudios de anteproyecto constan del análisis de tres posibles soluciones a saber:

- a. Canales de marea libre
- b. Canales de flujo unidireccional
- c. Tuberías de flujo unidireccional.

localizadas en los sitios denominados:

Zona Norte: Paso de San Juan

Zona Sur-Centro: Barra del Catán.

En todos los casos se consideró que para el extremo meridional -

de la laguna, la desembocadura del río Soto la Marina, debidamente mejorada, aportaría un cierto volumen no sólo a la Laguna Madre, sino también a las del Almagre y Morales. El estudio de la desembocadura del Soto la Marina, será tratado en el anteproyecto correspondiente a canales a marea libre.

Por otra parte es conveniente indicar que para la selección final, fue necesario tomar en cuenta no sólo el muy importante aspecto económico, sino también el referente a los efectos que se tendrían en la laguna al practicarse cualquiera de las soluciones propuestas (ver II-2.1).

En los planos correspondientes (LM-36, 37, 38) a anteproyectos, la topografía es seguramente diferente a la que aparece en los del proyecto preliminar (LM-39-41); esto se debe a que al realizar los estudios de anteproyecto no se contaba con la topografía de los lugares elegidos, sin embargo por haberse utilizado la misma para las tres soluciones, las bases de comparación en cuanto a volúmenes y características de las obras fueron las mismas.

1.5. EVALUACION DE ANTEPROYECTO Y CONCLUSIONES.

La decisión referente a la solución por adoptar, se tomó en forma conjunta en una reunión celebrada en el mes de agosto de 1967 con ese fin. Ya se ha hecho mención a esa reunión así como a las conclusiones obtenidas en ella (ver II-2), por lo que citaremos únicamente los puntos concretos que sirvieron para -

establecer la comparación entre los 3 anteproyectos presentados, repitiendo al final algunos aspectos de las conclusiones que es conveniente puntualizar.

1.5.1 Comparación de Soluciones Probables al Problema de la Laguna Madre, Tamps. (115).

"...1. Datos Generales.

A partir de los valores medios obtenidos del análisis de funcionamiento del vaso se obtuvo que:

- Pérdida media mensual por evaporación $Km^2 = 0.003 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes/año}$

Las pérdidas totales serán entonces función del área de agua expuesta a la evaporación.

	Area Km^2	Pérdida mensual m^3	Q_{med} $M^3/\text{seg.}$
Para Laguna llena (nivel 0.00)	2190	225.6×10^6	0.109×10^3
Para laguna nivel -0.30 m.	1250	217.5×10^6	0.049×10^3
Para Laguna nivel -0.50 m.	1000	103×10^6	0.040×10^3
Nivel de referencia medio del mar.			

En términos generales puede observarse que existirá una demanda media de:

$$q = 0.04 \text{ m}^3/\text{seg}/Km^2$$

(115) INGENIERIA DE PROYECTO.- Comparación de Soluciones Probables al Problema de la Laguna Madre, Tamps.- Informe al Director Técnico del Estudio. Agosto 1967.

que será necesario introducir del mar.

Conviene señalar también la gran diferencia en área de agua para una variación de sólo 30 cm.

2. Criterio General de Selección de Sitios para Obras de Alimentación.

Se adoptaron las siguientes ideas para localizar sitios probables donde restablecer la comunicación del mar a la laguna.

- a. Estar en una zona de dunas perfectamente estabilizadas y lo suficientemente robustecidas, para soportar condiciones severas de viento y oleaje.
- b. El ancho del cordón, no obstante lo robusto que fuera, no debería ser excesivo para evitar excavaciones y dragados considerables, a la vez que longitudes de conducción tales que las pérdidas por fricción obligaran a dimensiones de obras mayores.
- c. Las obras exteriores de protección deberían de quedar perfectamente ancladas a fin de evitar fallas en los arranques.

Con base en estas ideas se eliminó la posibilidad de utilización de las bocas tradicionales de la laguna por presentar los inconvenientes siguientes:

- a. Dunas móviles y pequeñas a ambos lados de la boca; la totalidad de ellas son muy planas y a un nivel muy cercano al medio del mar, lo que facilita la invasión de él durante tormenta, con grandes problemas si se pretendiese controlar esta invasión.

- b. Extensas plataformas de depósito frente a las bocas que obligan a dragados considerables.
- c. Problemas de estabilización y desarrollo de dunas; consecuentemente un aumento de costo en obras especiales para asegurar el anclaje adecuado de las obras de protección, en tanto las dunas llegaran a cumplir esta misión.
- d. No existe protección alguna en contra de la acción del viento si la obra a realizar fuese canal a cielo abierto.

3. Sitios Elegidos.

Para la zona Norte de la laguna se localizó el lugar denominado como Paso de San Juan que reúne las siguientes ventajas:

- Dunas hasta de 5 y 6 metros perfectamente estabilizadas y protegiendo, dada su orientación, cualquier obra a través del cordón.
- Ancho de la zona de dunas altas de apenas 100 a 200 m. y total del cordón litoral hasta la ribera de la laguna de unos 1,500 m.
- Las mayores profundidades de toda la laguna están a solo 3 Km aproximadamente de la línea de costa.
- Valles, entre las dunas, con ancho suficiente para alojar cualquier tipo de comunicación entre laguna y mar.

La zona Centro-Sur de laguna no presenta características del cordón tan apropiadas como las anteriores, sin embargo se localizó el sitio denominado Boca del Catán (Barra de los Almirantes) cuyas condiciones son:

- Dunas estabilizadas, aunque bajas.
- Corte en el cordón con condiciones de protección y desarrollo adecuado, utilizable para la conexión laguna-mar.
- La Bahía del Catán, sitio señalado como ventajoso en cuanto a capacidad de almacenamiento y punto focal de gran producción pesquera está frente a este sitio.
- Presencia de bancos de piedra susceptibles de utilizarse como material de núcleo.

En la zona sur, la boca del Soto la Marina se consideró como obligada, dadas las condiciones de la misma, ya que mediante pequeñas obras de defensa es posible mantenerla abierta todo el año y con canalizaciones adecuadas alimentar la parte Sur de la Laguna Madre así como la de Morales y del Almagre.

5. Anteproyecto.

Se analizarán sucesivamente:

- a. Solución a base de tuberías.
- b. Solución por canales de flujo unidireccional.
- c. Solución por canales a marea libre.

- a. Solución a base de Tuberías.

Descripción y bases de proyecto.

Esta alternativa de solución consiste en la interconexión entre la laguna y el mar por medio de tubos. La tubería será colocada en las zonas en que el cordón litoral se hace angosto, para que la longitud de ella no sea excesiva y las pérdidas por fricción sean las mínimas..."

Más adelante se menciona que:

"... Volúmenes aportados y niveles de llenado.

De acuerdo con los cálculos anteriores, un tubo con las características asentadas en el párrafo anterior, permite la introducción a la laguna de:

$$31 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$$

De acuerdo con los análisis hidrológicos realizados para la laguna, las pérdidas que esta sufre para el nivel de llenado -- (-0.5 m.), son de:

$$103 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes} \dots"$$

Señalándose las obras porrealizar:

"...Boca del Catán: 2 tubos con $D = 3.66 \text{ m.}$

Gasto de entrada: $62 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Gasto disponible: $(62-33.2) \times 10^6 = 28.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Volumen a llenar: $110 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tiempo aproximado de llenado: 3.82 meses.

Boca de San Juan: 3 tubos con $D = 3.66 \text{ m.}$

Gasto de entrada: $93 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes.}$

Gasto disponible: $(93-68) \times 10^6 = 25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Volumen a llenar: $155 \times 10^6 \text{ m}^3$

Tiempo aproximado de llenado: 6.2 meses.

Obras Complementarias.

Como ya se mencionó anteriormente, las tuberías llegan al tanque distribuidor cuyas dimensiones son: $100 \times 100 \times 6.6 \text{ m.}$ De este tanque salen 3 canales, con una cota en la plantilla de -

1.05 m. y anchos de 60 a 90 m.; los tirantes varían de 0.70 m a 0.55 m.

Los canales trabajan con una pendiente hidráulica, de 1×10^{-4} lo cual permitirá un nivel dellegada a la laguna de -0.50 m.

Cantidades de obra.

Las cantidades de obra para esta solución comprenden:

Tubería con D = 3.66 m.	5,000 m.l.	
Volúmenes de dragado:	Por Boca	Total
Capa tubos:	125,000 m ³	250,000 m ³
Complemento: mar	23,600 "	47,200 "
tierra	63,000 "	126,000 "
Tanque regulador:	66,000 "	132,000 "
Canales:	306,000 "	612,000 "
	<u>583,600 m³</u>	<u>1,167,200 m³</u>

Costo.

La estimación de costo se hizo con base en las experiencias para tuberías de drenaje en los Estados Unidos. Considerando lo anterior el resultado fue que éste sería no menor de \$ 100,000,000.00.

Juicio Crítico.

Esta solución presenta las siguientes ventajas:

- Interconexión sin peligro de alterar régimen litoral y sin peligro de cierre en la boca-toma.
- Funcionamiento hidráulico automático, ya que conforme la la-

guna se llene, las pérdidas aumentan y siempre se mantendrá una carga disponible de cuando menos 0.5 m.

- c. No se requiere de obras exteriores para protección de la obra.

Las desventajas que presenta esta solución:

- a. Procedimiento de construcción complicado.
- b. Equipo de construcción costoso.
- c. Flujo en una sola dirección, lo cual no permite un intercambio de agua de la laguna hacia el mar, provocando un incremento en la concentración de sal.
- d. No hay posibilidad de favorecer el establecimiento de puertos pesqueros dentro de la laguna o en el litoral.
- e. La pesca dentro de la laguna no se desarrolla en forma franca.
- f. Por la cota de la superficie del agua, queda descubierto un 50% del fondo de la laguna subsistiendo aún el problema actual de exposición de él a la acción de los vientos.

b. Canal a Flujo Unidireccional.

Descripción y Bases de Proyecto.

La solución que se propone es un canal alimentador con flujo solamente del mar hacia la laguna, pudiendo en caso extremo, ser nulo este flujo. Para mantener esta condición de funcionamiento, se necesita que el nivel de la laguna sea inferior al medio del mar. El canal estará protegido en su desembocadura por escolleras, además, por sus características geométricas, permitirá la entrada de pequeñas embarcaciones. La solución --

se complementa con una dársena a donde llega el canal que funcionará también como tanque regulador, a partir del cual saldrán una serie de canales de distribución con tirante pequeño, que serán la última etapa de la conducción..."

Posteriormente se asentaron las características de las obras en la forma siguiente:

"Características de las Obras.

Paso San Juan.

- Operación:

Gasto de trabajo: $37.0 \text{ m}^3/\text{seg} = 98.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Niveles que se tendrán:

Mar: -0.00 m.

Dársena: -0.05 m.

Laguna: -0.35 m.

Cotas de plantilla:

Canal de acceso: -3.00 m.

Dársena: -3.00 m.

Inicio canal distribución: -1.00 m.

Final canal: -1.00 m.

Pendientes:

Canal acceso: 0.5×10^{-4}

Canal distribución: 1.0×10^{-4}

Pérdidas:

Nivel -0.35: $85 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Nivel -0.80: $53 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Nivel -0.50: $68 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Volúmenes de almacenamiento:

Nivel	-0.35:	3.11×10^8	m^3
Nivel	-0.80:	2.27×10^8	m^3
Nivel	-0.50:	2.7×10^8	m^3

Tiempo de llenado: 46 días.

- Obras:

Canalización:

Canal de acceso:

Ancho de plantilla:	20.0 m.
Tirante:	3.0 m.
Talud de bordos:	3:1
Longitud:	650 m.

Canales de distribución

Ancho de plantilla:	Inicial	40.0 m.
	Final:	90.0 m.
Tirante:	Inicial=	0.80 m.
	Final:	0.50 m.
Talud de bordos:		3:1
Longitudes		2,200 m.
		2,100 m.
		2,800 m.

- Dársena.

Dársena de 100 x 100 m. para embarcaciones pesqueras.

Boca del Catán.

- Operación:

Gasto de trabajo = $25 \text{ m}^3/\text{seg.} = 64.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Niveles que se tendrán:

Mar: 0.00 m.

Dársena: -0.17 m.

Laguna: -0.35 m.

Cotas de plantilla:

Canal de acceso: -2.00 m.

Final de canal: -1.00 m.

Pendientes:

Todo el canal: 1.7×10^{-4}

Pérdidas que se tienen:

Nivel -0.35: $41.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Nivel -0.80: $20.6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Nivel -0.50: $33.15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$

Volúmenes de almacenamiento:

Nivel -0.35: $1.45 \times 10^8 \text{ m}^3$

Nivel -0.80: $0.50 \times 10^8 \text{ m}^3$

Nivel -0.50: $1.105 \times 10^8 \text{ m}^3$

Tiempo de llenado: 84 días.

- Obras Exteriores: Paso de San Juan y Boca del Catán.

Profundidad del morro: -3.00 m.

Cota de coronamiento: 2.75 m.

Longitud total: 260 m.

Cantidades de Obra y Costo Estimado.

Paso San Juan:

- Dragado: 447,666 m ³	\$ 10.00/m ³	\$ 4,476,666.00
- Obras exteriores: 14,002.56 m ³	\$1,000.00/m ³	\$ <u>14,002,560.00</u>
	Total:	\$ 18,479,220.00
Boca del Catán:		
- Dragado: 312,754 m ³	\$ 10.00/m ³	\$ 3,127,540.00
- Obras exteriores: 24,002.56 m ³	\$1,000.00/m ³	<u>14,002,560.00</u>
	Total:	\$ 17,130,560.00
	Costo total:	\$ 35,609,320.00

Juicio Crítico.

Ventajas:

- Posibilidad de utilización como refugios para pequeñas embarcaciones y desarrollo a futuro de instalaciones mayores.
- Permite el paso de peces al interior y su desarrollo.
- Dragados de mantenimiento reducidos.

Desventajas:

- Por el nivel de proyecto, un 40% del fondo de la laguna queda expuesto.
- Obras exteriores costosas restringiendo posible ampliación del canal.
- Area para desarrollo pesquero muy reducida.."

Se analizó enseguida la solución de:

"...c. Canal a Marea Libre.

Se plantea el llenado y mantenimiento de la laguna a un nivel -

similar al del mar a través de canales de marea libre debidamente encauzado su flujo con escolleras.

Para el desarrollo del proyecto se consideró que:

- a. La laguna quedaría dividida en dos partes, la Norte y la Centro-Sur, en tanto que el extremo Sur de ella podría alimentarse a través de obras de canalización en el Soto la Marina.
- b. La boca tendrá una estabilidad general media definida por la relación

$$/Mn \quad 150 - 200$$

- c. La existencia de escolleras cortas permitirá reducir el valor del acarreo litoral neto en un 30%.
- d. Las condiciones de estabilidad serían tales que la capacidad de auto-dragado de la sección fuese suficiente para reducir al mínimo los gastos de consideración. La forma de paso del material será por barra.

Características de los accesos.

a. Paso de San Juan.

Area de la sección:	375 m ²
Ancho de plantilla:	110 m.
Tirante:	3.15 m.
Velocidad media:	0.95 m/seg
Longitud del canal:	650m.
Longitud total de Canalización:	5,654 m.

Obras de Protección:

a. Longitud de cada escollera a partir del cordón litoral: 160 m.
Nivel de coronamiento: 2.25 m
Profundidad máxima de desplante: -2.70 m.

b. Boca del Catán.
Area de la sección: 260 m²
Ancho de la plantilla: 110 m.
Velocidad media: 0.99 m/seg.
Tirante: 2.30 m.
Longitud del canal: 1,570 m.

Obras de Protección:

* Longitud de cada escollera a partir del cordón litoral: 100 m.
Profundidad máxima de desplante: -2.00 m.
Nivel de coronamiento: 2.25 m.

Efecto sobre la Laguna.

Pase San Juan:

Q medio 357 m³/seg.
Volumen de flujo 15.635 x 10⁶ m³/ciclo
Volumen de reflujos 13 x 10⁶ m³/ciclo
Nivel de la laguna similar al del mar
Salinidad media 50 ppm
Area beneficiada 725 Km²

(*) La longitud de las escolleras está proyectada tratando de afectar lo menos posible el acarreo litoral existente en cuanto a su forma de movimiento por corrientes longitudinales.

Boca del Catán:

Q medio	258 m ³ /seg.
Volumen de flujo	11.3 x 10 ⁶ m ³ /ciclo
Volumen de reflujo	9 x 10 ⁶ m ³ /ciclo
Nivel de la laguna	similar al del mar
Salinidad mínima	38 ppm en 61 Km ²
Salinidad media	57 ppm en 319 Km ²
Area beneficiada	675 Km ²

Volumen de Obra y Costo Estimado.

Paso San Juan:

- Dragado	1,600,932 m ³	\$ 10.00/m ³	\$16,009,320.00
- Obras exteriores:	4,295.85 m ³	\$1,000/m ³	<u>4,295,850.00</u>
			\$20,305,170.00

Boca del Catán:

- Dragado:	400,000 m ³	\$10.00/m ³	\$ 4,000,000.00
- Piedra:	10,000 Ton	\$100.00/T	1,000,000.00
- Concreto:	4,200 Pzas.	\$300.00/Pza.	<u>1,420,000.00</u>
			\$ 6,420,000.00

Costo total: \$26,725,170.00

Juicio Crítico.

Ventajas:

- Permite cubrir la totalidad del fondo de la laguna.
- Los accesos son susceptibles de utilizarse con fines de navegación pesquera.
- Permite el desarrollo pesquero en áreas considerables; (cerca del 50% de la laguna puede utilizarse).

- d. Posibilidades de mayor desarrollo en cuanto a navegación - por la geometría de los accesos.

Desventajas:

- a. Probables dragados de mantenimiento constante.
b. Volúmenes de dragado inicial altos ..."

Finalmente se llegó a las siguientes:

"...CONCLUSIONES. (21)

- 1o. La solución de canal a marea libre será la que se lleve a nivel de proyecto preliminar, señalando que la longitud de las escolleras propuestas debe tomarse como una primera etapa que pudiera llegar a ser la única si las condiciones de funcionamiento resultan conforme a lo previsto en el estudio teórico, pero conveniéndose que existe la posibilidad de aumentarlas en su longitud cierto tiempo después de terminada la obra, si los resultados no fueran los supuestos.
- 2o. Es necesario continuar con mediciones sistemáticas con el objeto de disponer de los mayores elementos cuando la obra se realice, así como para los fines inmediatos que representa la construcción de un modelo hidráulico reducido..."

Conviene señalar que la comparación de anteproyectos se hizo con base en los mismos datos generales, pero en lo que se refiere a los canales a marea libre, anteproyecto elegido, sus características tendrán variaciones al disponerse de los datos topohidrográficos recientes.

(21) Op. cit.

PROYECTO PRELIMINAR

2.1. PRESENTACION GENERAL DEL PROYECTO.

La solución que se propone para la alimentación de agua a la Laguna Madre es:

Canales a marea libre en los sitios denominados Paso de San Juan y Boca del Catán. Estos canales estarán protegidos en su desembocadura al mar por escolleras cortas, que tendrán el doble objetivo de encauzar las corrientes de flujo y refluo y mantener la forma actual de paso del acarreo litoral por la línea de rompientes. Con respecto a este último objetivo es conveniente señalar que la longitud propuesta deberá tomarse como una primera etapa con opción a ser única. Será sólo primera si, de acuerdo con los resultados observados en modelo reducido y posteriormente en la naturaleza, se ve la necesidad de prolongar más las escolleras. En caso contrario, la longitud dada será definitiva, salvo claro está, que posteriormente se le quisiera dar un aprovechamiento diferente a los canales y que por esta circunstancia hubiese necesidad de aumentar su profundidad.

Con relación a los canales de comunicación al interior de la laguna, lo ideal sería llevarlos hasta una profundidad igual a la que tienen en su desembocadura al mar, sin embargo, por

las características del fondo de la laguna, esto sólo será posible en la zona norte, por lo que en la boca del Catán, el canal tendrá en la primera etapa una transición desde la cota -1.00 en la laguna a la -2.30 m.

Es conveniente hacer notar que la boca del Catán se localiza frente a la bahía del mismo nombre, no existiendo entre ella y la boca citada, obstáculos que pudiesen impedir un adecuado intercambio de volúmenes. Además el área de laguna más extensa y de mejores profundidades que existe en la zona sur-centro. En consecuencia, es de esperarse un mejor funcionamiento hidráulico que el supuesto en forma conservadora, sobre todo si atendemos a las recomendaciones de Crus Abecasis (104) (ver inciso IV-4-.3.)

Análogamente, la boca de San Juan se localiza enfrente de las zonas de mayor profundidad en toda la laguna siendo entonces ese cuerpo de agua y las condiciones de fondo en esa área, un buen augurio en relación al movimiento de volúmenes.

La solución propuesta permite también resolver a la vez que el problema del llenado de la laguna, con las consiguientes ventajas de disminución de la salinidad de las aguas, incremento de las especies vivas susceptibles de ser aprovechadas, ayudando al desarrollo adecuado del camarón y probablemente una explotación interior a base de cultivo del mismo. Por -

(104) Op. cit.

otra parte las entradas pueden ser utilizadas como lugares de refugio para las embarcaciones pesqueras de la zona, creando las consiguientes condiciones propicias para el desarrollo de la industria de la pesca en el lugar, máxime si se considera que la Laguna del Catán fue un criadero natural de especies de lo más rico y que la zona de laguna frente a San Juan presenta profundidades adecuadas para el establecimiento de un puerto refugio de pescadores.

Cabe señalar también que todas aquellas zonas en que por su lejanía a las bocas no participaran en el intercambio de agua de laguna con la del mar, podrían utilizarse ampliamente para la explotación salinera. Es decir la actual e incipiente industria de sal podría desarrollarse plenamente.

2.2. CARACTERISTICAS Y DIMENSIONES GENERALES DEL PROYECTO PRELIMINAR.

2.2.1. Paso de San Juan.

a. Canal.

El canal tiene una longitud de 5,180 metros desde la -2.70 - del mar hasta la -2.70 de la laguna. Su plantilla es de 110 metros y sus lados tienen talud 5:1

En la zona de dunas y a fin de evitar en la primera etapa de la vida de la obra invasiones de arena por derrumbes principalmente, el canal se protegerá con una berma de 10 m. tratando al mismo tiempo de fijar tanto los taludes de las dunas co

24

mo la berma propiamente dicha con vegetación apropiada.

b. Escolleras.

La escollera norte tiene una longitud de 335 m. y la sur, 330 metros de longitud. En ambas la cota de la base en el extremo del morro es aproximadamente -2.70 m., en tanto que su coronamiento oscila entre +2.50 y +2.25 sobre el nivel medio del mar dependiendo de la alternativa elegida.

A este respecto, se estudiaron dos soluciones:

- i. Escollera de talud con coraza y demás elementos hechos de concreto.
- ii. Escollera de tablaestaca de concreto con guías consistentes en viguetas I o WF.

Las características de las secciones tipo y demás detalles geométricos de la obra aparecen en los planos LM-30, 40 y 42. En cuanto a detalles de diseño, la primera solución quedó planteada en Iv-1.2. La segunda se presenta al final de este capítulo.

2.2.2. Boca del Catán.

a. Canal.

El canal tiene una longitud de 2,920 m., va desde la cota -2.30 m. en el mar a la -1.00 m. en la laguna, queda dividido en dos tramos, uno primero con 2.30 m. de tirante, 100 m. de plantilla, taludes 5:1 y 1,200 m. de longitud; el segundo tiene un ancho y tirantes variables conservando la misma sec-

ción hidráulica; la pendiente es uniforme desde la cota -2.30 hasta la cota -1.00 m. en su extremo final en la laguna.

b. Escolleras.

La escollera norte tiene 250 m. de longitud y la sur 255 m. de longitud. La profundidad de desplante del morro es aproximadamente a -2.30 bajo el nivel medio del mar y su coronamiento oscila en forma similar al caso del Paso San Juan. Las alternativas de solución analizadas solo difieren de las de San Juan en el sentido de haber considerado también la posibilidad de construir las escolleras a talud con elementos pétreos naturales. Los detalles de secciones de canal, escolleras y demás datos de tipo geométrico aparecen en los planos LM-41 y 42. Se recuerda que el diseño de las escolleras a talud aparece en IV-1.2.

COSTOS PRELIMINARES

CAPITULO 3

3.1 DISPONIBILIDAD DE MATERIALES.

Como la solución para las escolleras presenta dos alternativas, se estudió la posibilidad de disponer en el área tanto de elementos pétreos naturales como de un concreto de calidad mínima adecuada a las necesidades planteadas. A este respecto se obtuvieron los siguientes resultados.

3.1.1. Roca Natural.

Por la localización de la pedrera de Loma Prieta - 16 Km. al sur de San Fernando y a 70 km. de Carbajal - se decidió que solamente la obra en la boca del Catán presentaría posibilidades económicas de utilización de elementos pétreos naturales, y todo ello condicionado al hecho de que en la laguna existe agua para realizar el transporte lacustre a base de chalanes de Carbajal a la boca del Catán.

No se tienen aún muestras sobre las características precisas del material, pero las informaciones locales señalan que se trata de basalto sano, en consecuencia utilizable para los fines buscados. En IV-3.2 se hace el análisis del precio unitario para el metro cúbico de roca puesto en obra.

3.1.2. Concreto

El concreto se requerirá sea para construir la coraza y demás elementos de las escolleras de Paso de San Juan y probablemente de las del Catán o para las tablaestacas y recubrimientos de ambas escolleras si se optara por esta solución. Para el-

- estudio de este elemento se tomó la serie de experiencias -
realizadas por la Secretaría de Marina (117) utilizando --
precisamente materiales de la región cuyas características
físicas son las siguientes:

	Arena	Conchas
Densidad	2.76	2.72
Peso volumétrico Kg/m ³	1560	1375
Absorción en %	0.22	0.79
Pérdida por lavado en %	0.42	--

En general la arena es muy fina-módulo de finura 0.95-además
de que su granulometría es defectuosa.

SE observó inicialmente que concretos elaborados con 45% de
arena, 55% de concha, relación agua-cemento 0.68 a razón de
300 Kg/m³ de cemento Portland similar al tipo V, la diferen-
cia en resistencia a la compresión obtenida a los 28 días --
utilizando agua dulce y agua de mar fue muy pequeña 131 - -
Kg/cm² y 124 Kg/cm² respectivamente. Su falla principal con-
sistió en la falta de adherencia de las conchas con el morte
ro debido a su gran tamaño y tersura de su superficie.

(117) DONDE M.G.- Concreto con arena y concha de mar.- Secre-
taría de Marina. Dirección General de Obras Marítimas,
México, agosto 1959.

Al triturarse la concha para mejorar la granulometría las características de trabajo mejorarán notablemente. Los resultados de las diversas pruebas aparecen en la tabla 3.1.

"...CONCLUSIONES.

A pesar del reducido número de pruebas efectuadas, se puede afirmar que si es posible obtener concreto de calidad satisfactoria, mediante el empleo adecuado de arena y conchas de mar.

La razón agua-cemento de 0.62, es satisfactoria para concreto destinado a usos normales.

Por los resultados obtenidos en las pruebas efectuadas, no se ha manifestado diferencia alguna entre el empleo de agua dulce y agua de mar.

El empleo de un producto inclusor de aire, mejora la manejabilidad del concreto, no observándose mejoría en la resistencia al intemperismo..."

3.2 ANALISIS DE COSTOS.

3.2.1 Escolleras.

Para los efectos de análisis de costos de las escolleras propuestas, se consideran las siguientes posibilidades:

- i. Escolleras con núcleo y coraza de enrocamiento.
- ii Escolleras con núcleo, capa secundaria de concreto simple y coraza a base de DOMS también de concreto simple.
- iii Escolleras consistentes en un muro vertical constituido por tablaestacas de concreto reforzado guiadas por viguetas H o Wide Flange.

La solución (i), está condicionada al hecho de que la laguna sea navegable y es aplicable únicamente a la Boca del Catán, en virtud de la localización de la cantera, así mismo cada una de las dos posibilidades siguientes presentan distinto valor de conformidad con la ubicación de las obras.

3.2.1.1. Escolleras con Núcleo y Coraza a base de Enrocamiento.

Centro de abastecimiento: Cantera de Loma Prieta localizada a 16 Km. al Sur de San Fernando y a 70 Km. de Carbajal.

Operaciones a considerar:

- a. Extracción, clasificación y carga de material.
- b. Transporte terrestre hasta Carbajal o sus inmediaciones.
- c. Maniobra descarga y carga camión-chalán.
- d. Transporte lacustre hasta la Boca del Catán.
- e. Maniobra descarga y carga chalán-camión.

f. Tiro en escolleras y acomodo.

Los precios unitarios obtenidos para las distintas operaciones son como sigue:

a.	\$ 40.55/m ³
b.	212.90 "
c.	7.10 "
d.	15.05 "
e.	7.10 "
f.	16.23 "
	<hr/>
	\$ 298.93/m ³

Hay que considerar el acondicionamiento y mantenimiento del camino Loma Prieta-Carbajal el cual se estima en \$1'750,000.00.

Volúmen aproximado de escolleras en la boca del Catán: 14136 m³.
Incremento al precio del material por m³.

$$1750 \times 10^3 / 14.136 \times 10^3 = \$ 123.80/m^3$$

$$\text{Total} = 298.93 + 123.80 = \$ 422.73/m^3.$$

Costo aproximado de las escolleras en boca del Catán:

$$\$ 422.73 \times 14136 = \$ 5'975,711.00$$

3.2.1.2. Escolleras con núcleo, capa secundaria y coraza a base de DOMS todo de concreto simple.

El concreto será elaborado con conchuela triturada, arena de playa y agua de mar.

Centros de abastecimiento:

Banco número 1 a la altura de las escolleras del Dren al Mar a 66 Km. de la obra en Boca de San Juan.

Banco número 2 en la Barra del Viborero, a una distancia de - 16 Km. de la obra en Boca del Catán.

Operaciones a considerar:

- a. Extracción.
- b. Molido y clasificación.
- c. Transporte.
- d. Mezclado, colado y curado.
- e. Tiro en escolleras y acomodo.

Precios unitarios obtenidos para el Banco No. 1:

a.	\$ 12.50/m ³ .	
b.	22.40 "	Agregado grueso
c.	202.70 "	
Sub-total	<hr/>	
	\$ 237.60/m ³	

a.	\$ 6.60/m ³ .	Agregado fino
b.	94.30 "	
Costo	102.40 "	Cemento
Sub-total	<hr/>	
Mater.	\$ 440.90/m ³	

d.	\$ 184.80/m ³	
e.	16.20 "	
Total núcleo	<hr/>	
	\$ 641.90/m ³ .	

Concreto en DOMS de coraza.

Sub-total materiales \$ 440.90/m3.

d. 245.00 "

e. 38.40 "

Total coraza: \$ 724.30/m3.

Volúmen aproximado núcleo y capa secundaria: 14,090 m3.

Volúmen aproximado coraza: 7,526 m3.

14.090 x 10³ x 641.90 = \$ 9'044,371.00

7.526 x 10³ x 1219.30 = 8'847,241.00

Costo aproximado de esco

lleras Boca de San Juan: \$ 17'891,612.00

Precios unitarios Banco No. 2:

Los valores que varían son:

Agregado grueso

Cemento

Diferencia transporte agregado grueso en menos

202.70 - 49.10 = \$ 153.60/m3

Diferencia transporte cemento en más

94.30 + 94.30 = \$ 188.60/m3

Total núcleo = 641.90 - 153.60 + 188.60 = \$ 676.90/m3.

Total coraza = 724.30 - 153.60 + 188.60 = \$ 759.30/m3.

11.325 x 10³ x 676.90 = \$ 7'665,892.00

2.811 x 10³ x 759.30 = 2'134,392.00

Costo aproximado escolle-

ras Boca del Catán: \$ 9'800,284.00

3.2.1.3. Rompeolas consistente en un muro vertical constituido por tablaestacas de concreto reforzado guiadas por viguetas H o Wide- Flange.

Operaciones a considerar:

- a. Adquisición de viguetas y transporte.
- b. Hincado
- c. Construcción de tablaestaca.
- d. Hincado con chiflón.
- e. Revestimiento de viguetas.
- f. Relleno.
- g. Losa de cubierta.
- h. Protección de la base con enrocamiento.

Precios unitarios obtenidos:

a.	\$	151.85 m.l.
b.		91.00 m.l.
c.		1,340.00 m3.
d.		120.00 m3.
e.		641.90 m3.
f.		18.25 m3.
g.		641.90 m3.
h.		641.90 m3.

Se tendrá entonces en forma resumida:

	Canti dad.	Uni dad.	P.U.	Costo
Guías para tablaestaca incluyendo hincado:	2712	m	242.85	658,609.20
Tablaestaca de concreto:	3676	m ³	1460.00	5'366,960.00
Revestimiento de guías con concreto simple:	136	m ³	641.90	87,298.40
Tensores y solera:	4625	Kg	6.00	27,750.00
Concreto en losa de cubier ta:	1270	m ³	641.90	815,213.00
Arena de relleno:	17463	m ³	18.25	318,690.60
Enrocamiento de protección al pie del muro:	2540	m ³	641.90	1'630,426.00
				<hr/>
				\$8'904,947.20
Imprevistos 10%				890,494.72
				<hr/>
Total para las 4 escolleras:				\$9'795,441.92

El costo por escollera puede obtenerse tomando un precio medio de \$ 7'712.95/m.

3.2.2. Dragado.

De acuerdo con informaciones proporcionadas por el Ing. Enrique Siller (*), el costo del dragado puede variar en la forma siguiente:

Dentro del mar:	\$ 6.60/m ³
Cordón litoral:	\$ 10.00/m ³
Dentro de la laguna:	\$ 3.30/m ³

(*) Comunicación personal del Ing. Enrique Siller al Ing. Jorge Cortés Obregón. Noviembre 1965.

Tomando como cálculo conservador el promedio de los tres, el costo del metro cúbico de dragado sería: \$ 6.65 que parece ser adecuado, ya que según informaciones del mismo Ing. Siller, la Bauer Dredging Co. de Port Lavaca, Tex. con su equipo podría dragar a precios que oscilan entre \$ 5.71 y \$ 6.63 por metro cúbico. Asimismo, de acuerdo con la experiencia -- del Departamento de Ingeniería de Dragado de la Comisión Nacional Consultiva de Pesca, sus costos de dragado en condiciones similares a las de la Laguna Madre oscilan entre \$ 5.00 y \$ 7.00 metro cúbico. Concluyendo el costo aceptado será en números redondos \$ 7.00/m³.

a. Boca de San Juan:

$$1,495,349 \text{ m}^3 \times \$ 7.00 = \$ 10,467,443.00$$

b. Boca del Catán:

$$788,590 \text{ m}^3 \times \$ 7.00 = \underline{5,520,130.00}$$

$$\text{Costo total:} \quad \underline{\underline{\$ 15,987,573.00}}$$

3.3. RESUMEN DE COSTOS.

El costo preliminar de la solución propuesta entonces:

Boca del Catán:

i. Escolleras de enrocamiento:	\$ 5,975,711.00
Dragado:	<u>5,520,130.00</u>
	\$11,495,841.00
ii Escolleras de elementos artificiales:	\$ 9,800,284.00
Dragado:	<u>5,520,130.00</u>
	\$15,320,414.00

iii. Escolleras de tablaestaca de concreto: \$ 4'396,381.00
Dragado: 5'520,130.00
\$ 9'916,511.00

Boca de San Juan:

i. Escollera de elementos artificiales: \$ 17'891,612.00
Dragado: 10'467,443.00
\$ 28'359,055.00

ii. Escolleras de tablaestaca de concreto: \$ 5'399,065.00
Drggado: 10'467,443.00
\$ 15'866,508.00

La solución preliminar más económica sería:

Escolleras de tablaestaca de concreto: \$ 9'795,441.92
Dragado: 15'987,573.00
Total: \$ 25'783,014.92

3.4 DESEMBOCADURA DEL RIO SOTO LA MARINA Y OBRAS CONEXAS DE CANALIZACION.

Se propone que las escolleras se construyan a base de tablaestaca de concreto y viguetas H o WF. Las cantidades de obra aproximadas son:

Vigueta: 2210 m.
Volúmen en muros: 1887.6 m3.
Revestimientos: 67.5 m3.
Relleno: 7800 m3.

Losa: 720 m³.
 Protección: 7020 m³.

Los costos:

2210 x 242.85	=	§	536,698.50
1887.6 x 1460.0	=		2'755,896.00
67.5 x 641.90	=		43,328.25
7800 x 18.25	=		142,350.00
720 x 641.90	=		462,168.00
7020 x 641.90	=		<u>4'506,138.00</u>
		§	8'446,578.75
Imprevistos 10%			<u>844,657.88</u>
		§	9'291,236.63

Si se recurre a la solución a base de elementos artificiales y escollera de talud o elementos naturales tanto en el núcleo como en la coraza los resultados aproximados son los siguientes:

- i. Escolleras de enrocamiento: 30,100 m³. de roca.
- ii. Escolleras con elementos artificiales incluido núcleo y capa secundaria: 30,100 m³ de concreto (19,830 m³ de núcleo y capa secundaria y 8,970 m³ de coraza).

Solución i.	30,100 x § 356.93 =	§ 10'743,593.00
		=====
Solución ii.	19,830 x § 641.90 =	§ 12'728,877.00
	8,970 x § 724.30 =	<u>6'496,971.00</u>
		§ 19'225,848.00
		=====

Solución i + 10% de imprevistos = \$ 11'817,952.30
Solución ii + 10% de imprevistos = \$ 21'148,432.80

En cuanto a los costos de dragado se tendría de acuerdo con las estimaciones aproximadas de volúmenes:

	Cantidad m3.	P.U. \$/m3	Total
Canal del mar a la población de la Pesca:	785,000	7.00	549,500.00
Canal a la Laguna Madre:	205,000	7.00	143,500.00
Canal a la Laguna del Almagre:	13,000	7.00	9,100.00
Canal a la Laguna de Morales:	5,400	7.00	<u>3,780.00</u>
			\$ 705,880.00 =====

Adoptando las dos soluciones más viables el costo total de proyecto preliminar de acondicionamiento de la boca del río - Soto la Marina sería:

Alternativa I

Escolleras en tablaestaca: \$ 9'291,236.23
Dragado: 705,880.00
\$ 9'997,116.23

Alternativa II

Escolleras de enrocamiento: \$11'817,952.30
Dragado: 705,880.00
\$12'523,880.00

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos en el curso del estudio pueden extraerse las siguientes conclusiones:

1a. El proyecto de canales a marea libre debe considerarse únicamente como una base para definir teórica y experimentalmente las características de la solución hidráulica óptima. En particular, las escolleras propuestas deben considerarse como una primera etapa susceptible de prolongarse si las condiciones de transporte así lo impusieran. En cuanto al número de bocas elegido, se aceptó ese número en virtud de las características morfológicas y de dinámica lacustre, pero también queda abierta la posibilidad de que en etapas posteriores se abran un número mayor de bocas de acuerdo con la evolución y necesidades futuras. Resumiendo, el proyecto preliminar constituye una base firme para su análisis exhaustivo en modelo hidráulico reducido. De éste se obtendrán las características definitivas de la solución.

2a. Las dos bocas elegidas presentan las siguientes ventajas bajo el punto de vista hidrodinámico:

i. Están localizadas en zonas de laguna cuyas características de profundidad y extensión, aseguran un adecuado -

movimiento de los volúmenes consecuencia de las mareas astronómicas. Frente a la boca del Catán se localiza la bahía del mismo nombre y para la de San Juan, las mayores profundidades de la Laguna se encuentran en su vaso tributario.

- ii No existen obstáculos interiores tales como islas o deltas -- extensos que impidan una libre propagación y movimiento de las aguas, esto es aún más favorable al considerar el efecto de -- las mareas de viento que producirán un incremento considerable del volúmen que circulará a través de las bocas del Catán y -- San Juan, máxime si se considera que las sobreelevaciones producidas por ellas son del mismo orden que el rango de las mareas astronómicas.
- iii Las bocas funcionarán prácticamente en cuerpos de agua independientes debido a la división del vaso originada por el delta -- del río San Fernando. En cuanto a la propagación hacia el extremo sur de la laguna, la propia configuración de la misma se encarga de limitar la acción de la boca del Catán, quedando -- abastecida esa porción extrema por el río Soto la Marina y el movimiento de mareas en su estuario.
- iv Los efectos de la marea de tormenta sobre las entradas elegidas, principalmente las erosiones en los canales, no serán severos por dos razones: su localización en sitios donde las dunas son estables y la existencia de zonas bajas y extensas en vecindades de ellas - Jesús María y Viborero para la boca del Catán y las cuatro bocas de Santa María para la de San Juan.-

En esas zonas bajas se producirán las mayores invasiones de aguas marinas cargadas de arena, incrementando sus deltas interiores, y por ellas volverán los volúmenes excedentes acumulados en el interior, conservando las entradas diseñadas su régimen hidráulico.

Se insiste nuevamente, que las dos bocas elegidas permitirán visualizar el movimiento de agua que se tendrá realmente en la Laguna, considerándolas por tanto como una primera etapa, que pudiera ser definitiva, si los efectos combinados de mareas de viento y mareas astronómicas dan el resultado que teóricamente se determinó. En cualquier forma esto no altera la bondad del proyecto.

3a. Los volúmenes aportados a la laguna a través de las bocas del Catán y San Juan permitirán compensar las pérdidas por evaporación, y en consecuencia mantener la laguna llena, -- sin embargo esto no es indicativo de que la concentración salina sea la adecuada para que la pesca vuelva a florecer en toda el área. De hecho se considera que la pesca podrá establecerse en un 50% de la extensión total de la Laguna Madre.

4a. La explotación salinera podrá incrementarse a nivel de industria bien desarrollada, en aquellas áreas donde por su distancia a las bocas de alimentación, la concentración salina sea alta y por tanto favorable a ella.

- 5a. El mejoramiento de las condiciones hidráulicas de la desembocadura del río Soto la Marina, incluidas dentro de él la serie de canalizaciones a las lagunas Madre, Almagre y Morales, favorecerá el establecimiento de un puerto pesquero y de refugio con grandes perspectivas de desarrollo dada su localización en la costa de Tamaulipas.
- 6a. El tipo de obras propuestas como bocas de alimentación para la zona sur-centro y norte de la Laguna Madre, y principalmente la norte, podrían también ser utilizadas en una etapa inicial como acceso a zonas de refugio para embarcaciones de escaso porte y posteriormente constituirse en entradas a pequeños puertos pesqueros.
- 7a. Al cubrirse en su totalidad el fondo de la laguna, disminuirán sensiblemente los problemas de ensalitramiento de zonas agrícolas y de perjuicio a las especies ganaderas.
- 8a. La laguna llena, permitirá contar con la posibilidad física de construcción del Canal Intracostero, el día que se justifique económicamente.
- 9a. El turismo volvería a usar la laguna como centro de recreo.

Se insiste finalmente que, el proyecto presentado permite tener una idea teórica completa de la solución al problema; la siguiente etapa previa a la construcción o muy probablemente,

simultánea a su iniciación, es la verificación de ciertas hipótesis hechas en el estudio teórico y complementar diversas informaciones locales, por tanto es necesario establecer las siguientes:

5.2. RECOMENDACIONES.

- 1a. Los proyectos de gabinete deberán verificarse con modelos de fondo fijo y móvil a fin de comprobar su eficiencia en cuanto al aporte de agua a través de las bocas propuestas, tomando en consideración: el área de la sección, las variaciones de marea, la propagación de ella al entrar a la laguna, el área real que participe en el intercambio de agua y la relación longitud de escolleras-transporte litoral.
- 2a. Es necesario obtener información de campo complementaria a la que se tuvo con la campaña intensiva de medidas. Además por los efectos del huracán Beulah sobre la Laguna, es fundamental realizar una serie de observaciones para determinar con precisión esos efectos y aprovechar las condiciones favorables de la Laguna llena que se tienen actualmente.
- 3a. Para lograr los fines propuestos en los puntos anteriores se recomienda el siguiente programa de estudios complementarios, muchos de los cuales se sugiere adopten el carácter de sistemáticos.

5.2.1. Programa de Estudios Complementarias y Observaciones Sistemáticas.

5.2.1.1. Topografía.

- a. Establecimiento de varios bancos de nivel para referirlos al cero obtenido de las observaciones en el mareógrafo que se instalará en la escollera del dren al mar.
- b. Restitución de los tramos de poligonal en los sitios propuestos para las obras, en un frente de 1 Km.
- c. Levantamiento de las secciones longitudinales en las bocas Santa María, San Rafael, Boca Ciega, Sandoval, Barra del Catán y Barra de San Juan, a fin de compararlos con la topografía obtenida antes del huracán Beulah.

5.2.1.2. Hidrografía.

a. Batimetría.

Si las condiciones del mar lo permiten, se sondeará un frente de 500 m. a cada lado de los ejes de las Barras de San Juan y del Catán. La laguna se sondeará en su totalidad; el método a seguir será función de las condiciones de tránsito por la playa y de las de la propia laguna, quedando a juicio del jefe de brigada el procedimiento a seguir.

b. En las mismas barras (a) se observarán corrientes playeras, una vez por semana durante 2 horas por la mañana y una por la tarde.

c. Se procurará aprovechar los días de buen tiempo para la medición de corrientes litorales, fondeando una lancha en la

260

batimétrica (-5.00) frente a la barra del Catán o San Juan según corresponda.

Profundidades de observación:

- Superficie, 2.00 m., 4.00 m.

Intervalo entre conjunto de observaciones: media hora durante 24 horas.

d. En la o las bocas que se mantengan abiertas, se harán mediciones de corrientes en el interior de la laguna, en la boca misma y en la zona marina vecina a la boca, instalando también un limnógrafo en el interior para definir las características de la marea en la Laguna misma.

g. Mareas.

Se construirá una caseta en la escollera Sur del Dren del Mar, en ella será instalado un mareógrafo, para definir con precisión un nivel de referencia.

f. Gasto Sólido.

Durante la operación de medición de corrientes playeras y en forma simultánea se medirá el gasto sólido, instalando trampas de arena, en los siguientes puntos:

Entre la línea de playa y la de rompiente (aprox.-1 m.)

En la rompiente misma (aprox. - 2 m.)

Después de la rompiente (aprox. - 3 m.)

263

5.2.1.3. Meteorología.

Las observaciones meteorológicas, serán sistemáticas, relativas a viento y evaporación.

- a. Para la información sobre vientos, se construirá una torre de 12 m. de alto, en las inmediaciones de la Barra de San Juan en la cual se instalará dos anemocinemógrafos quedando uno a una altura de 8 m. y el segundo a 12 m. (sobre el nivel de la laguna). En caso de no disponer de los aparatos oportunamente, las observaciones se harán con personal valiéndose de anemómetro portátil y veleta ejecutándolas 3 veces al día.
- b. Adyacente a la torre se instalará un evaporómetro, cuya operación se ajustará a las normas ya existentes para estos aparatos.
- c. Mareas de viento.- Instalación de limnigrafos, uno en el extremo norte de la laguna y otro en la sur a la altura de la boca del Catán, como mínimo.

5.2.1.4. Transporte Eólico.

Con el objeto de cuantificar el arrastre eólico y estudiar la formación de dunas, se construirán barreras cuyo diseño y forma de implantación será dado en su oportunidad. Esta barrera de prueba presentará un frente de 100 m. y será construída en las vecindades de Paso de San Juan. El funcionamiento de la barrera se controlará con:

- a. Levantamiento de 6 secciones espaciadas 20 m. en el frente de la barrera.

- b. Seccionamiento semanal de las secciones levantadas inicialmente.
- c. Si se logra la formación de dunas sobre la barrera, se instalará una segunda barrera sobre la duna cuya distancia a la primera dependerá de la manera en que se desarrolle la primera formación y así sucesivamente.

Con el objeto de poder garantizar el aprovisionamiento de materiales requeridos para las obras propuestas, el jefe de la Brigada de Estudios realizará reconocimientos con el fin de localizar bancos de conchuela o grava si la hubiese para el concreto necesario en losas y placas; bancos de piedra factibles de dar elementos hasta de 30 Kg. para la protección al pie de las obras, señalando distancias a los sitios de proyecto y las cantidades posibles de material para extraer.