

TESIS DEFENDIDA POR  
**Renzo Whitembury Bianchi**  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

---

Dr. Modesto Ortiz Figueroa  
*Director del Comité*

---

Dr. Pedro Osuna Cañedo  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Luis Zavala Sansón  
*Miembro del Comité*

---

Mc. Francisco Suárez Vidal  
*Miembro del Comité*

---

Dr. Jesús Manuel Figueroa Rodríguez  
*Coordinador del programa de posgrado  
en Oceanografía Física*

---

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales  
*Director de Estudios de Posgrado*

19 de Agosto del 2011

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE  
ENSENADA**



---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS  
EN OCEANOGRAFÍA FÍSICA**

---

**“INDUCCIÓN DE AUTODRAGADO POR MAREA PARA MITIGAR EL  
AZOLVAMIENTO EN PUERTO CHIAPAS, MÉXICO”**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

RENZO WHITTEMBURY BIANCHI

Ensenada, Baja California, México, 19 de Agosto del 2011.

Resumen de la tesis de RENZO WHITTEMBURY BIANCHI, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Oceanografía Física. Ensenada, Baja California. 19 de Agosto del 2011.

**“INDUCCIÓN DE AUTODRAGADO POR MAREA PARA MITIGAR EL AZOLVAMIENTO EN PUERTO CHIAPAS, MÉXICO”**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Modesto Ortiz Figueroa  
Director de Tesis

En este trabajo se analiza la posibilidad de inducir el autodragado por marea para mitigar el azolvamiento en Puerto Chiapas. El procedimiento consiste en habilitar un área de almacenamiento de agua al interior del puerto durante la pleamar, para ser liberada en la bajamar. El análisis se realiza mediante el modelo hidrodinámico de Goto et al. (1997), al cual se le ha acoplado el modelo de transporte de sedimento de Sternberg (1972). Se analizan diferentes áreas de almacenamiento de agua en función de la capacidad del refluo inducido para transportar sedimento a las afueras del puerto. Los resultados indican que la construcción de una poza adicional al puerto, ubicada al extremo del canal de navegación, de dimensiones 1 km x 1 km x 2m, con una compuerta o vertederos a la entrada de la poza, es suficiente para expulsar del canal de navegación un volumen de 125,000 metros cúbicos de sedimento por ciclo de marea, equivalente al sedimento que se acumula durante un mes por la acción del oleaje y del viento. El continuo accionar de este mecanismo, liberando el agua de la poza mes con mes o cuando se estime necesario, mantendría al canal de navegación libre de sedimento.

**Palabras Clave:** Puerto Chiapas, Autodragado inducido por marea, Modelo numérico, Transporte de sedimento.

**Abstract of the thesis presented by RENZO WHITTEMBURY BIANCHI, in partial fulfillment of the requirements of the degree of MASTER OF SCIENCE in PHYSICAL OCEANOGRAPHY. Ensenada, Baja California, 19 de Agosto, 2011.**

**“AUTO-DREDGING INDUCED BY TIDES TO MITIGATE SAND ACCUMULATION IN PUERTO CHIAPAS, MÉXICO”**

This Thesis discusses the possibility of inducing auto dredging by tides, to mitigate sand accumulation in Puerto Chiapas. The procedure consists of enabling a storage area of water at high tide that will be released at low tide. The analysis was performed using the hydrodynamic numerical model of Goto et al. (1997), which has been coupled with the sediment transport model of Sternberg (1972). We analyze different areas of water storage in terms of the capacity of the induced ebb, to drag sediment outside the port. The results indicate that the construction of an additional pool at the port, located at the end of the navigation channel, of dimensions 1 km x 1 km x 2m with a spillway at the entrance of the pool, is sufficient to expel a volume of 125,000 cubic meters of sediment from the navigation channel per tidal cycle, equivalent to the volume of sediment that was accumulated during one month by the action of waves and wind. The continuous action of this mechanism, releasing water from the pool on a monthly basis or when necessary, could be enough to maintain the navigation channel free of sediment.

**Keywords:** Puerto Chiapas, Auto-dredging induced by tides, Numerical model, Sediment transport.

## Dedicatoria

*Dedico esta tesis con todo cariño a mi esposa  
A mi madre  
A mis tres hijas Kiara, Rafaella y Luana  
En el cielo Tata, Nonita, y a mi familia.*

## Agradecimientos

La primera persona a la cual quiero agradecer es a mi director de tesis, el Doctor Modesto Ortiz. Su paciencia, dedicación y compromiso personal son y serán un ejemplo a seguir tanto en mi vida personal como profesional.

Extiendo mi agradecimiento a los miembros del comité de tesis: Pedro Osuna, Luis Zavala y Francisco Suárez, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarme. Sus comentarios y sugerencias fueron enriqueciendo cada vez más este trabajo de tesis.

A mis profesores, Oscar Velasco, Jorge Parés, Paula Pérez, Manuel López, Julio Sheinbaum, Teresa Cavazos, Guido Marinone, José Gómez, Julio Candela, durante mi formación en el posgrado.

A mis compañeros y amigos del postgrado, por su apoyo incondicional y empeño constante, Ramón Fuentes, Erika Sandoval, Julio Martínez, Luis Erasmo Miranda, Leonardo Tenorio, Jorge Montes, Diego Pantoja, Gerardo Ramírez, Bernardo Esquivel, Lilia Flores, Héctor García, Máximo García-Jove y Gino Passalaqua.

A todo el personal de investigadores e ingenieros de la División de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano de transporte (IMT), por su tiempo y apoyo.

A la Marina de Guerra del Perú por darme la oportunidad de estudiar esta maestría y a la Dirección de Hidrografía y Navegación por haber confiado en mí.

Finalmente quiero agradecer de manera especial a mí esposa, por su aliento constante, su paciencia y apoyo incondicional, ya que esta etapa la vivimos juntos al lado de nuestras pequeñas hijas que son lo que más queremos en este mundo.

# Contenido

## Página

### I.INTRODUCCIÓN

I.1 Objetivos.....	1
I.2 Antecedentes.....	2
I.2.1 Área de estudio .....	2
I.2.2 Descripción de la Problemática en Puerto Chiapas.....	5
I.2.3 Transporte Litoral y Volúmenes de Dragado .....	8
I.2.4 Oleaje .....	12
I.2.5 Mareas.....	14
I.2.6 Viento .....	16
I.2.7 Granulometría.....	16
<b>II.METODOLOGÍA .....</b>	<b>17</b>
II.1 Modelohidrodinámico .....	17
II.2 Modelo de Transporte de sedimento .....	19
II.3 Acoplamiento del modelo hidrodinámico con el modelo de transporte de sedimento .....	24
<b>III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>28</b>
<b>IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>36</b>
<b>V. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>37</b>

## Índice de figuras

Figura		Página
1	Ubicación de Puerto Chiapas. Imagen graficada con Mmap con datos de etopo2.....	3
2	Imagen Puerto Chiapas año 2001, proporcionada por el IMT.....	4
3	Construcción de estructuras en Puerto Chiapas (1972 – 1993).....	6
4	Condición actual de Puerto Chiapas.....	7
5	Batimetría de Puerto Chiapas Febrero-2010.....	10
6	Batimetría de Puerto Chiapas Setiembre-2010.....	11
7	Material extraído en operaciones de dragado año 2010.....	12
8	Dirección del Oleaje en Pto. Chiapas.....	13
9	Altura de Oleaje en Pto. Chiapas.....	13
10	Histograma de períodos pico observados.....	14
11	Marea Puerto de Chiapas. enero 2011.....	14
12	Estero de Punta Banda, Ensenada B.C.....	15
13	Marea Puerto de Ensenada. enero 2011.....	16
14	Factor de proporcionalidad K en función del esfuerzo relativo (Sternberg, 1971).....	22
15	Umbral de velocidad en función del diámetro del grano determinados por Sternberg (1967, 1971).....	23
16	Esquema de diferencias finitas para integrar la ecuación de conservación de masa del sedimento.....	26
17	Diagrama de flujo. Metodología empleada para calcular el transporte de sedimento en Puerto Chiapas.....	27
18	Ubicación de la poza adicional al puerto.....	29
19	Esquema longitudinal del puerto para ilustrar la condición inicial del modelo hidrodinámico para forzar el reflujó por marea en el puerto .....	30



**ÍNDICE DE FIGURAS (Continuación)**

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
20	Velocidad del refluo en el km 2 del eje horizontal de la Figura 21, al centro del canal principal.....	30
21	Campo de velocidad a los 7 minutos después de liberar el agua de la poza.....	31
22	Campo de velocidad a los 13 minutos después de liberar el agua de la poza.....	31
23	Ubicación y espesor del sedimento transportado por el refluo de marea inducido al liberar súbitamente el agua contenida en la poza al interior del puerto.....	32
24	Modelo conceptual del flujo de sedimento por la acción del oleaje y del refluo inducido por la poza.....	33
25	Ubicación y espesor del sedimento transportado por el refluo de marea inducido al liberar súbitamente el agua contenida en la poza al interior del puerto.....	35

## Lista de Tablas

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
I	Volúmenes de dragado en Puerto Chiapas (Fuente IMT).....	9
II	Valores del parámetro $C(\phi)$ en función del diámetro del grano.....	21

# **I. Introducción**

---

Puerto Chiapas, México, que es objeto de estudio en esta Tesis, es un puerto totalmente artificial habilitado mediante la excavación de una costa que originalmente era prácticamente recta. Desde su construcción en el año 1972, este puerto ha presentado problemas de azolvamiento que dificultan la operación portuaria. Además del azolvamiento del canal principal de acceso, se han presentado dos problemas de singular magnitud en las afueras del puerto que han dificultado su operatividad y han encarecido el costo de mantenimiento. Uno es la acreción o crecimiento desmesurado de la playa aledaña al puerto debido al abundante transporte litoral de sedimento que ha sido interrumpido por la escollera este del puerto y, consecuentemente, el otro problema es la erosión de la playa al oeste del puerto. Las acciones tomadas para contrarrestar estos problemas han sido muy costosas y lamentablemente no han perdurado en el tiempo, motivo por el que en esta Tesis se plantean los siguientes objetivos para mitigar el azolvamiento del puerto.

## **I.1 Objetivos**

### Objetivo General

Analizar la posibilidad de mantener los canales al interior del puerto libres de azolvamiento, activando artificialmente, mediante una compuerta y una poza o área adicional de almacenamiento de agua, el mecanismo de autodragado del puerto por marea sin interrumpir el transporte litoral natural.

### Objetivos particulares

- Desarrollar en diferencias finitas el modelo de transporte de sedimento de Sternberg (1972).

- Acoplar el modelo numérico-hidrodinámico de Goto et al. (1997), con el módulo en diferencias finitas del modelo de transporte de sedimento de Sternberg (1972).
- Calcular la capacidad de autdragado del puerto amplificando artificialmente el reflujos de marea con diferentes configuraciones de la poza adicional al puerto.

## **I.2 Antecedentes**

### **I.2.1 Área de estudio**

Puerto Chiapas se localiza en el extremo suroeste de México, en el estado de Chiapas, entre los paralelos 14°45'00" y 14°39'30" latitud Norte y los meridianos 92°27'00" y 92°23'00" longitud Oeste, en una zona litoral colindante con el Océano Pacífico (Figura 1). Su ubicación es estratégica por su conexión con mercados tan importantes como Asia, Estados Unidos, Canadá y los países Sudamericanos de la cuenca del Pacífico. Asimismo, a través del canal de Panamá, se conecta con el resto del mundo. Puerto Chiapas, además de encontrarse en una región agrícola por excelencia, posee muchas zonas arqueológicas, lo cual hace que el turismo sea uno de los mecanismos que impulsan su desarrollo.

Puerto Chiapas es un puerto artificial habilitado mediante la excavación y dragado de un área costera de aproximadamente 85 hectáreas (Figura 2). Su construcción se inició en 1972 con el dragado del canal de acceso y de las pozas principales, así como con la construcción de los espigones este y oeste de 800 y 630 metros de longitud, respectivamente. La costa en la vecindad del puerto tenía una orientación originalmente recta.

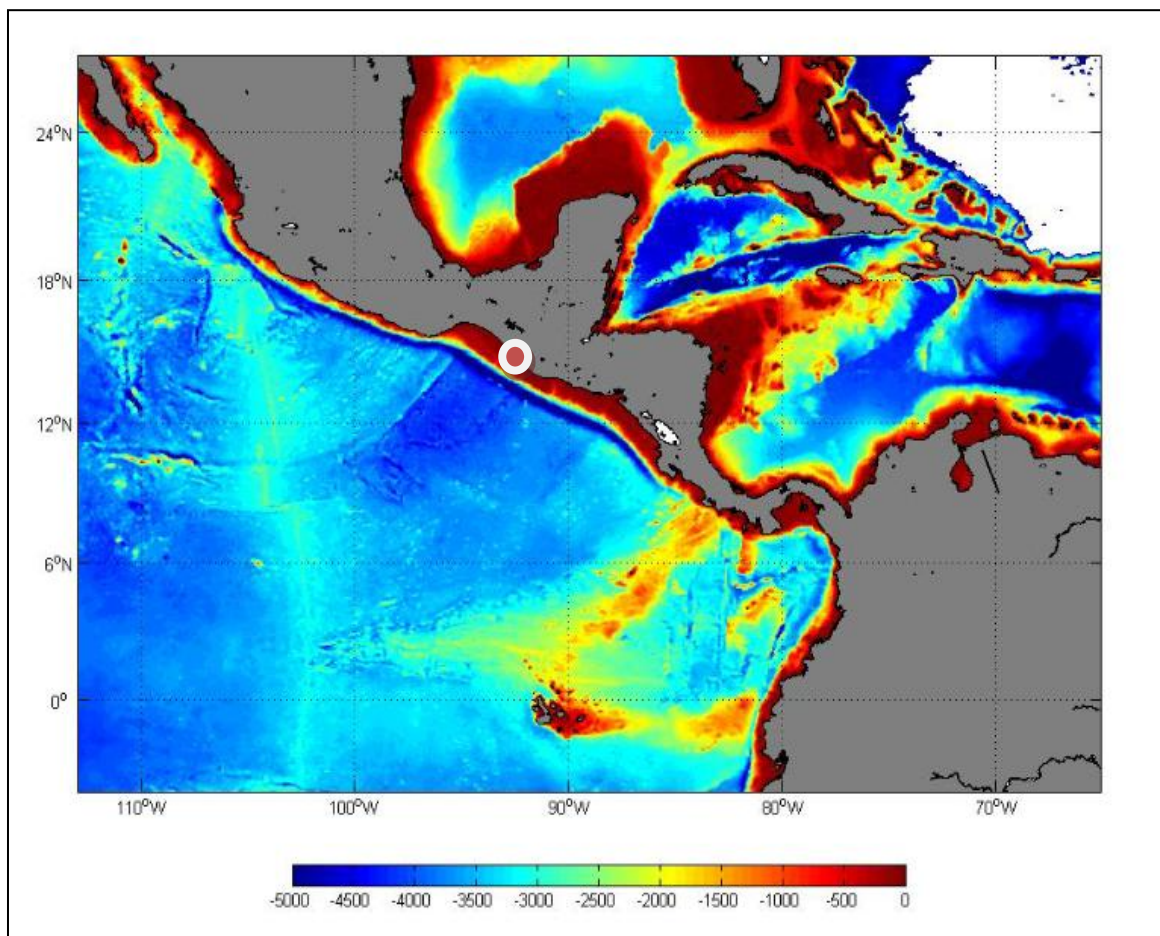


Figura 1. El círculo al sur de México indica la ubicación de Puerto Chiapas. La escala de color indica las profundidades del océano en metros (Mmap - etopo2).



Figura 2. Puerto Chiapas año 2001. Fotografía aérea cortesía del Instituto Mexicano de Transporte ( IMT ).

## **I.2.2 Descripción de la problemática en Puerto Chiapas**

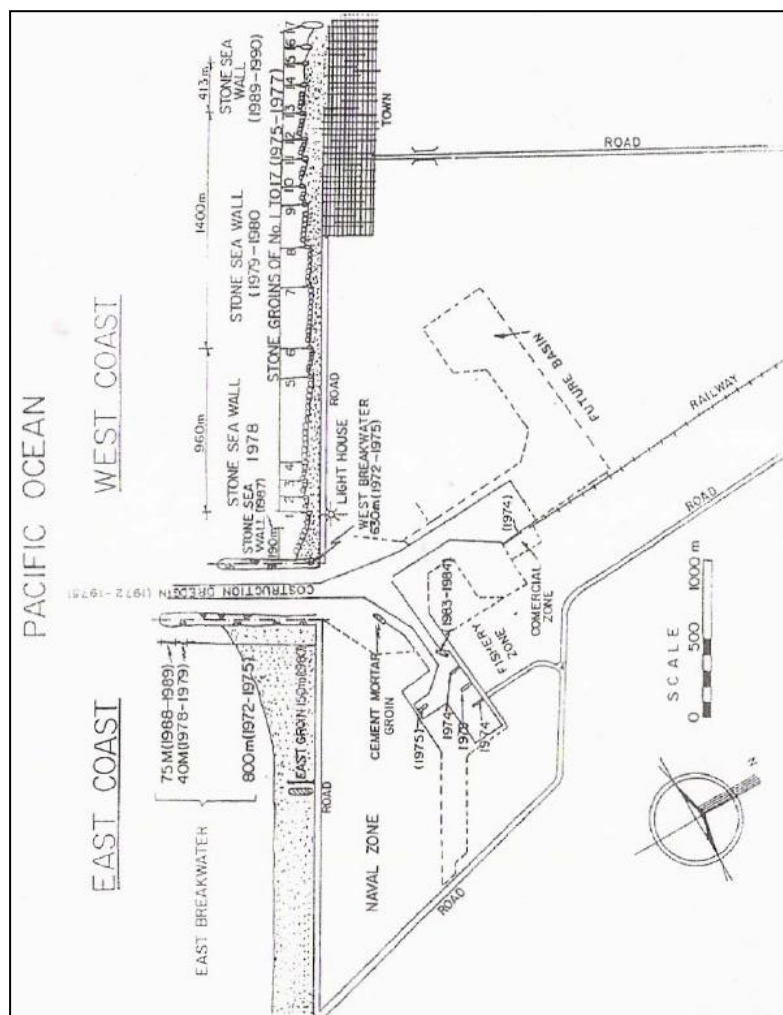
Desde la apertura del puerto en el año 1975, se presentó un proceso de depositación de arena en la costa este y en el canal principal, y un proceso de erosión en la costa oeste del puerto.

Debido a la rápida acumulación de arena evidenciada por el crecimiento de la playa en la costa este, y a la consecuente acumulación de arena en el canal principal, fue necesario prolongar 40 metros el espigón este en los años 1978-79, y por el mismo motivo, 10 años más tarde, se adicionaron 75 metros de longitud al mismo espigón.

El transporte litoral de sedimento proveniente del sureste resultó ser tan abundante que, para mitigar la inoperatividad del espigón este, en el año 1980 se tuvo que construir un espigón secundario de 150 metros de longitud a un kilómetro al sureste del espigón este. Al paso del tiempo, el espigón secundario quedó inmerso totalmente en la playa, como se puede apreciar en la Figura 2.

El transporte eólico o transporte de arena por acción del viento también representa un problema para el puerto. El viento sur, predominante en esta región, se intensifica durante los meses de marzo a junio y contribuye sustancialmente al azolvamiento del puerto. Por ejemplo, el canal que comunica al recinto de pesca y a la base naval con el resto del puerto quedó totalmente azolvado en el año 1994, y para abrirlo se tuvo que excavar y nuevamente dragar dicha área.

En contraste al problema de acreción de playa y de azolvamiento del puerto, se presenta un fuerte problema de erosión en la costa oeste adyacente al puerto. Para contrarrestar la erosión se construyeron 17 espigones (Figura 3), a lo largo de 3 kilómetros en la costa oeste, entre los años 1975 y 1990. Con estos espigones no se obtuvieron los resultados esperados, por lo que se construyeron defensas de roca entre el espigón oeste y el espigón 14, a lo largo de 1.9 km de la línea de costa.

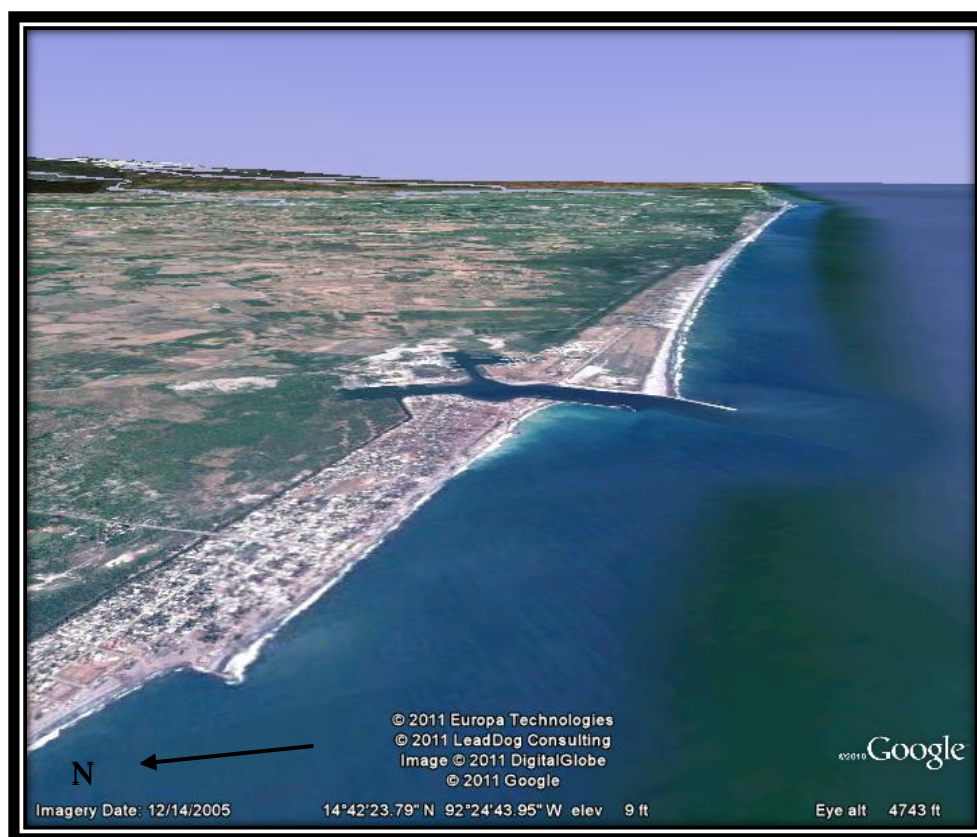


**Figura 3. Construcción de estructuras en Puerto Chiapas entre los años 1972 – 1993. Plano cortesía del IMT. Montoya et al, (1994).**

A pesar de todos los esfuerzos por mitigar la erosión, el problema continuó e incluso parte del cementerio de la ciudad terminó en el mar. Tan fuerte era la erosión que en el año 1990 el espigón #17 tuvo que prolongarse 75 metros tierra adentro para evitar que la erosión afectara al área urbana aledaña al puerto.



En el año 2002 se reforzaron los espigones principales y se construyó un espigón adicional 800 m al oeste del canal principal. En el año 2003 se decidió prolongar una vez más el espigón este. Esta vez se prolongó 450 m con un ángulo de deflexión de  $20^\circ$ , lo cual produjo mejoras y redujo sustancialmente el transporte de arena hacia el canal principal del puerto. Sin embargo, se estima que en aproximadamente 15 años tendrán que prolongar las escolleras otro tramo de similares dimensiones (Montoya et al., 1994). La configuración actual del puerto se ilustra en la Figura 4.



**Figura 4. Condición actual de Puerto Chiapas (2011).**

Todas las medidas para resolver la problemática del puerto han significado grandes inversiones a través de los años pero los problemas persisten. Actualmente se siguen realizando estudios con la finalidad de resolver dichos

problemas. Existen también propuestas para la implementación de un sistema mecánico de paso “Bypass” de arena, extrayendo arena de la costa este del puerto para depositarla en la costa oeste, propuesta por la U.S. Army Corps of

Engineers (USACE, 2001), pero el costo es muy elevado y los ingresos que provienen del puerto no justificarían el mantener un sistema de ese tipo en funcionamiento.

### **I.2.3 Transporte Litoral y Volúmenes de Dragado**

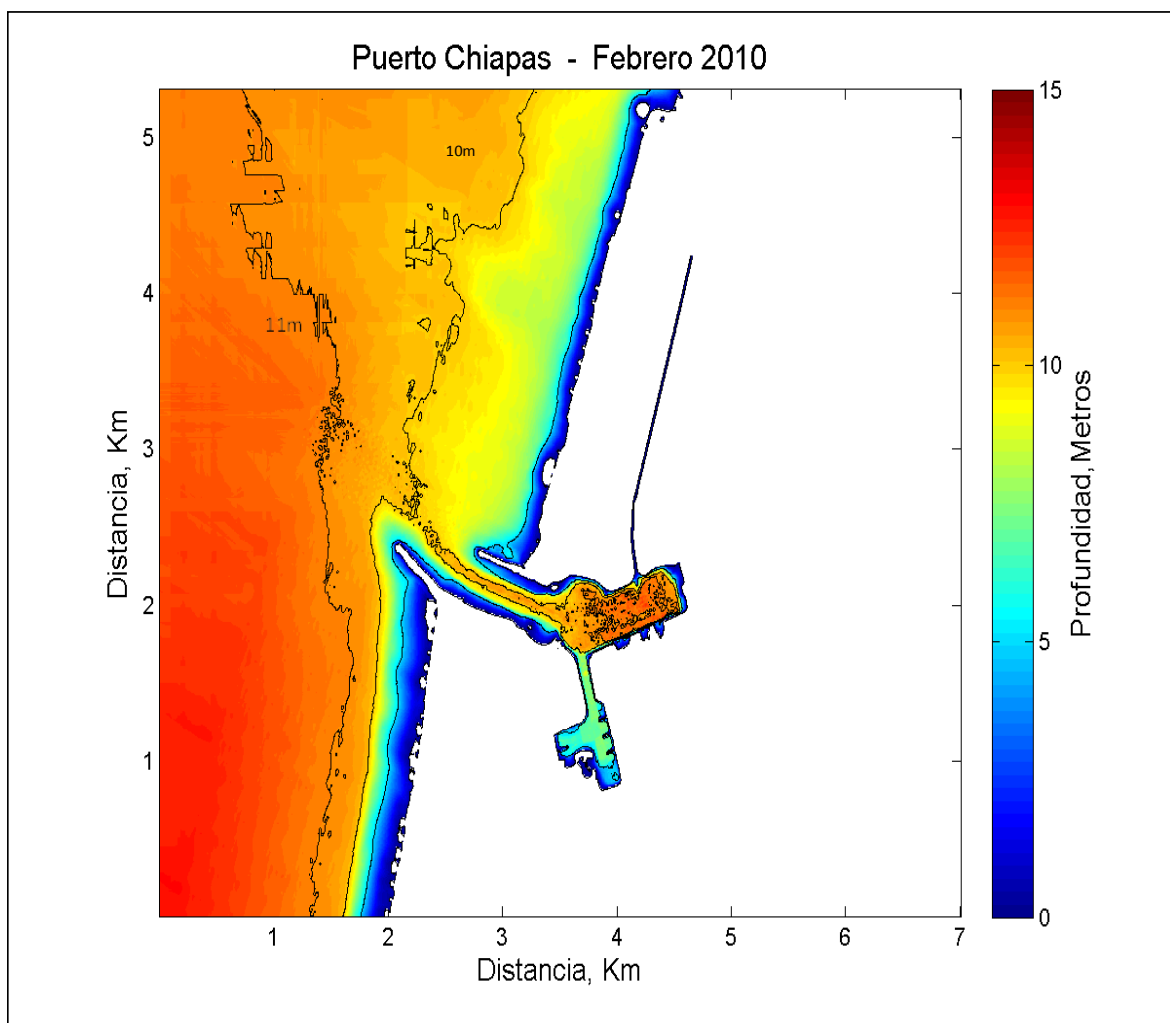
El aporte de sedimento que recibe Puerto Chiapas proviene de las desembocaduras de dos ríos: el río Suchiate a 27 km al sureste del puerto, y el río Coatán a 14 km al noroeste del puerto. La desembocadura del río Suchiate es la fuente principal del transporte litoral que recibe el puerto. Este transporte litoral, producto del accionar de las olas y las corrientes litorales, es evidente y abundante. La línea perpendicular a la costa tiene un azimut de 223°. La dirección predominante de proveniencia de las olas varía entre los 200° y 220° de azimut lo cual genera un transporte litoral hacia el noroeste la mayor parte del tiempo. Esto se puede constatar observando la acumulación de sedimento en el espigón sureste del puerto (Figura 4). Se estima que el transporte litoral total es de aproximadamente 886,000 metros cúbicos por año (Bustamante, 2007).

El transporte de sedimento hacia el interior del puerto debido tanto a la acción directa del oleaje sobre el canal principal, como al transporte eólico, se puede estimar mediante los volúmenes de dragado que se muestran en la Tabla I. El promedio anual de dragado entre los años 1997 y 2006 es de aproximadamente 1'000,000 metros cúbicos por año.

**Tabla I. Volúmenes de dragado en Puerto Chiapas (Fuente IMT)**

<b>Año</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
1997	873,000
1998	1'205,000
1999	1'073,000
2000	1'257,000
2001	1'200,000
2002	1'297,000
2003	220,000
2004	678,000
2005	1'678,000
2006	1'400,000

El volumen de dragado más reciente es de 750,000 metros cúbicos, que se acumularon de finales de febrero a principios de setiembre del 2010 (Información recibida del IMT). El volumen de dragado corresponde a una acumulación promedio de 125,000 metros cúbicos por mes. En las Figuras 5 y 6 se muestran las batimetrías del puerto y de su entorno obtenidas una en febrero y otra en setiembre del 2010, respectivamente. La diferencia entre ambas batimetrías (Figura 7), indica la ubicación y el espesor del sedimento antes de ser dragado. Esta figura es muy importante, ya que a través de ella podemos señalar las zonas críticas de azolvamiento al interior del canal principal, cuya limpieza forma parte de nuestros objetivos.



**Figura 5. Batimetría de Puerto Chiapas antes del dragado (febrero del 2010). Datos batimétricos cortesía del IMT. Además de la línea de costa, las curvas de nivel corresponden a las profundidades de 10 y 11 metros.**

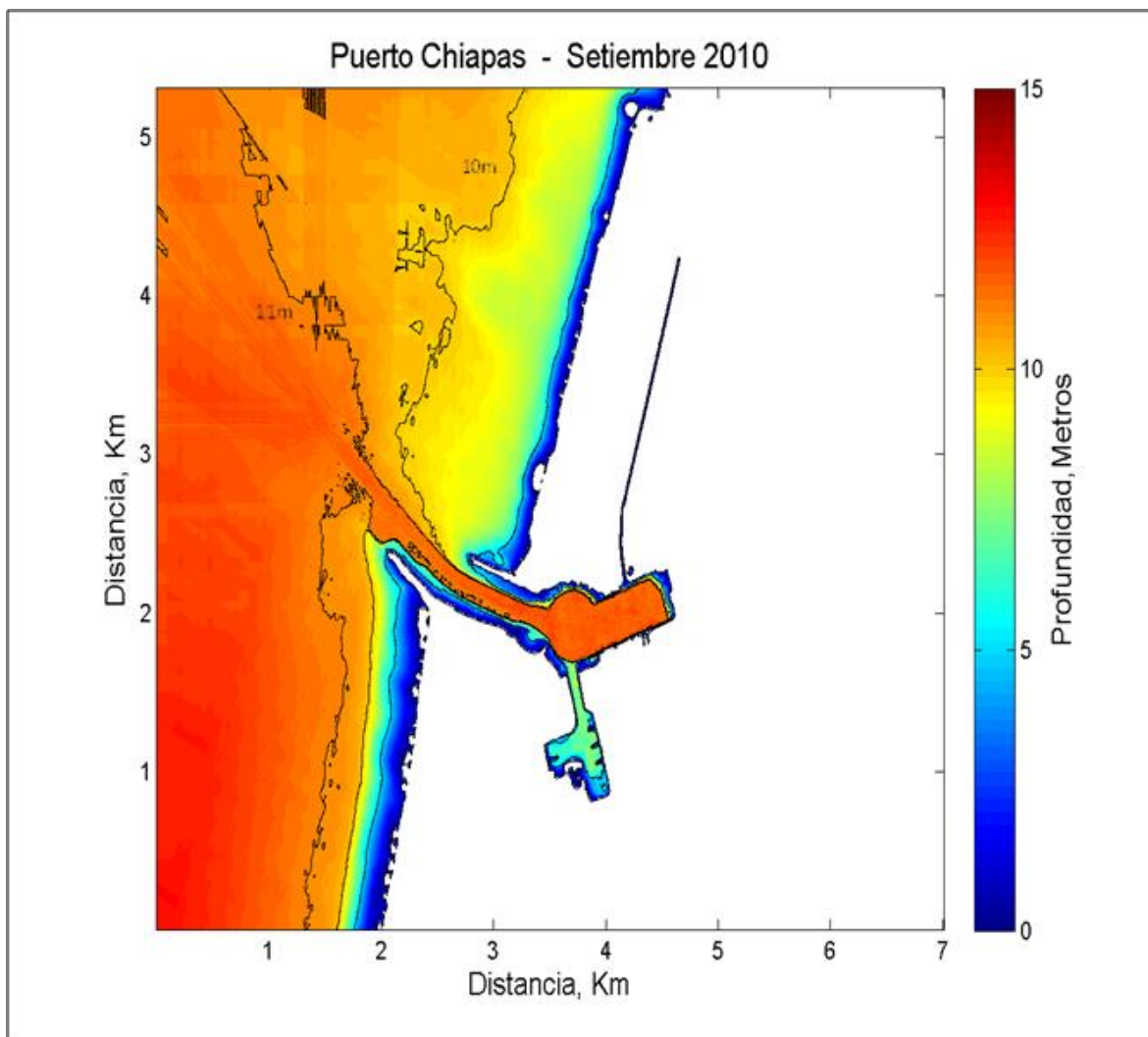
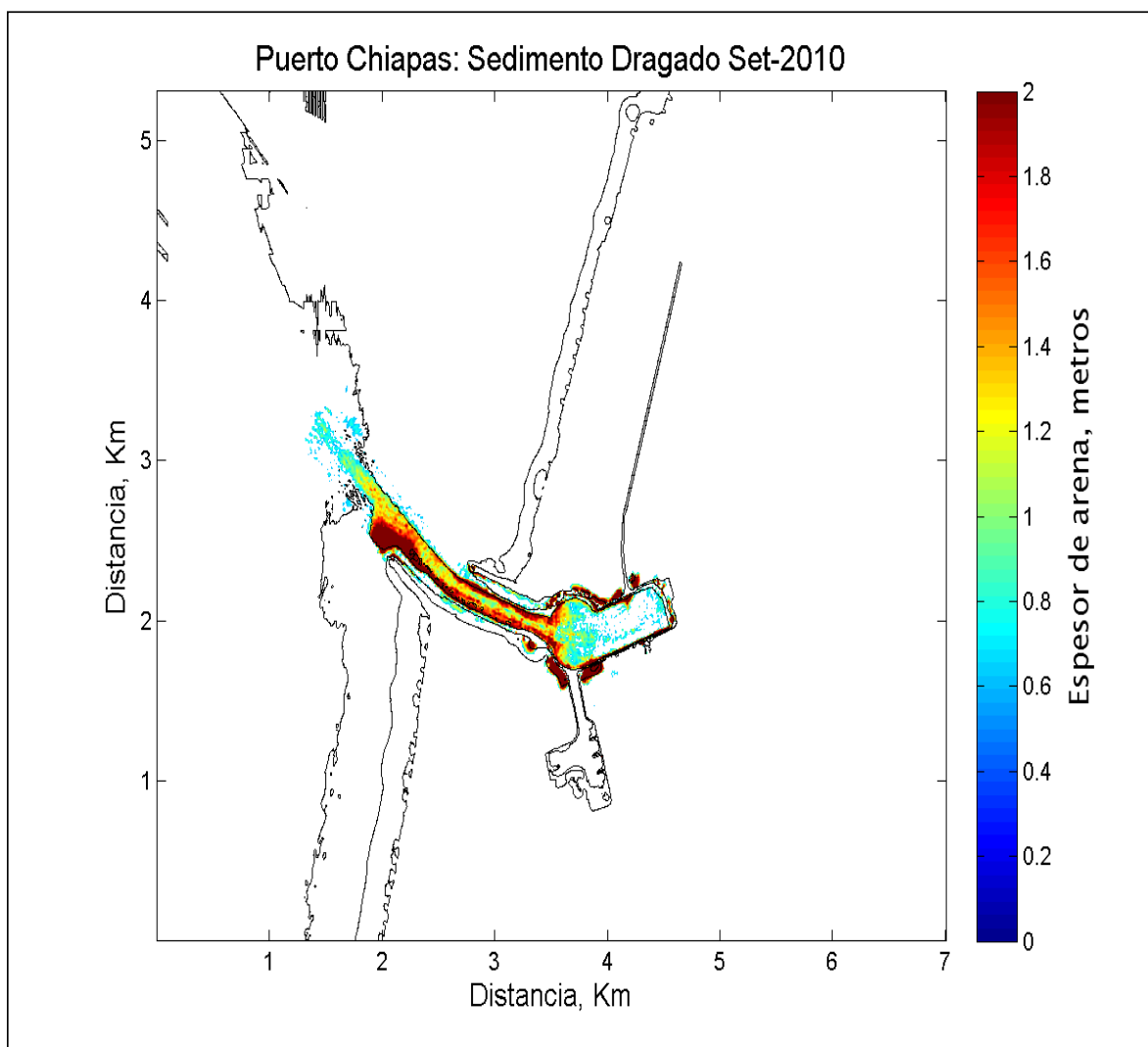


Figura 6. Batimetría de Puerto Chiapas, setiembre del 2010. Datos batimétricos cortesía del IMT. Además de la línea de costa, las curvas de nivel corresponden a las profundidades de 10 y 11 metros. La profundidad del canal principal y del interior del puerto es de 11 metros con respecto a la Bajamar Media.



**Figura 7. Material extraído en operaciones de dragado en setiembre del 2010.**

### **I.2.4 Oleaje**

El oleaje predominante en Puerto Chiapas proviene de las olas “swell” generadas en el Pacífico sur. Durante los meses de Setiembre a Enero se presentan condiciones de mayor energía. La altura significativa de olas en Puerto Chiapas es de 1.8 metros, con un período pico promedio de 13.49 segundos y dirección promedio de 204.32° (USACE, 2001). Los histogramas de dirección, altura significativa y periodo, se muestran en las Figuras 8, 9 y 10.

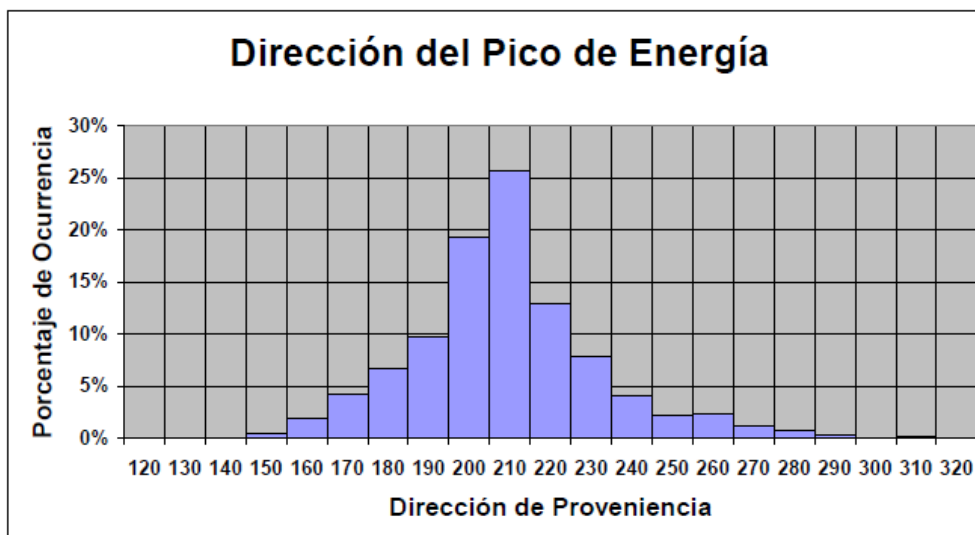


Figura 8. Dirección de Oleaje (Informe USACE, 2001)

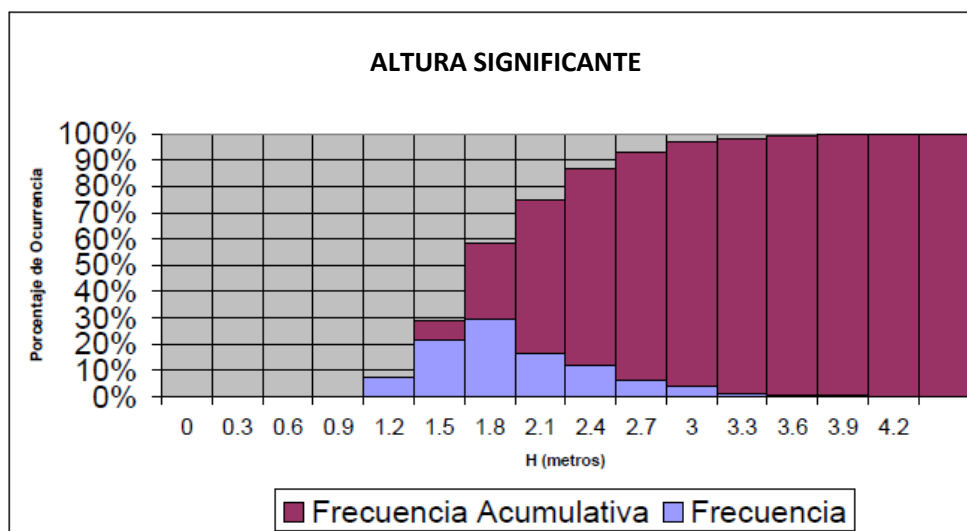


Figura 9. Altura de Oleaje (Informe USACE, 2001)

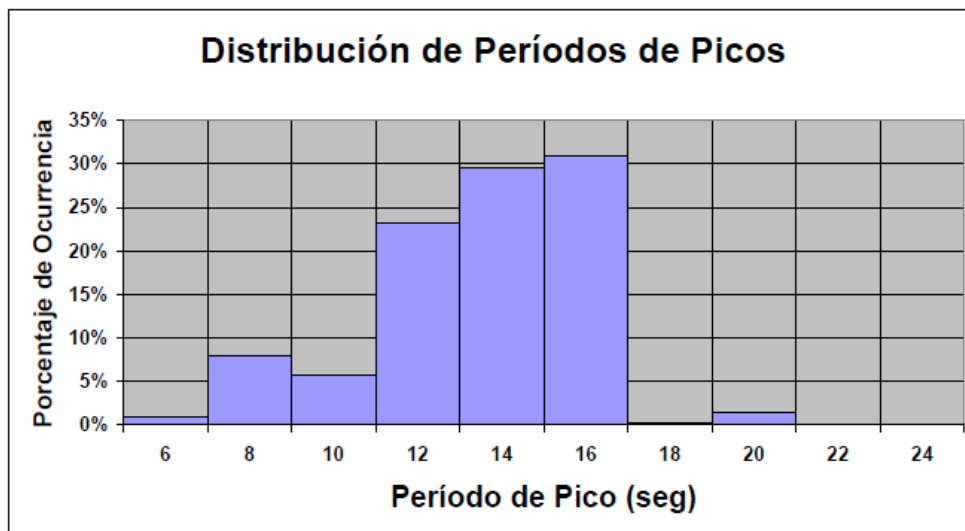


Figura 10. Histograma de períodos pico observados (Informe USACE, 2001)

## I.2.5 Mareas

En Puerto Chiapas la marea es semidiurna (Figura 11), con una amplitud promedio de 1.47 metros.

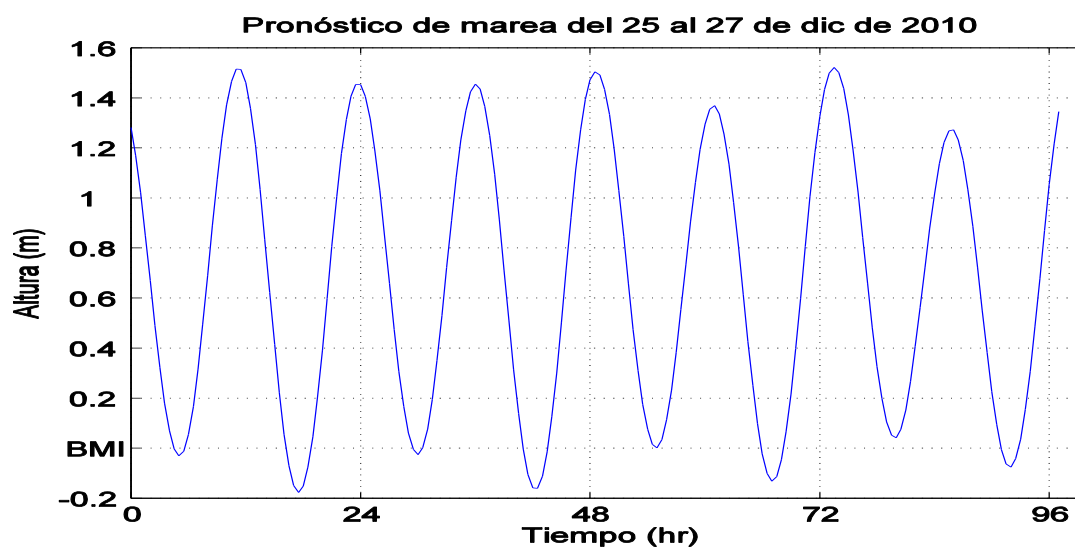
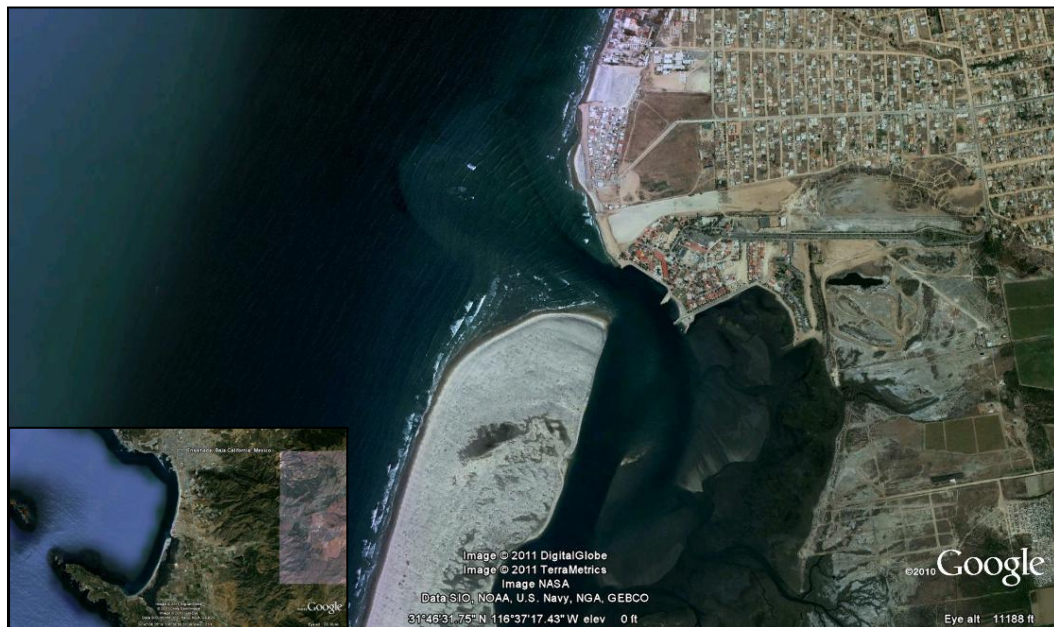


Figura 11. Marea en el Puerto de Chiapas, (González et al., 2010).



El prisma de marea o el volumen de agua que ingresa al puerto en el intervalo de tiempo entre la marea baja y la marea alta está relacionado directamente con la amplitud de la marea. A su vez, la intensidad del flujo y reflujos de marea al interior del puerto está relacionada con el prisma de marea. Por las características de la marea en Puerto Chiapas, se puede estimar que no hay asimetría entre el flujo y el reflujos, por lo que no se espera un transporte neto de sedimento al interior del puerto. Nos interesa analizar principalmente la velocidad de reflujos, y amplificarla para poder incrementar la capacidad de arrastre de sedimento del fondo hacia el exterior del canal principal como veremos más adelante. Esta idea de generar una asimetría en el reflujos para mantener el puerto libre de sedimento, proviene de la observación de ambientes naturales en donde la asimetría de la marea mantiene naturalmente abiertas las bocas de las lagunas costeras, por ejemplo, en el Estero de Punta Banda en Baja California (Figura 12), la marea mixta, con predominancia semidiurna (Figura 13), alcanza su nivel máximo en 12 horas y en las siguientes 6 horas alcanza su nivel mínimo, imprimiendo mayor velocidad en el reflujos y, consecuentemente, mayor arrastre de sedimento hacia el exterior de las lagunas (Ortiz et al., 2003).



**Figura 12. Boca del Estero de Punta Banda, Ensenada B.C.**

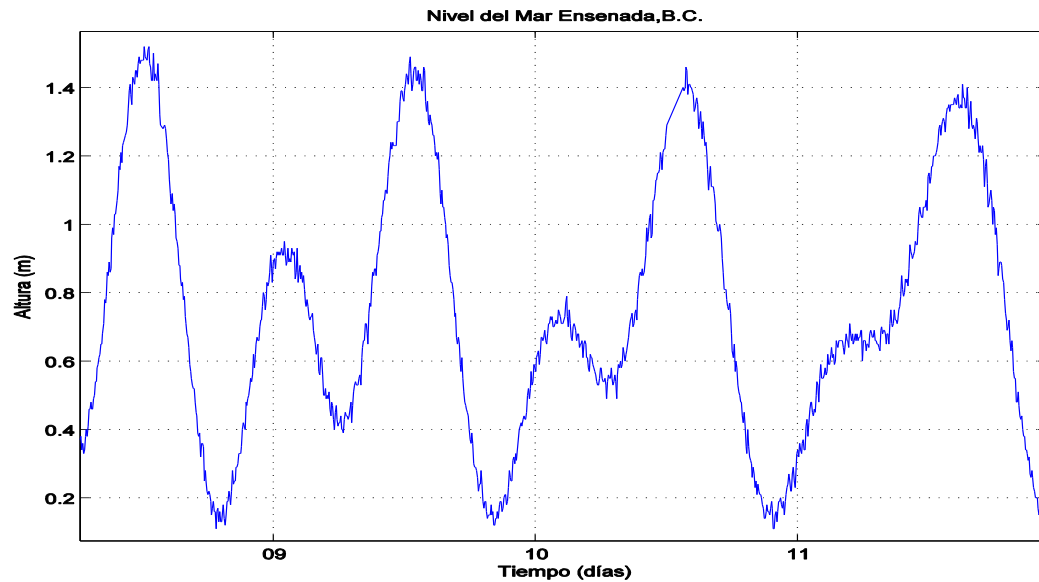


Figura 13. Marea en el Puerto de Ensenada, (Red mareográfica CICESE, Enero 2011).

### I.2.6 Viento

La dirección del viento es muy cambiante pero predomina el viento del sur. La velocidad del viento en condiciones normales varía entre 5 y 7 m/s según los datos recibidos de Svasek Hidraulics (World Wave Data). El viento logra formar dunas de hasta 6 metros de altura en la zona.

### I.2.7 Granulometría

Entre el puerto y los ríos presentes en la zona, no existen zonas rocosas, solamente existe, según la escala de Wentworth, material arenoso de tamaño fino y medio (0.19mm. -0.45mm.) en una franja promedio de 60 metros. La densidad del sedimento es de  $2.36 \text{ gr/cm}^3$  (Montoya, 1994).

## **II. Metodología**

Se propone un sistema de compuertas para contener el agua en una poza al interior del puerto una vez que la marea haya alcanzado su nivel máximo. El agua en la poza se contiene durante seis horas, lapso de tiempo en el que la marea alcanza el nivel mínimo, para ser liberada súbitamente induciendo un refluo capaz de transportar hacia el exterior del puerto toda la arena que haya sido acumulada durante un mes. Se espera que parte de la arena expulsada del puerto regrese al canal principal por la acción del oleaje, sin embargo, una parte sustancial de esta arena sería transportada por el oleaje y las corrientes litorales hacia la playa oeste, mitigando a su vez la erosión de esta playa. El continuo accionar de este mecanismo, mes con mes o cuando se estime necesario, mitigaría al menos los altos costos de dragado.

La metodología para analizar la posibilidad de mantener los canales al interior del puerto libres de azolvamiento imprimiendo una asimetría en el refluo de marea, consiste en acoplar un modelo hidrodinámico del puerto, con un modelo de transporte de sedimento. Las variables para acoplar ambos modelos son las velocidades del refluo, resultantes del modelo hidrodinámico, a cada paso de tiempo. Con estas velocidades se calcula el flujo de sedimento mediante el modelo de transporte de sedimento, que a su vez calcula la nueva batimetría. La nueva batimetría se introduce en el modelo hidrodinámico para volver a calcular las velocidades en el siguiente paso de tiempo.

### ***II.1 Modelo Hidrodinámico***

El modelo hidrodinámico de Goto et al. (1997), consiste en la integración en diferencias finitas de las ecuaciones de conservación de masa y de las ecuaciones de momento para ondas largas en aguas poco profundas.

La teoría de ondas largas es una teoría aproximada aplicable a un flujo en profundidades relativamente pequeñas. La relación entre la profundidad ( $h$ ) y la

longitud de onda ( $\lambda$ ), es tal que  $h/\lambda \ll 1$ . En este modelo la aceleración vertical de las partículas es insignificante comparada con la aceleración de la gravedad, y la curvatura de las trayectorias de las partículas de agua es pequeña. En consecuencia, el movimiento vertical de las partículas no tiene efecto en la distribución de la presión. En este caso, la aproximación hidrostática es suficiente, es decir, se considera que la presión solo varía con la profundidad. Asimismo, se considera que la velocidad horizontal de las partículas es verticalmente uniforme, lo que permite a su vez trabajar con las ecuaciones integradas en la vertical. Al representar el campo horizontal de velocidad en un plano cartesiano ( $x, y$ ) se tiene:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{U^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{UV}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} U \sqrt{U^2 + V^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{UV}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{V^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gm^2}{D^{7/3}} V \sqrt{U^2 + V^2} = 0. \quad (3)$$

En estas ecuaciones  $t$  es el tiempo,  $\eta$  representa el desplazamiento vertical de la superficie del agua respecto al nivel de equilibrio,  $g$  es la aceleración gravitacional,  $h$  la profundidad media de la columna de agua.  $D = (\eta + h)$  representa la profundidad instantánea de la columna de agua,  $U$  y  $V$  son las velocidades  $u$  y  $v$  del flujo de agua en las direcciones a lo largo ( $x$ ) y ancho ( $y$ ) del puerto, integradas verticalmente. En las ecuaciones de movimiento (2 y 3), la fuerza de fricción en el fondo se controla con el parámetro de rugosidad de Manning ( $m$ ). El parámetro de Manning es de uso común en la hidrodinámica de canales abiertos, y sus dimensiones son  $\frac{1}{\sqrt{g}}$  (Chow, 1959).

La condición inicial para forzar al refluo en el modelo hidrodinámico consiste en considerar que un área de almacenamiento al interior del puerto ha sido llenada

por la marea en su nivel máximo de agua, para liberarla súbitamente en la bajamar. La batimetría inicial es la que se muestra en la Figura 5, suponiendo un volumen de arena en exceso, de 125,000 metros cúbicos, que corresponde a la acumulación promedio de arena durante un mes.

## ***II.2 Modelo de Transporte de Sedimento***

El principal objetivo es estimar la capacidad de transporte de sedimento de fondo, consistente en arenas no consolidadas con diámetro de grano de 0.19 mm a 0.93 mm. El modelo de transporte de sedimento considera el mecanismo de tracción (esfuerzo superficial) que ejerce el reflujó de agua sobre el sedimento, sin considerar la fuerza de cohesión molecular entre los granos de sedimento. El transporte de sedimento fino, limos y arcillas, no se considerará en este estudio. Cuando el sedimento fino se deposita, la fuerza de cohesión molecular entre los granos de sedimento no permite que se desprenda del fondo o que se desplace por tracción con la relativa facilidad con la que se desplazan los granos de arena.

Para estimar el transporte de sedimento por tracción se emplea el modelo de Sternberg (1972), que a su vez está basado en la teoría de Bagnold (1963):

$$(\rho_s - \rho)gq = K\rho u_*^3 \quad (4)$$

donde  $q$  es el flujo de sedimento por unidad de longitud transversal al flujo ( $m^3 / \text{seg} / m$ );  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\rho_s$  es la densidad del sedimento,  $u_*$  es la velocidad friccional (una medida de la fuerza de arrastre) y  $K$  es el factor de proporcionalidad que expresa la habilidad del fluido para transportar sedimento.

La definición de la velocidad friccional está basada en la Ley del esfuerzo cuadrático de la velocidad:

$$\tau_o = c\rho u_z^2 \quad (5)$$

Donde  $\tau_o$  es la fuerza por unidad de área que el fluido ejerce sobre el fondo,  $c$  es una constante adimensional de proporcionalidad, y  $u_z$  es la velocidad promedio del flujo de agua a una distancia  $z$  sobre el fondo.

Sternberg (1968) determinó la constante de proporcionalidad de (5) mediante una serie de experimentos en 6 canales de marea en donde la velocidad promedio se midió a 100 cm del fondo. A esta constante adimensional de proporcionalidad se le conoce como coeficiente de arrastre  $c_{100}$ . Para fondos arenosos naturalmente clasificados  $c_{100} = 3 \times 10^{-3}$ ; de esta manera el esfuerzo de fondo adquiere la forma:

$$\tau_o = 3 \times 10^{-3} \rho u_{100}^2 \quad (6)$$

El hecho de considerar que la densidad del fluido no cambia significativamente durante el flujo de agua permite despejar (6) para facilitar su uso:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} = 5.47 \times 10^{-2} u_{100} \quad (7)$$

El factor de proporcionalidad  $K$  relaciona el transporte de sedimento con el trabajo que el fluido ejerce sobre el fondo y su valor depende del tamaño de grano del sedimento y del esfuerzo relativo (la diferencia relativa entre el esfuerzo del fluido sobre el fondo y el esfuerzo crítico necesario para mantener en movimiento los granos de sedimento):

$$\log K = \frac{3.301}{C(\phi)} \cdot \frac{\tau_o - \tau_c}{\tau_c} - 2.301, \quad (8)$$

donde  $(\tau_o - \tau_c)/\tau_c$  es el esfuerzo relativo, y el parámetro  $C(\phi)$  se mantiene constante para cada tamaño de grano. Los valores de  $C(\phi)$  se indican en la Tabla II.

**Tabla II. Valores del parámetro  $C(\phi)$  en función del diámetro del grano, (Sternberg,1972).**

$C(\phi)$	Diámetro (mm)	Diámetro (unidades $\phi$ )
11	0.19	2.39
10.7	0.28	1.83
4.45	0.45	1.15
1.5	0.93	0.1

Las unidades  $\phi$  se obtienen a partir del diámetro del sedimento en mm, mediante la siguiente expresión:

$$-\log_2 \mathbf{d} = \phi$$

donde  $\mathbf{d}$  es el diámetro del sedimento en mm. De esta forma, en la escala granulométrica de Wentworth, los límites de clase son números enteros y los intervalos de clase iguales.

El factor de proporcionalidad  $K$  fue determinado por Sternberg (1972), ajustando una función logarítmica a los datos experimentales. Los valores de  $K$  propuestos por Sternberg se muestran en la Figura 14 para tamaños de grano de 0.19 mm, 0.28 mm, 0.45 mm y 0.93 mm.

Es importante notar que para un valor fijo del esfuerzo relativo, el factor de proporcionalidad  $K$  aumenta conforme aumenta el tamaño de grano.

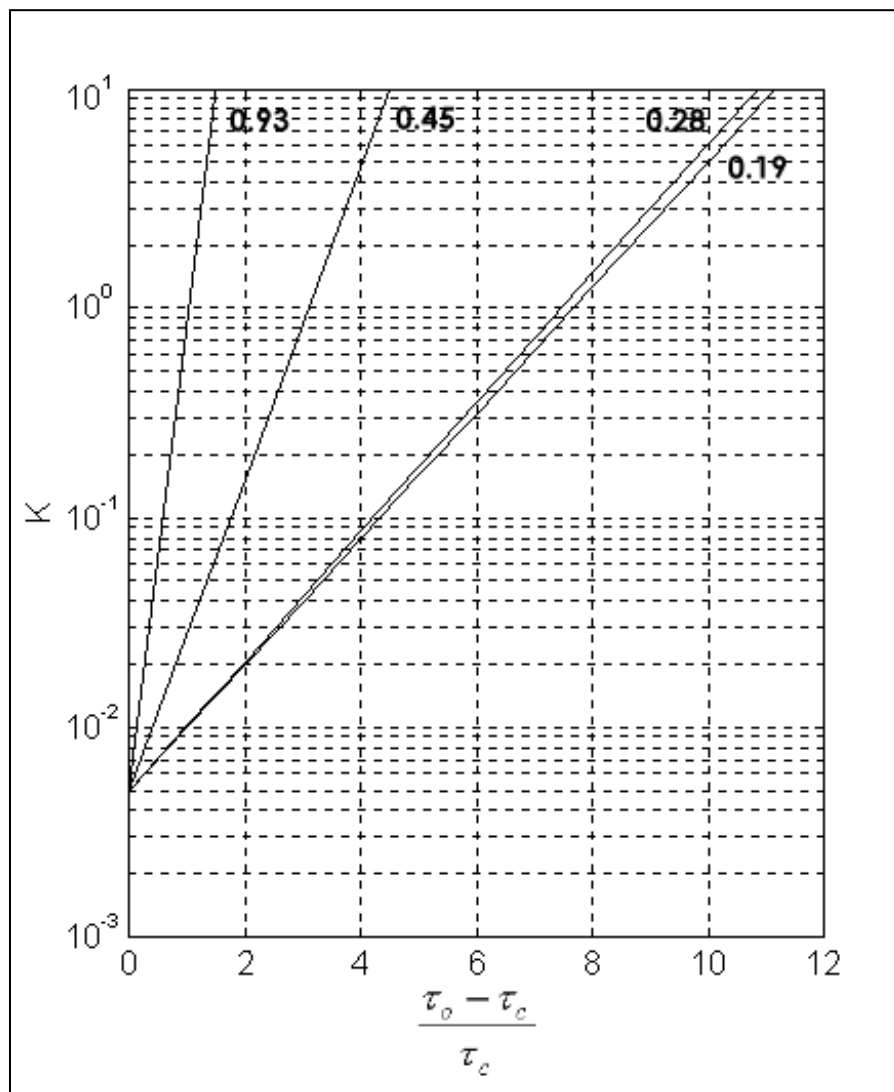


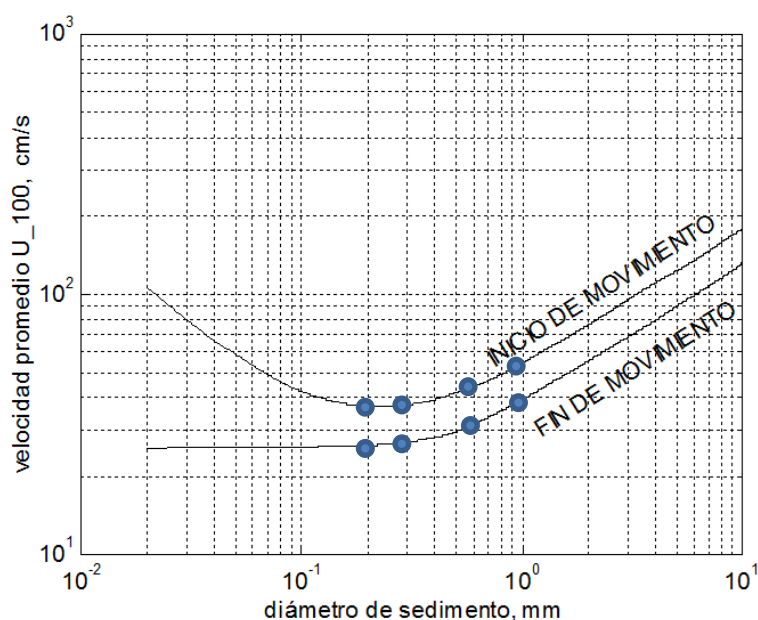
Figura 14. Factor de proporcionalidad  $K$  en función del esfuerzo relativo. (Sternberg, 1972)

Aun cuando Sternberg (1972) no explica explícitamente el comportamiento de  $K$  con relación al tamaño de grano, el hecho de que se hayan obtenido experimentalmente los valores de  $K$  para tamaños de grano consecutivos significa que un cierto flujo de agua es más eficiente para transportar granos gruesos de sedimento, posiblemente porque éstos exponen mayor área de contacto con el fluido. El esfuerzo crítico  $\tau_c$  se determina con la ecuación (6) considerando el



umbral de velocidad necesario para mantener en movimiento los granos de sedimento.

En la Figura 15 se muestran los umbrales de velocidad determinados por Sternberg (1967, 1971), en función del diámetro del grano. Para tamaños de grano de 0.19mm, 0.28 mm, 0.48mm y 0.93 mm, el umbral de velocidad para iniciar el movimiento es respectivamente, 37.2 cm/s, 37.35 cm/s, 40.48 cm/s y 52.52 cm/s.



**Figura 15. Umbral de velocidad en función del diámetro del grano determinados por Sternberg (1967, 1971).**

El modelo hidrodinámico se calibró con observaciones de velocidad del flujo de agua tomadas a un metro del fondo en el canal principal del Estero de Punta Banda (Ortiz et al., 2003). La calibración consistió en hacer variar el parámetro de rugosidad de Manning para disminuir la magnitud de la velocidad hasta que ésta coincidiera con las observaciones. Se eligió el valor de  $m = 0.025$ , que corresponde a su vez al parámetro de Manning para fondos arenosos naturalmente clasificados. Los valores del parámetro de Manning varían de 0.013 para canales de concreto, hasta 0.05 para canales con fondos rocosos. La elección de la velocidad a un metro del fondo para calibrar el modelo

hidrodinámico se debe a que en el modelo de transporte de sedimento de Sternberg (1972), la fuerza de arrastre que el agua ejerce sobre el fondo se calcula con la velocidad a un metro del fondo.

En resumen, una vez seleccionados el tamaño de grano y su densidad, los pasos para estimar el transporte de sedimento son los siguientes:

- Empleando la ecuación (6) con la magnitud de la velocidad resultante del modelo hidrodinámico se calcula el esfuerzo  $\tau_o$ .
- Empleando la ecuación (6) y la magnitud de la velocidad en la cual el sedimento deja de moverse, obtenida de la curva inferior del umbral de movimiento (Figura 15), se calcula el esfuerzo crítico  $\tau_c$ .
- Empleando la ecuación (8) se calcula el valor de  $K$  en función del esfuerzo relativo y del diámetro de grano.
- El valor de la velocidad friccional  $u_*$  se calcula con la ecuación (7).
- De la ecuación (4) se obtiene el valor de  $q$  que representa el flujo sedimento por unidad de longitud transversal al flujo ( $m^3 / \text{seg} / m$ ).
- El tamaño de grano y su densidad se mantuvieron constantes e iguales a 0.19 mm, con una densidad de  $2.36 \text{ gr/cm}^3$ .

### ***II.3 Acoplamiento del modelo hidrodinámico con el modelo de transporte de sedimento***

La ecuación para acoplar ambos modelos es la ecuación de conservación de masa del sedimento (Horikawa, 1988):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Donde  $h$  es la profundidad media de la columna de agua,  $t$  es el tiempo,  $q_x$  y  $q_y$  son las componentes del flujo de sedimento  $q$  calculado con la ecuación (4). Note que  $q$  tiene unidades de “Volumen/tiempo/Longitud perpendicular al flujo”, es decir, m<sup>2</sup>/seg.

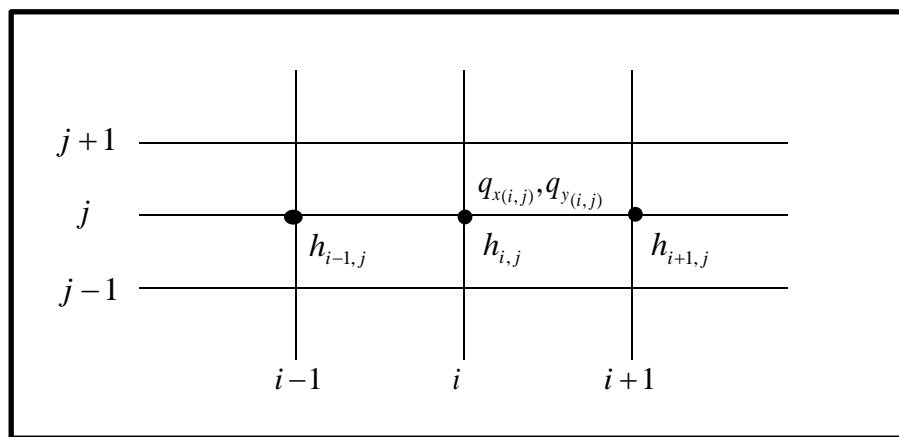
En la ecuación (9) se puede observar que la variación temporal de la profundidad depende de la divergencia del flujo de sedimento. Si la divergencia es positiva, la profundidad ( $h$ ) aumenta debido a que el sedimento fluye hacia los lados de la celda en donde se calcula  $h$ . En contraste, si la divergencia es negativa, la profundidad disminuye debido a que el sedimento se acumula en la celda en donde se calcula  $h$ . La ecuación (9) se integra en diferencias finitas hacia atrás cuando el flujo de agua es positivo, y en diferencias finitas hacia adelante cuando el flujo de agua es negativo. A manera de ejemplo, se muestra la aproximación de la ecuación (9) en diferencias finitas hacia atrás en ambas direcciones ( $x$ ,  $y$ ) en el esquema que se muestra en la Figura 16. Este esquema de diferencias finitas es necesario para lograr la estabilidad numérica de la ecuación (9).

$$\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{i,j}^k = \left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right)_{i,j}^k + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)_{i,j}^k. \quad (10)$$

$$\frac{1}{\Delta t} [h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k] = \frac{1}{\Delta x} [q_{x,i,j}^k - q_{x,i-1,j}^k] + \frac{1}{\Delta y} [q_{y,i,j}^k - q_{y,i,j-1}^k]. \quad (11)$$

$$h_{i,j}^{k+1} = h_{i,j}^k + \frac{\Delta t}{\Delta x} [q_{x,i,j}^k - q_{x,i-1,j}^k] + \frac{\Delta t}{\Delta y} [q_{y,i,j}^k - q_{y,i,j-1}^k]. \quad (12)$$

En las ecuaciones (10-12), el índice  $k$  corresponde a los pasos en tiempo y los índices  $(i, j)$  corresponden a los nodos espaciales  $(x, y)$ . La ecuación (10) indica que todas las derivadas se evalúan en un mismo nodo espacio-tiempo. La ecuación (11) es la expresión en diferencias finitas de la ecuación (10). En la ecuación (12) se calcula la profundidad  $h$  para el siguiente paso de tiempo  $(k+1)$  en el nodo  $(i, j)$ .



**Figura 16. Esquema de diferencias finitas para integrar la ecuación (9)**

En esta tesis se desarrolló el módulo del programa para calcular el transporte de sedimento, que incluye las ecuaciones de Sternberg (4-8), así como la integración en diferencias finitas de la ecuación de conservación de masa de sedimento (10). El diagrama de flujo de la metodología se muestra en la Figura 17.

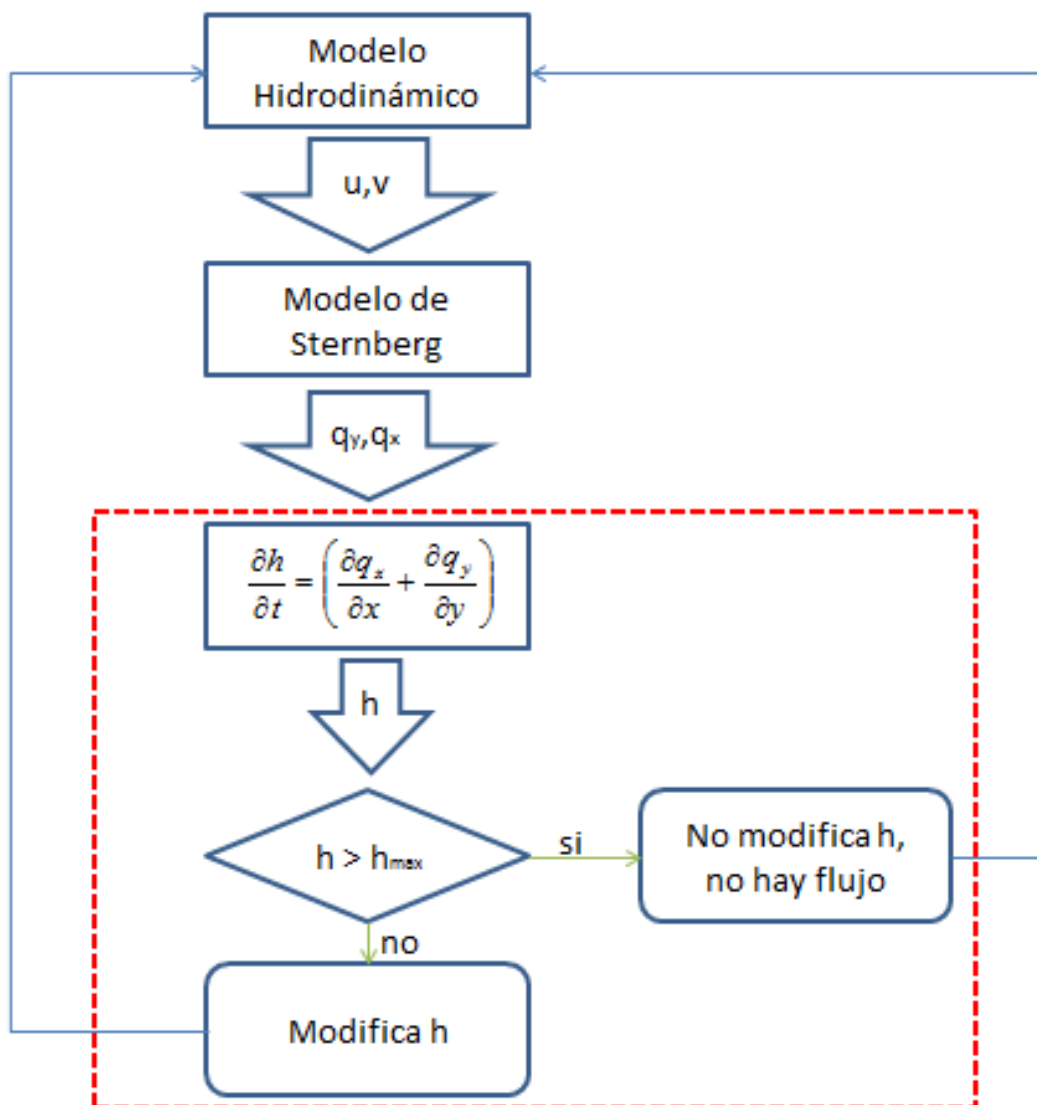


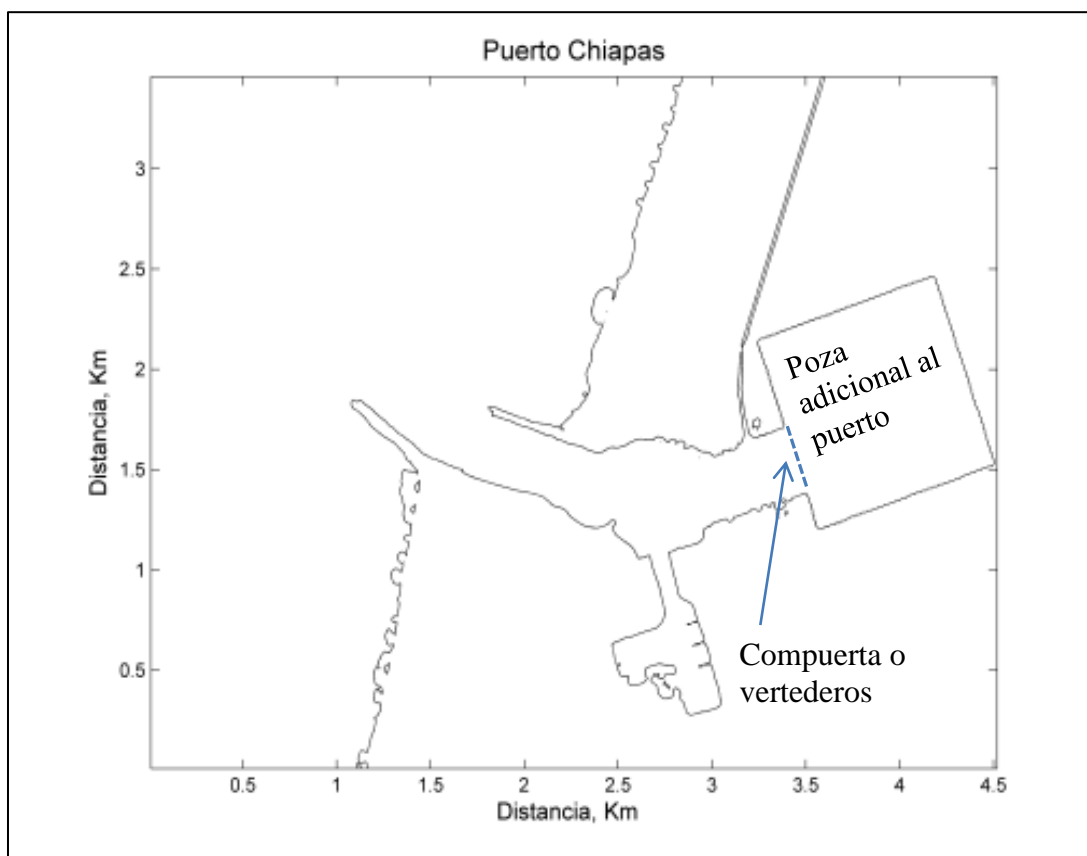
Figura 17. Diagrama de flujo de la metodología empleada en esta Tesis para calcular el transporte de sedimento en Puerto Chiapas.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todos los experimentos realizados giran en torno al mismo objetivo, que es lograr arrastrar el sedimento del canal principal hacia el exterior del puerto Chiapas, induciendo el refluo de marea mediante la instalación de una compuerta artificial. Dónde ubicarla, su tamaño, qué modificaciones serían necesarias en la configuración del puerto, son algunas de las preguntas que trataremos de deducir en esta sección.

En dos experimentos numéricos se colocaron compuertas en la entrada del canal principal del puerto Chiapas, entre los espigones principales, variando su ancho de 200 a 300 metros. En ambos experimentos se obtuvieron resultados satisfactorios, el refluo inducido por la marea arrojó al exterior del puerto la arena acumulada durante un mes en el canal principal. Sin embargo, aun cuando existe ingeniería para construir compuertas abatibles hacia el fondo, la ubicación de una compuerta en el canal de acceso al puerto no deja de ser un obstáculo para la navegación. Por este motivo nos limitaremos a mostrar únicamente los resultados de un tercer experimento en donde se ha excavado una poza “numéricamente” al final del canal principal del puerto, como se indica en la Figura 18.

La función de la poza es aumentar artificialmente el prisma de marea y tiene dimensiones de 1 km x 1 km x 2 metros de profundidad. En este experimento se coloca una compuerta de 300 metros de longitud a la entrada de la poza. En la realidad, la compuerta podría consistir en una serie de vertederos de menor longitud. La poza adicional se ubica en terrenos propios del puerto (comunicación personal, IMT).



**Figura 18. Se ilustra la ubicación de la poza adicional al puerto.**

Como se mencionó en la sección II.1, la condición inicial para forzar al modelo hidrodinámico consiste en atrapar el agua al interior del puerto, en este caso al interior de la poza adicional, mediante una compuerta o vertederos cuando la marea alcanza su nivel máximo, para liberar el agua súbitamente en la bajamar. Esta condición inicial se ilustra de manera simplificada en una dimensión en la Figura 19. La diferencia promedio entre la pleamar y la bajamar es de 1.47 m en Puerto Chiapas.

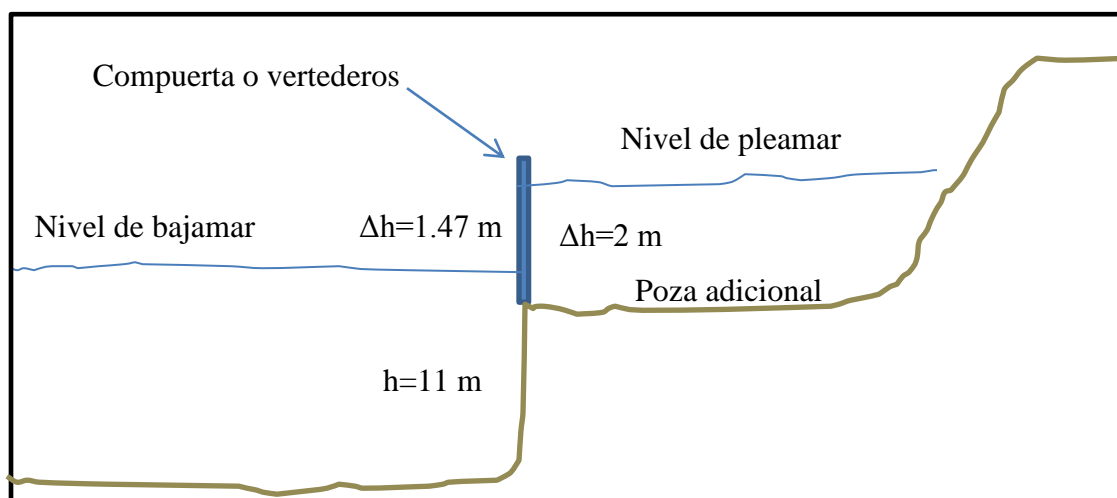


Figura 19. Esquema longitudinal del puerto para ilustrar la condición inicial del modelo hidrodinámico para forzar el refluo por marea en el puerto.

Los resultados del tercer experimento son satisfactorios para expulsar la arena del canal principal hasta las afueras del puerto en un lapso de tiempo de 20 minutos. Las velocidades del refluo en el canal principal (Figura 20), sobrepasan satisfactoriamente el umbral de velocidad (0.37 m/s), necesario para arrastrar al sedimento, alcanzando hasta 1.8 m/s.

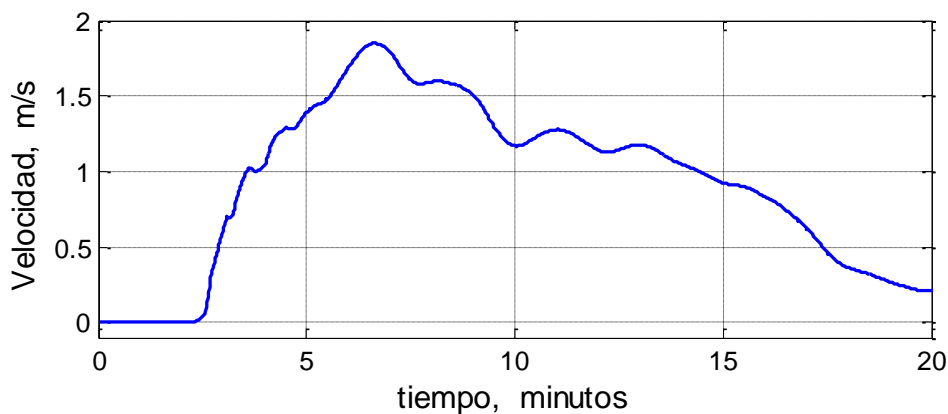
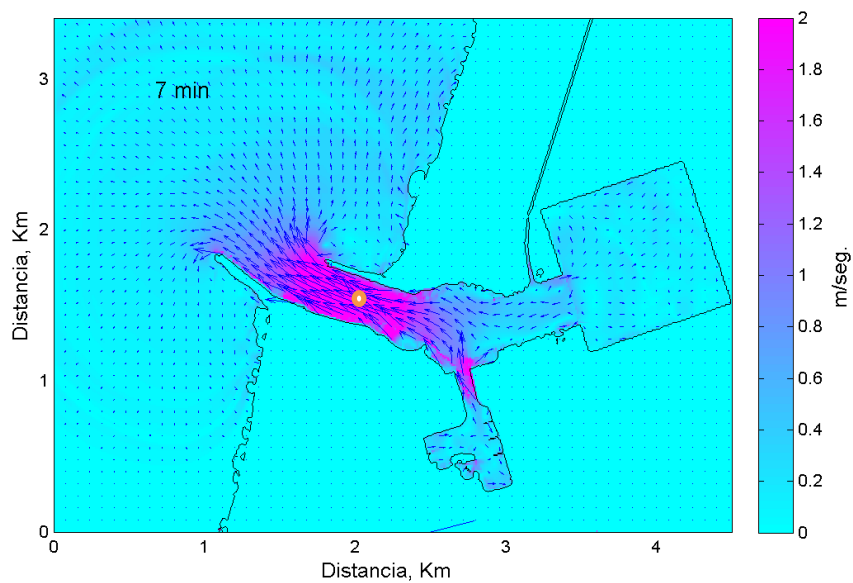


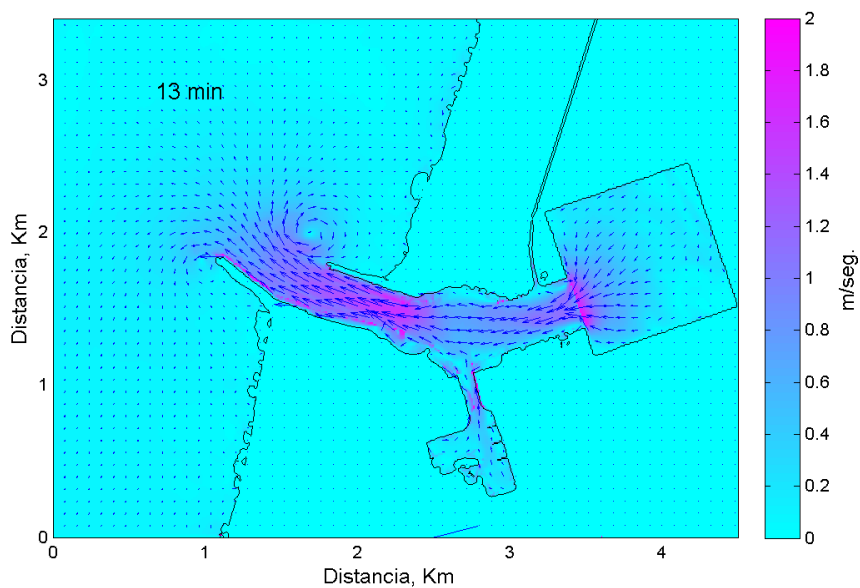
Figura 20. Velocidad del refluo en el km 2 del eje horizontal de la Figura 21, al centro del canal principal.

En las Figuras 21 y 22 se muestra el campo instantáneo de velocidad a los 7 y 13 minutos respectivamente, después de liberar el agua de la poza.



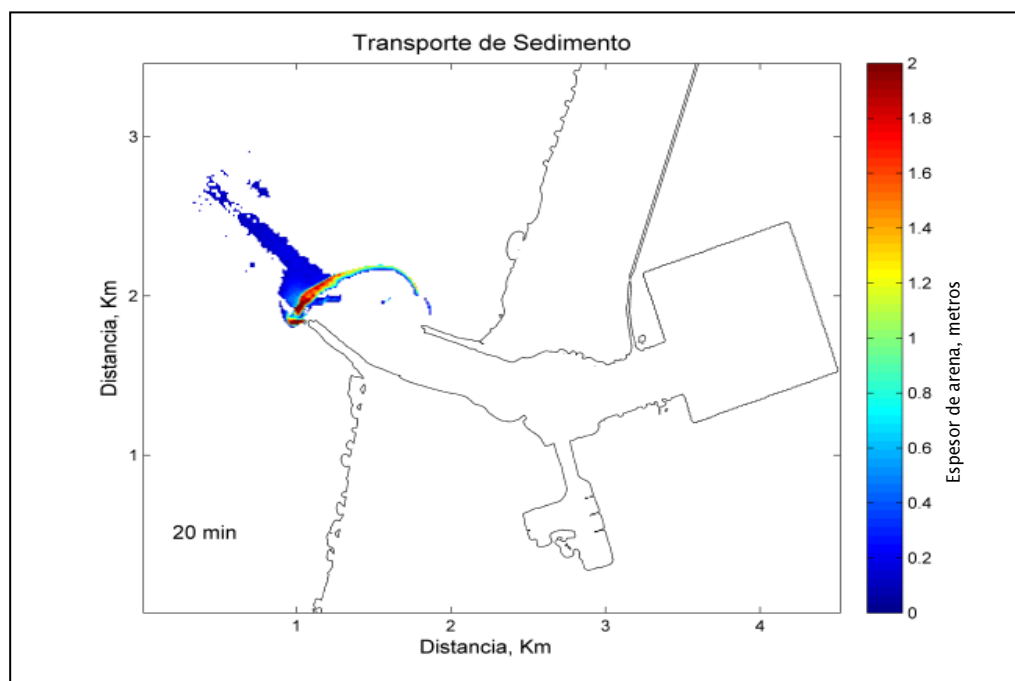


**Figura 21. Campo de velocidad a los 7 minutos después de liberar el agua de la poza.**



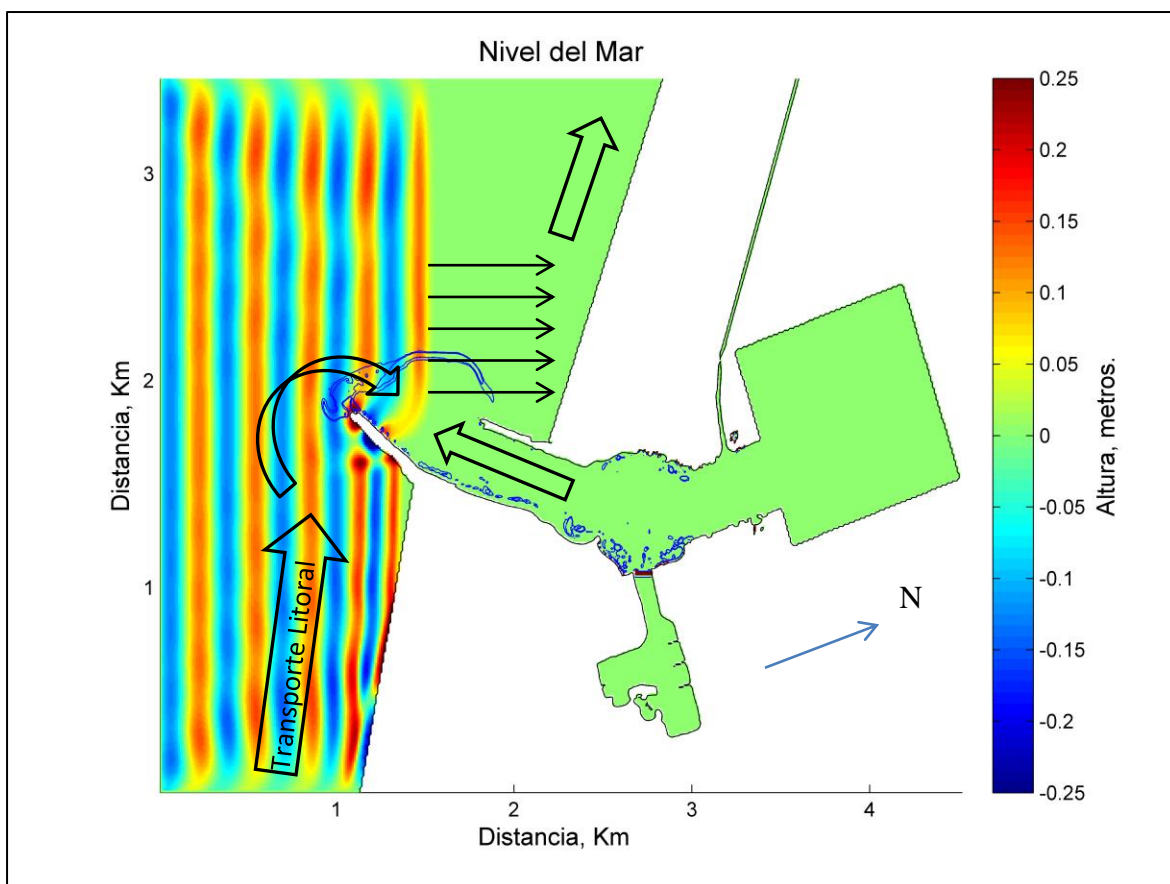
**Figura 22. Campo de velocidad a los 13 minutos después de liberar el agua de la poza.**

En la Figura 23 se muestra la localización y el espesor de la arena expulsada del puerto al liberar súbitamente el agua de la poza.



**Figura 23.** Ubicación y espesor del sedimento transportado por el refluo de marea inducido al liberar súbitamente el agua contenida en la poza al interior del puerto. La ubicación del sedimento antes de ser transportado es la que se muestra en la Figura 5.

Una vez que la arena ha sido expulsada del puerto por el refluo inducido por la poza, se espera que parte de ésta regrese al canal principal del puerto por la acción del oleaje, sin embargo, una parte sustancial de esta arena sería transportada por el oleaje y las corrientes litorales hacia la playa oeste, mitigando a su vez la erosión de esta playa. El continuo accionar de este mecanismo, mes con mes o cuando se estime necesario, mitigaría al menos los altos costos de dragado. Este modelo conceptual del flujo de sedimento por la acción del oleaje y del refluo inducido por la poza se ilustra en la Figura 24.



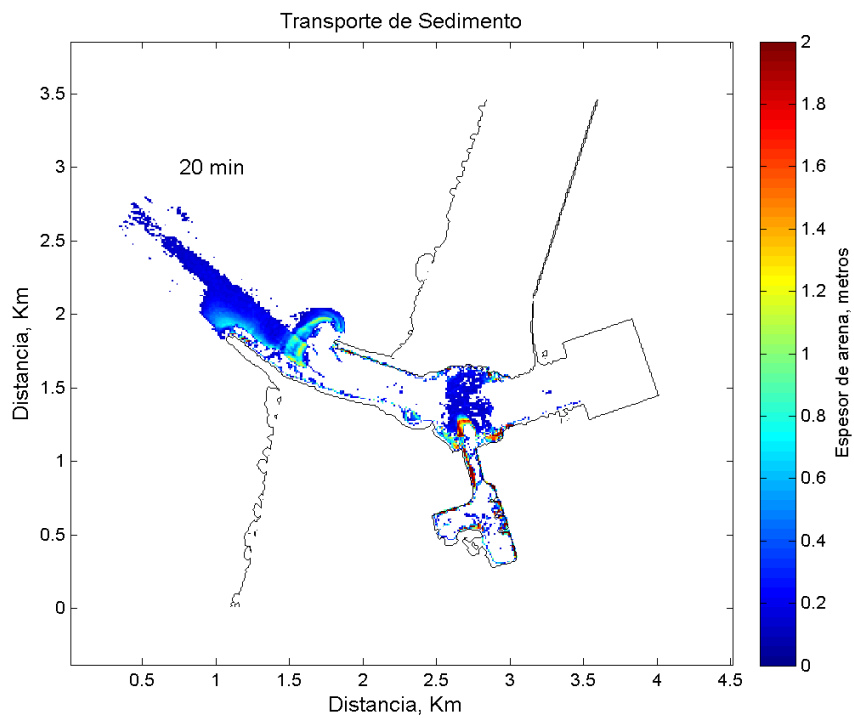
**Figura 24. Modelo conceptual de transporte de sedimento por acción del oleaje y del reflujos inducidos por la poza adicional al puerto. Los contornos indican la ubicación del sedimento expulsado del puerto por acción del reflujos inducidos.**

El tren de olas que se presenta en la Figura 24 proviene del suroeste ( $204^\circ$ ), que corresponde a la dirección predominante del oleaje en Puerto Chiapas. En este modelo se puede observar cómo el frente de las olas se aproxima oblicuamente a la costa, motivo por el que el transporte litoral es predominante hacia el noroeste. También se puede observar cómo una parte del frente de las olas entra al puerto difractándose en la escollera y disminuyendo su amplitud, y la otra parte se propaga directamente hacia la costa. La ola refractada es la que induce el transporte de sedimento al interior del puerto, mientras que la ola que se propaga

hacia la costa induce tanto el transporte de sedimento hacia la playa como el transporte litoral.

El tren de olas se propagó con el modelo hidrodinámico de Goto et al., (1997), el mismo que se empleó para calcular el transporte de sedimento en esta Tesis, que aunque es un modelo barotrópico, ofrece una buena representación de la propagación de las olas en aguas con profundidades menores a 12 metros. Sin embargo, el transporte de sedimento por acción del oleaje no se contempló en esta Tesis. Los modelos para calcular el transporte de sedimento por acción del oleaje contemplan otra dinámica, a saber, los gradientes del tensor de radiación del oleaje, y otras leyes de transporte de sedimento. Este tema queda abierto para un futuro trabajo de investigación.

En una serie de experimentos se hicieron variar las dimensiones de la poza sin variar la profundidad de la misma, hasta lograr que el refluo inducido expulsara satisfactoriamente al sedimento hasta las afueras del puerto, como se ilustró en la Figura 23. El hecho de haber mantenido constante la profundidad se debe a que no se pretendía excavar “numéricamente” a un nivel mucho mayor que el de la bajamar media inferior. La poza contendría el agua entre el nivel de pleamar y el nivel de bajamar. En la realidad, a mayor profundidad de excavación, mayor el costo en mantener los taludes en equilibrio (comunicación personal, IMT). A manera ilustrativa se muestran en la Figura 25 los resultados de uno de estos experimentos con una poza de dimensiones 500 m x 500 m x 2 metros de profundidad, en donde el refluo inducido no alcanza a expulsar satisfactoriamente la arena del puerto.



**Figura 25.** Ubicación y espesor del sedimento transportado por el refluo de marea inducido al liberar súbitamente el agua contenida en la poza al interior del puerto. La ubicación del sedimento antes de ser transportado es la que se muestra en la Figura 5.

## **IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

1. Con la configuración actual de Puerto Chiapas (2011), después de todas sus modificaciones, se ha logrado minimizar en parte el azolvamiento en el canal principal del puerto. Las actividades de dragado sin embargo, significan todavía un gran porcentaje de los costos de mantenimiento del Puerto.
2. La poza adicional (1 km x 1 km x 2m), con una compuerta a la entrada de la misma, es la solución más viable para inducir el autodragado del puerto y reducir los costos de mantenimiento por dragado mecánico.
3. Además del modelo conceptual del autodragado, es necesario utilizar un modelo numérico que reproduzca adecuadamente el transporte litoral, debido al viento y al oleaje, antes de recomendar la construcción de la poza adicional al puerto.

## V. LITERATURA CITADA

- Bagnold, R. A. 1963. Mechanics of marine sedimentation. In M. N. Hill, ed., The Sea, Vol. 3, The Earth Beneath the Sea. New York: Wiley-Interscience, pp. 507-582.
- Bustamante F. 2007. Analysis of the Erosion/Accretion Process in Puerto Chiapas, México MSc Thesis WSE-HECEPD-06.08. Tesis de Maestría
- Chow, V.T. 1959. Open channel hydraulics. McGraw Hill, New York. 5: 95-97
- González J. I, A. Morales, y J.L. Ochoa, 2010. Predicción de mareas en México, <http://oceanografía.cicese.mx/predmar/>
- Goto C., Ogawa Y., Shuto N., And F. Imamura 1997. IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides # 35, Paris, 4 Parts. 1: 1-9
- Horikawa, K. 1988. Nearshore Dynamics and Coastal Processes. University of Tokyo Press, Japan.
- Montoya J. et al. 1994. Protection against Shore Erosion and Channel Shoaling at Port Madero, México. Proceedings of the International Conference in Hydro-Technical Engineering for Port and Harbor Construction HIDRO-PORT 94.
- Ortiz Modesto, L. Huerta-Tamayo y A. Hinojosa. 2003. Transporte de sedimento por tracción de marea en el Estero de Punta Banda, Baja California, México. *GEOS*, 23(3): 283-294.
- Sternberg, R. W., 1967. Measurements of sediment movement and ripple migration in a shallow marine environment. *Marine Geol.* 5: 195-205.
- Sternberg, R. W., 1968. Friction factors in tidal channels with differing bed roughness. *Marine Geol.* 6: 243-260.
- Sternberg, R. W., 1971. Measurements of incipient motion of sediment particles in the marine environment. *Marine Geol.* 10: 113-119.

Sternberg W., 1972. Predicting Initial Motion and Bedload Transport of Sediment Particles in the Shallow Marine Environment. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc. Shelf Sediment TRANSPORT: Process and Pattern, 3, pp. 61-82.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2001. Estudio de Evaluación del Sistema Sand Bypassing para Puerto Madero, Chiapas, México.