

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



Modificaciones de la dinámica costera debido a la ampliación del
puerto El Sauzal, Baja California, México.

T E S I S

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFIA COSTERA

PRESENTA

VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MEXICO. DICIEMBRE DE 2010

RESUMEN

En el presente trabajo se utilizó el modelo numérico REF/DIF 1 para simular la propagación espacio-temporal del campo de oleaje en la zona costera de El Sauzal antes y después de la ampliación del puerto; y el posible impacto sobre la costa debido al desarrollo del puerto considerando las modificaciones del oleaje, la litología de los cantiles y la ausencia o presencia de muros.

Se realizaron 14 corridas del modelo, 7 fueron considerando las condiciones actuales del puerto y 7 considerando las estructuras de ampliación, en ambos casos se hicieron para cada estación del año. Para obtener información sobre la litología de los cantiles se hizo un recorrido por la zona de estudio levantando columnas estratigráficas, además se posicionaron geográficamente los muros existentes en la zona.

Las estructuras de ampliación del puerto modifican el campo de oleaje principalmente en la región Sur aledaña al puerto, debido a la dirección de aproximación de las olas (NW) y la difracción de las mismas al tocar las estructuras. Sin embargo también se presentan modificaciones del oleaje en la zona Norte al puerto ya que la dirección de arribo es del SW. Estas modificaciones se traducen en incrementos de la altura de ola que oscilan entre 0.5 y 1 m en ambos casos.

La zona costera más afectada por la ampliación del puerto es la curva anterior al hotel Las Rosas. Sin embargo, los cantiles que se encuentran en la zona frente a la refinería de Pemex y el CET del Mar también se verán afectados.

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFIA COSTERA

Modificaciones de la dinámica costera debido a la ampliación del
puerto El Sauzal, Baja California, México.

T E S I S

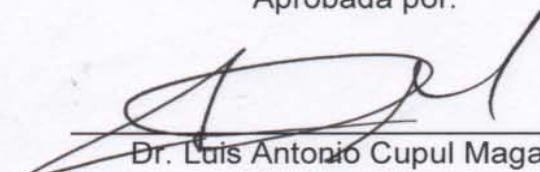
QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS
PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

VIOLETA ZETZANGARI FERNÁNDEZ DÍAZ

Aprobada por:



Dr. Luis Antonio Cupul Magaña
Director de tesis



Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete
Sinodal



Dr. Rafael Hernández Walls
Sinodal

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT por la beca proporcionada para mis estudios posgrado.

A la Secretaría de Marina por los datos que me proporcionaron.

A mi comité de tesis por dirigir mi trabajo.

Al Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete por apoyarme y por su amistad.

A Evaristo Rojas por todo el tiempo que me dedicó y su paciencia. Muchas gracias por ayudarme a sacar mis resultados, fuiste como mi sinodal.

A todos los que de una u otra forma me ayudaron durante este camino o me proporcionaron datos para este trabajo.

A mis Padres, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Muchas gracias por todo lo que me han dado. Los amo.

A mis compañeros de maestría, Denise, Patineta, Natalie, Moni, Nelva, por brindarme su apoyo incondicional y toodos los buenos momentos que hemos vivido. A mis amigos por todo el apoyo y los buenos momentos.

Denise no te puse hoja pero mínimo una fotito. Gracias por todo.



A CGM por ser mi respaldo, por tu apoyo incondicional, por aguantarme y entenderme SIEMPRE, por tu paciencia y amor... Mil gracias por cada momento, pero sobre todo por estar aquí una vez más. Love u

ÍNDICE

Resumen.....	II
Agradecimientos.....	IV
Índice.....	V
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tablas.....	XI
Introducción.....	1
Antecedentes.....	9
Área de estudio.....	17
Objetivos.....	21
Metodología.....	22
Resultados.....	30
Discusión.....	50
Conclusiones.....	73
Bibliografía.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo del Plan de Crecimiento para el puerto El Sauzal fase 1.....	6
Figura 2. Fase 2. Desarrollo completo del Plan de Crecimiento para el puerto El Sauzal.....	7
Figura 3. Bahía de Todos Santos, Baja California (Modificada de Google)....	19
Figura 4. Área de estudio, Sauzal de Rodríguez, BC. La línea roja indica la franja costera que se considera como zona de estudio en este trabajo (Modificada de Google).....	21
Figura 5. Batimetría correspondiente a la zona del Sauzal. La zona comprende desde el puerto El Sauzal hasta Punta Morro. La profundidad en metros se muestra con base en la escala de colores.....	23
Figura 6. Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 262.91°	32
Figura 7. Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 279.76°	32
Figura 8. Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera inferior e izquierda con un ángulo de 195.74°	33
Figura 9. Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 277.05°	34
Figura 10. Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera inferior e izquierda con un ángulo de 201.73°	34
Figura 11. Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 282.52°	35

- Figura 12.** Campo de oleaje antes (izquierda) y después de la ampliación del puerto (derecha). El oleaje incide por la frontera inferior e izquierda con un ángulo de 202.26° **36**
- Figura 13.** Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de invierno..... **37**
- Figura 14.** Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de verano tren 1(izquierda) y tren 2 (derecha)..... **38**
- Figura 15.** Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de primavera tren 1 (izquierda) y tren 2 (derecha)... **38**
- Figura 16.** Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de otoño tren 1 (izquierda) y tren 2 (derecha)..... **39**
- Figura 17.** Tipo de playa en la zona de estudio..... **40**
- Figura 18.** Muestra los cantiles y muros existentes en la franja costera desde la zona inmediata al puerto de El Sauzal hasta Punta Morro..... **41**
- Figura 19.** Muestra la columna estratigráfica 1 que corresponde a los cantiles localizados entre el puerto El Sauzal y los condominios El Sauzal. La columna estratigráfica 2 corresponde a los cantiles localizados entre los condominios El Sauzal y la refinería de Pemex..... **43**
- Figura 20.** Muestra la columna estratigráfica 3 que corresponde a los cantiles localizados entre la refinería de Pemex y la curva anterior al hotel Las Rosas. La columna estratigráfica 4 corresponde a los cantiles localizados entre el hotel Las Rosas y Punta Morro..... **43**
- Figura 21.** Diferentes tipos de muros localizados en la costa del Sauzal..... **44**
- Figura 22.** Principales problemas que presentan los muros de El Sauzal. Se observa erosión lateral (esquina superior izquierda), erosión en la base (esquina superior derecha), varillas oxidadas (esquina inferior izquierda) y drenaje inadecuado (esquina inferior derecha)..... **45**
- Figura 23.** Muestra las zonas donde se presentan incrementos de altura durante el invierno y las zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola en la punta del hotel Las Rosas..... **46**

- Figura 24.** Incrementos de altura durante el otoño tren 1 y zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola frente a Pemex y el CET del Mar..... **47**
- Figura 25.** Incrementos de altura para el tren 1 de primavera y zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola frente a Pemex y la franja costera entre la refinería y el CET del Mar.. **48**
- Figura 26.** Incrementos de altura para el tren 1 de verano y zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola frente a Pemex y la franja costera entre la refinería y el CET del Mar..... **49**
- Figura 27.** Malla de referencia usada por el REFDIF1. Modificada de Documentation and User's Manual (Kirby y Dalrymple, 1994)..... **52**
- Figura 28.** Alturas de ola en condiciones normales para las dos mallas usadas. La imagen de la izquierda corresponde a la malla fina y la de la derecha a la malla gruesa..... **53**
- Figura 29.** Alturas de ola en condiciones fase 2 para las dos mallas usadas. La imagen de la izquierda corresponde a la malla fina y la de la derecha a la malla gruesa..... **53**
- Figura 30.** Se muestra la difracción (rojo intenso) del oleaje al tocar el rompeolas usando la malla fina..... **54**
- Figura 31.** Tipos de playa en la zona de estudio. Se muestra la playa de Stacks (A) vista de Norte a Sur, playa rocosa entre el puerto y el hotel Las Rosas vista de Sur a Norte (B) y de Norte a Sur (C) y la zona donde comienza la playa de basamento en la curva anterior al hotel Las Rosas (D)..... **58**
- Figura 32.** Litología de los cantiles en la franja costera del Sauzal. Cada fotografía corresponde a las columnas estratigráficas descritas en los resultados, columna 1 (A) columna 2 (B) columna 3 (C) y columna 4 (D)..... **59**
- Figura 33.** Infraestructura construida sobre los cantiles marinos en la franja costera del Sauzal. Los polígonos azules delimitan las zonas desarrolladas. Como se puede observar la costa de El Sauzal está desarrollada casi en su totalidad..... **60**
- Figura 34.** Cantiles activos en la curva anterior al hotel Las Rosas (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010).... **63**

- Figura 35.** Punta donde se localiza el hotel Las Rosas. Esta zona corresponde al límite del área que resultaría afectada debido a las modificaciones del oleaje (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010)..... **63**
- Figura 36.** Franja costera frente a la refinería de Pemex. Se muestra que casi no hay muros de protección en esa área (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010)..... **65**
- Figura 37.** Franja costera entre la refinería de Pemex y el CET del Mar. Se muestra la presencia de un muro amplio (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010)..... **65**
- Figura 38.** Ejemplos de los principales problemas que presentan los muros del Sauzal..... **66**
- Figura 39.** Drenaje inadecuado en lo franja costera del Sauzal. Se muestran la forma en la que los habitantes se deshacen de los desechos líquidos y la humedad que esto genera en los cantiles..... **67**
- Figura 40.** Presencia de vegetación sobre los cantiles en diferentes zonas de la franja costera del Sauzal..... **68**

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Clima de la ola en aguas profundas para la región frente a El Sauzal (Tomados de Reyes-Cisneros, 2007). Donde H_0 corresponde a la altura significativa (metros), T_0 periodo significativo (segundos) y Θ_0 es el ángulo de aproximación del oleaje hacia la costa (grados azimutales)..... **27**

INTRODUCCIÓN

Las costas atraen a la población porque, en general, son puntos centrales para el desarrollo económico ya que cuentan con más de la mitad de la infraestructura para manufactura, transporte, procesamiento de energía, comercio, turismo y comunicaciones. En México, la población de los municipios litorales con respecto a la población nacional ha tenido notables incrementos. En el censo de 1950 era el 9.1%; en el censo de 1990, el 13.78% y en el censo del 2000, el 19.47%; o sea que si se conservan estas tasas de crecimiento, en los próximos 10 años el porcentaje de los municipios litorales con respecto al total nacional, sería del 27.51% (Bustamante en El Desarrollo Costero de México, 2002) y del 36% aproximadamente para el 2020.

El uso de las costas no es únicamente con fines habitacionales, en el ámbito comercial los ejemplos más evidentes de desarrollo costero son los puertos, que se utilizan para satisfacer necesidades económicas de las ciudades costeras.

Un puerto se define como una zona marítimo terrestre que está protegida de procesos físicos y oceanográficos, cuyo propósito es mantener un área de aguas tranquilas donde puedan arribar embarcaciones para realizar maniobras de carga y descarga de mercancías y productos, además de permitir el resguardo de dichas embarcaciones. De manera que un puerto debe ser capaz de proporcionar seguridad en las operaciones como una cantidad de

servicios combinados desde el arribo y desembarque hasta el zarpe del mismo (Rodríguez-Ortega en Los Nuevos Puertos Mexicanos, 1999).

Cuando se requiere planear el diseño y la construcción de un puerto, existen factores económicos y requisitos específicos que deben tomarse en cuenta, pero es de suma importancia considerar los factores oceanográficos para obtener un buen diseño ingenieril de las estructuras que lo abrigarán.

Dentro de los factores oceanográficos importantes a considerar está el oleaje. El oleaje es uno de los agentes principales con los que interactúa la línea de costa, de tal forma que cualquier modificación que se haga sobre ella debe realizarse con base en el conocimiento de éste (Coria, 1991).

Entre las diversas razones por las cuales es necesario el estudio del oleaje, la más importante es que es el principal agente de transporte de sedimento, la erosión y la depositación (Longuet-Higgins, 1970), por lo que se relaciona directamente con las actividades del hombre en la zona costera (De Dios-Sánchez, 2002), tales como el diseño de estructuras de abrigo para puertos o de protección para la costa (Gajá, 2004).

La funcionalidad de las estructuras que abrigan un puerto tales como rompeolas y espigones (Ross, 1988), no solo se basa en brindar protección al puerto sino también en el impacto que puedan tener sobre la franja costera.

Los rompeolas y espigones modifican el ángulo de aproximación con el cual incide de manera natural el oleaje, este ángulo está dado por la refracción que sufre al acercarse a la costa y por consiguiente provocan cambios sobre

ella al interferir y modificar el movimiento de agua y sedimento (Komar, 1970, Shore Protection Manual, 1975, Cruz-Falcón, 1983).

La refracción del oleaje es un fenómeno físico con el cual la celeridad y la altura de las olas cambian cuando éstas pasan de un medio a otro con profundidad diferente. En aguas someras, la celeridad de la ola cambia al variar la profundidad del medio donde se propaga, decrece al disminuir la profundidad y se incrementa cuando la profundidad aumenta. Si una ola incide con sus crestas oblicuas a las isóbatas, la variación de la celeridad a lo largo de sus crestas es diferente según la profundidad donde se encuentre la cresta de la ola. Por lo tanto, una cresta se moverá más rápidamente en aguas profundas y más lentas en aguas someras y esto modificará la orientación de la cresta al mismo tiempo que su dirección de propagación. La trayectoria de una ola se desvía hacia donde hay mayor disminución de la celeridad (Shore Protection Manual, 1975).

En las costas se incrementan las situaciones de riesgo a sufrir erosión por oleaje debido a su naturaleza dinámica, a las actividades humanas y a las modificaciones del oleaje causadas por rompeolas y espigones (Appendini y Fischer, 1998).

En las últimas décadas la erosión costera a comenzado a ser percibida desde la perspectiva humana como un problema ambiental destacado (Komar, 1998). Es un fenómeno de ocurrencia común en la mayoría de los ambientes

sedimentarios, siendo uno de los procesos geológicos de corto plazo más intensos, responsables de la evolución morfológica de las costas (Monti, 2000).

La erosión se debe a la modificación de los patrones de difracción y refracción asociados a la presencia de estructuras, las cuales hacen que el oleaje incida en forma oblicua a la línea de costa existente, pudiendo erosionarla si el aporte de sedimento se detiene por procesos naturales o por la intervención del hombre (Silvester, R. y Hsu, J. 1993).

En zonas urbanas es un problema serio, ya que representa un riesgo para la infraestructura en la franja costera y reduce la capacidad de las playas como recurso recreacional. El aumento de la presión humana en la zona costera ha incrementado los problemas de erosión debido, a los efectos humanos sobre los procesos dinámicos en la costa (Appendini y Lizárraga-Arciniega, 1998).

Como es el caso de la Bahía de Todos Santos (BTS). Dentro de ella existen diferentes zonas donde la erosión ha propiciado un deterioro intenso de la franja costera, ocasionando pérdidas económicas en propiedades y lugares de recreación. Una de las zonas más afectadas se localiza al Norte de la ciudad de Ensenada, en el poblado de El Sauzal, un centro urbano e industrial, cuya densidad de construcción ha aumentado con la ocupación de la franja costera (Bermudez-Zavala, 1999). En este poblado se localiza uno de los dos puertos que posee la BTS, el puerto de El Sauzal, un puerto de cabotaje con giro pesquero y mercante.

Una de las razones de que El Sauzal sea de las zonas más afectadas por la erosión se debe al desarrollo del puerto, ya que a partir de que se construyó en 1982 (Espinoza-Díaz, 1990), se han venido suscitando una serie de problemas en la franja costera, al sur de dicho poblado, que se reflejan en un retroceso de la línea de costa; éste ha llegado a tal grado que se ha necesitado generar obras de protección (Guardado-France, 1990).

Actualmente la Administración Portuaria Integral de Ensenada (API) ha dado marcha al Plan de Crecimiento del puerto El Sauzal, el cual es un proyecto que tiene la finalidad de hacer del puerto de El Sauzal un puerto de altura mediante una ampliación del mismo.

El Plan de Crecimiento consta de dos fases. La fase 1 (Figura 1) consiste básicamente, en la prolongación del rompeolas actual y la construcción de un nuevo espigón en la parte sur del recinto.



Figura 1. Desarrollo del Plan de Crecimiento para el puerto El Sauzal fase 1.

En la fase 2 se pretende construir un rompeolas principal que delimita el polígono de crecimiento. En esta fase también se incluye la construcción de un espigón perpendicular al rompeolas principal.

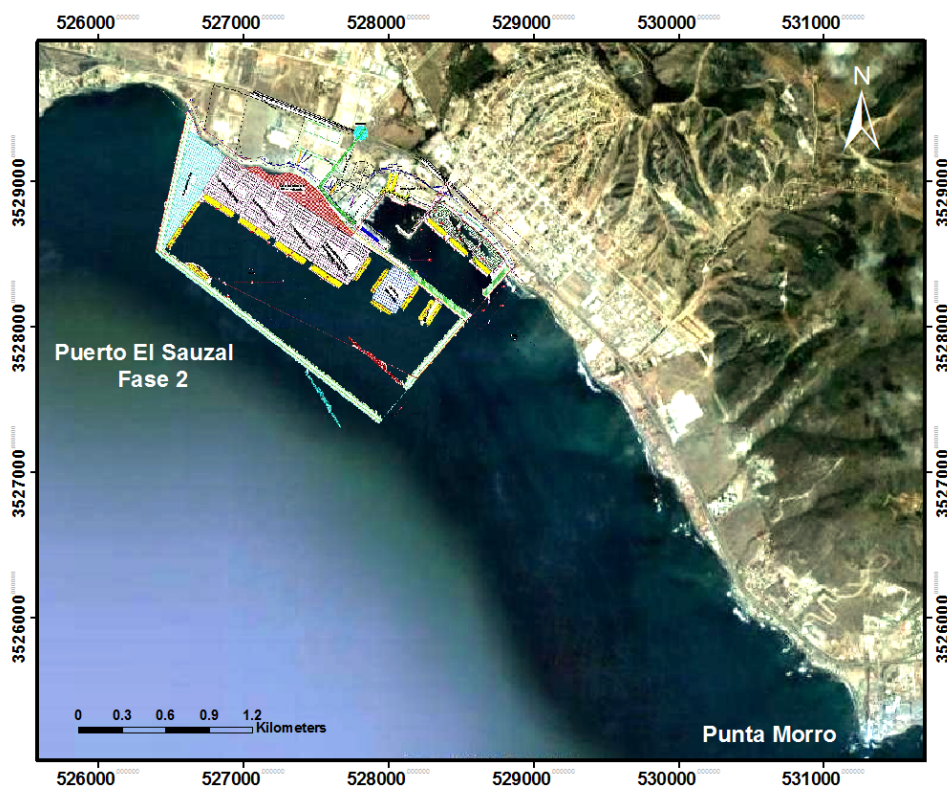


Figura 2. Fase 2. Desarrollo completo del Plan de Crecimiento para el puerto El Sauzal.

La ampliación del puerto es un factor determinante en la erosión costera de la zona, ya que las estructuras de ampliación modificarían el ángulo de incidencia del oleaje y esto contribuiría en el incremento de la erosión.

Existen planes de manejo para mitigar la erosión de las costas (Appendini, 1998, Monti, 2000) una vez que el problema se presenta, pero por otro lado existe la modelación numérica del oleaje como una herramienta que permite inferir las posibles transformaciones del oleaje al arribar a la costa y con esto proponer zonas susceptibles a erosión. Esta herramienta ha sido extensamente utilizada en la mayoría de los países industrializados para el diseño de estructuras costeras, ya que es la representación sintética de algo

real que simula sus características principales y la manera en la que evoluciona a través del tiempo y el espacio, permitiendo probar hipótesis acerca de la evolución y estado de la superficie del mar (Perelló-Reina, 2005).

En el caso de El Sauzal no existe un plan de manejo que mitigue los problemas de erosión, a pesar de que el problema es evidente y ha causado varios daños en la zona. Sin embargo, a principios de este año se dio a conocer el Manifiesto de Impacto Ambiental del “*Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California*” en donde se utiliza la modelación numérica como herramienta para inferir las modificaciones del oleaje con base en las estructuras de ampliación de la fase 1.

Aunque el Plan de Crecimiento del Puerto se desarrollará en dos fases, es importante que desde el diseño del puerto se conozcan las modificaciones y consecuencias que podría traer este desarrollo a la costa en cada una de sus fases, ya que son escenarios distintos con características distintas.

Debido a que para la fase 2 no se tiene conocimiento sobre las modificaciones del oleaje y el posible impacto que tendrá sobre la franja costera de El Sauzal, el presente trabajo aplica la modelación numérica del oleaje como una herramienta que permita hacer una comparación entre las condiciones actuales y posteriores a la ampliación y el posible impacto sobre la costa debido al desarrollo del puerto.

ANTECEDENTES

Antecedentes Generales y Particulares

Dentro de la Bahía de Todos Santos (BTS) se han llevado a cabo diversos estudios enfocados en la dinámica de la zona, el problema de erosión causado por oleaje y posibles soluciones al problema. Algunos de estos estudios se han enfocado particularmente en la zona de El Sauzal, por ser una zona que presenta altas tasas de erosión.

Durante décadas, los ingenieros costeros e investigadores han luchado con el difícil problema de cómo expresar el comportamiento complejo de las olas oceánicas mediante aproximaciones sencillas y útiles (Thompson, 1980 en Torres-Navarrete, 1986). La forma más común ha sido representar las olas dominantes de un cierto estado del mar mediante tres parámetros simples: altura significativa, periodo significativo y dirección predominante de las olas (Torres-Navarrete, 1986).

El oleaje que arriba a las costas occidentales de Baja California puede caracterizarse de acuerdo a su origen en oleaje proveniente del hemisferio Norte, oleaje proveniente del hemisferio Sur y oleaje local (Appendini, 1998).

El oleaje proveniente del hemisferio Norte es el régimen predominante durante la temporada invernal (octubre-abril), es el tipo de oleaje con mayor altura; se origina por los vientos de tormentas en el Golfo de Alaska, por los vientos de tormentas en el Pacífico Central (Hawai) desplazándose a latitudes medias y por los vientos dominantes del Pacífico Nororiental.

En el otoño se presenta también el oleaje de los ciclones tropicales generados en el Pacífico Mexicano. Este oleaje arriba desde una banda de direcciones centrada en la dirección Oeste (Appendini, 1998). Las direcciones del oleaje se alternan entre Noroeste y Suroeste en octubre-noviembre y en diciembre y enero la mayoría del oleaje viene del Suroeste (Padilla-Hernández, 1989).

En particular, en la Bahía de Todos Santos el oleaje con mayor altura se ha observado en los meses de diciembre a marzo presentando alturas significantes máximas de 2.4 m, altura de ola de diseño de 3.74 m para un periodo de retorno de 50 años, y 3.97 m para un periodo de retorno de 100 años. Mientras que el oleaje de menor energía se presenta en la época de verano con alturas significantes de 0.2 m, altura de ola de diseño de 1.85 m para un periodo de retorno de 50 años, y 1.96 m para un periodo de retorno de 100 años (Martínez Díaz de León et al., 1989, Martínez-Díaz de León y Coria-Méndez, 1993).

De acuerdo a la frecuencia observada, el oleaje proviene principalmente del Noroeste y del Oeste (Miranda-Vera, 1985 y Pérez y Chee, 1984), con una altura significativa de 3 m y altura media de 1.8 m (Miranda-Vera, 1985), el cual al incidir sobre la costa provoca una circulación a lo largo de la playa en dirección Sur.

Algunas condiciones de tormenta hacen que arribe oleaje proveniente del Sur, generando una corriente en sentido contrario (Pérez y Chee, 1984). Se

reportó que las olas de tormenta presentes durante abril y agosto de 1985 provenientes del hemisferio Sur, entraron principalmente entre Punta Banda y las Islas de Todos Santos con direcciones de arribo de 290-315°. Mientras que las de octubre del mismo año fueron con direcciones de arribo de 320-325° provenientes de Alaska y otras áreas del hemisferio Norte arribando principalmente a través de la ventana existente entre San Miguel y las Islas de Todos Santos (Torres-Navarrete, 1985). Sin embargo, durante la época invernal es cuando el oleaje arriba a la bahía con sus máximas alturas y con dirección de incidencia del noroeste (Torres-Navarrete, 1991).

Méndez-Arriaga (1982), Aranda-Manteca (1983), Pérez-Higuera y Chee-Barragán (1984) determinaron la dirección del transporte litoral predominante en la BTS, encontrando para la zona Norte un transporte dominante en dirección Sur. En la zona central existe una circulación hacia el Norte y en la región Sur la dirección es hacia la boca del Estero de Punta Banda.

Ahumada-Sempoal (1993) determinó las corrientes litorales inducidas por el oleaje dentro de la BTS. Según el autor las corrientes litorales se comportan de la siguiente manera: zona Noroeste, existe una divergencia a la altura de Punta Morro cuando el oleaje que arriba es de 242° y una convergencia cuando el arribo es de 230° y 280°. En las proximidades del puerto El Sauzal, el comportamiento es irregular en presencia de olas provenientes del Oeste, manteniéndose constante (hacia el Sur) con oleaje del Noroeste y Suroeste e invirtiéndose hacia el Norte cuando el oleaje tiene

dirección desde 230°. El comportamiento estacional de la corriente a lo largo de la costa parece estar regido en primera instancia por las características propias de cada tren de olas que al ingresar a la BTS con distintas direcciones y periodos se refractan de manera diferente.

En cuanto a la litología, las costas de la bahía están constituidas principalmente por material del cuaternario tanto marino como aluvión. Al Norte de San Miguel se encuentran varias terrazas de origen marino, en esta zona existen playas de bolsillo angostas, terrazas y cantiles marinos. De El Sauzal hasta cerca de Punta Morro la playa es angosta formada de cantos rodados (Bermúdez-Zavala, 1999).

El poblado de El Sauzal, presenta problemas de retroceso de la línea de costa, ya que a partir de la construcción del puerto de El Sauzal en 1982, la razón de retroceso al Sur del puerto, aumentó en diferentes partes dentro de la zona, a tal grado que se han necesitado generar obras de protección. La razón promedio de retroceso en la zona es de 2 m por año de 1959 a 1985, y como razón máxima 3 m por año. El problema de retroceso en la zona se ve agudizado por el efecto erosivo que causa la infraestructura del puerto El Sauzal (Guardado-France, 1990).

El efecto erosivo que causan las obras exteriores del puerto en los cantiles de la zona, está dado porque la dirección del oleaje ocasionada por el rompeolas y la isobata de los 20 m de forma circular que se encuentra frente a Punta El Sauzal junto con la isobata de los 10 m, cambian la trayectoria de las

ortogonales hacia la costa haciendo que el oleaje incida directamente sobre los cantiles acelerando su proceso erosivo (Medina-Enríquez, 1993 y Espinoza-Díaz, 1990).

De igual manera, Lizárraga-Arciniega y Fischer (1998), establecen que la construcción del puerto El Sauzal, con un área protegida de 6.7 hectáreas, ha influenciado las tasas de erosión de la línea de acantilados costeros ubicados al Sur de la zona denominada micro corredor portuario El Sauzal-Ensenada.

Desde la perspectiva de los procesos costeros, se ha analizado la problemática de los cantiles en la zona de El Sauzal obteniendo altas tasas de erosión de los cantiles a lo largo del corredor, así como tasas de retroceso de la línea de costa entre 0.21 m/año - 0.7 m/año (Ramos-Olvera, 1993 y Cruz-Colín, 1994) y 1.5 m/año (Renault-Ballester y García-Gutiérrez, 1994).

En un estudio de balance sedimentario realizado en la BTS (Cruz-Colín y Cupul-Magaña, 1997), se reportó un proceso erosivo durante el periodo comprendido entre 1970 y 1991 en cuatro sectores de cantiles identificados en la BTS: San Miguel, El Sauzal, Punta Morro/El Vigía y Punta Banda. Los cantiles de San Miguel y parte del Sauzal presentaron una tasa de retroceso 0.97 m/año, siendo ésta la razón de retroceso más alta dentro de la bahía para ese periodo de estudio. En cuanto al aporte sedimentario, lo reportado para el Sauzal fue 13,996.16 m³/año. Para San Miguel, Punta Morro/El Vigía y Punta Banda 14,097.71, 3,919.14 y 16,194.34 m³/año respectivamente.

Basados en estos hechos, la ingeniería ha utilizado desde hace ya varias décadas, modelos para realizar diversos estudios en procesos costeros. La mayoría de los modelos que representan regiones costeras o estructuras costeras, están distorsionados debido a que es necesario representar dimensiones horizontales, las que son mucho más grandes que las verticales.

Se han utilizado con éxito modelos para estudiar la estabilidad de estructuras, transporte litoral, difracción y refracción del oleaje, corrientes, erosión y depositación, etc. (Medina-Enríquez, 1993).

Debido a la alta no linealidad de los procesos antes mencionados, su estudio resulta ser matemáticamente muy complicado. Respecto a la refracción y difracción del oleaje, se ha intentado resolver el problema con base en varias aproximaciones de las ecuaciones de movimiento, siendo las más comunes las que se conocen como aproximaciones de Boussinesq y los modelos de Pendiente Suave (Mild Slope en inglés) (Dingemans, 1997). La diferencia fundamental entre ambas aproximaciones es que los modelos de Boussinesq conservan algunos términos no lineales mientras que los modelos de pendiente suave son del todo lineales, basados en la Ecuación de Pendiente Suave (EPS). Ecuación que años más tarde se fortalecería generándose la Ecuación de Pendiente Suave Modificada (EPSM) (Vázquez-Peredo, 2007).

Un ejemplo de modelos de propagación de oleaje basados en la EPSM son el Modelo RIDE (Maa, Hsu et al., 2002) y el Modelo WAPO2D generado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (Silva, 2004).

Radder (1979) introdujo una parabolización de la EPS que se restringe a los casos en los que la onda sigue una dirección de propagación preferente y los efectos de reflexión son despreciables. Esta aproximación ha sido utilizada en varios trabajos como el de Kirby y Dalrymple (1983), Kirby (1986) y Dalrymple (1988), y es la base del modelo de propagación de oleaje conocido como REFDIF1 (1994).

Sin embargo, es poco lo que se sabe acerca de la refracción del oleaje dentro de la BTS, ya que los estudios efectuados están enfocados principalmente a estimar el transporte de sedimentos, por lo que no aportan información detallada del fenómeno de refracción ni de la metodología utilizada para su cálculo, sin embargo la BTS presenta una zona de refracción intensa en la región somera ubicada entre las islas de Todos Santos y Punta San Miguel. Los principales rasgos batimétricos que modifican las trayectorias de las ortogonales en esta zona son: el bajo de San Miguel y el bajo ubicado frente a punta El Sauzal (Ulloa-Torres, 1989).

También, la forma de la bahía, la presencia de bajos y la localización de las islas de Todos Santos, generan serios problemas de difracción de oleaje (Pérez y Chee, 1984).

Dentro de la bahía se han construido diferentes obras de protección costera de acuerdo a las necesidades de proteger el litoral del embate del oleaje, por lo que se han realizado varios trabajos enfocados en las obras de protección y su funcionalidad.

Tal es el caso de Guardado-France (1997) quien realizó un estudio de la funcionalidad de las obras de protección costera construidas en la BTS, encontrando un total de 45 estructuras de las cuales 19 son funcionales, 21 tienen funcionalidad intermedia y 5 no son funcionales. Y señaló que los rompeolas presentan problemas de rebase por oleaje en épocas de tormentas, fracturas, erosión en la base y salida de elementos.

En el mismo estudio, Guardado-France toma un mapa de Pámanes y Chee (1976) en donde se muestran los tipos de costa presentes en la BTS, siendo la franja costera del Sauzal (San Miguel-Punta Morro) una costa protegida rocosa.

Soria-Velásquez (1995), realiza un audiovisual acerca de los tipos de estructuras de protección costera que se encuentran en la BTS haciendo énfasis en las estructuras encontradas en la franja costera de El Sauzal, Punta Morro, Puerto de Ensenada y la playa El Faro. Propone que se dé un mantenimiento continuo a estas estructuras para evitar su deterioro y una posible destrucción de la misma.

Para la zona de El Sauzal, Bermúdez-Zavala (1999), realizó un estudio para el diseño de un rompeolas separado de la costa como alternativa de protección a los cantiles que se encuentran en la zona, con una metodología basada en las técnicas de Bruun et al (1978), Shore Protection Manual (1984), Dally et al (1986) y Chesten et al (1993).

ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Todos Santos (Figura 2) se ubica en la costa Oeste de la península de Baja California entre los 31° 40' y 31° 56' de latitud Norte y 116° 36' y 116° 50' de longitud Oeste, a 60 millas náuticas al Sur de la frontera México-Estados Unidos. Es considerada como una bahía abierta con pendiente suave y con tres tipos de costa: protegida rocosa (Norte), abierta arenosa y abierta rocosa (Pámanes y Chee, 1976), donde los rasgos fisiográficos más sobresalientes son hacia el Norte Punta San Miguel, al Este Punta Morro el Cerro El Vigía y el Estero de Punta Banda, hacia el Sur la Península de Punta Banda y al Oeste las Islas de Todos Santos.

El origen de la bahía es tectónico y está formada por rocas ígneas y sedimentarias del Cretácico. Al Norte de San Miguel se encuentran varias terrazas de origen marino que se formaron durante el Pleistoceno; en esta zona existen playas de bolsillo angostas terrazas y cantiles marinos. De El Sauzal hasta cerca de Punta Morro la playa es angosta formada de cantos rodados. Las costas de la bahía están constituidas principalmente por material del cuaternario tanto marino como aluvión (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009).

Sus límites naturales le dan una forma trapezoidal, con un área aproximada de 24.090 ha. 18 km de largo por 15 km de ancho (Cruz-Colín y Cupul-Magaña, 1997). Se caracteriza por ser una bahía de aguas poco profundas en la cual aproximadamente un 75% de su área presenta

profundidades inferiores a 50 metros y bajos de 6 metros, el 25% restante forma parte de un cañón submarino cuyas profundidades alcanzan los 400 metros. La entrada Noroeste, entre Punta San Miguel y las Islas Todos Santos tiene aproximadamente 12 kilómetros de ancho y profundidades alrededor de los 50 metros con algunos bajos de hasta 6 m de profundidad (Secretaria de Marina, 1974 en Guardado-France, 1997, Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009).

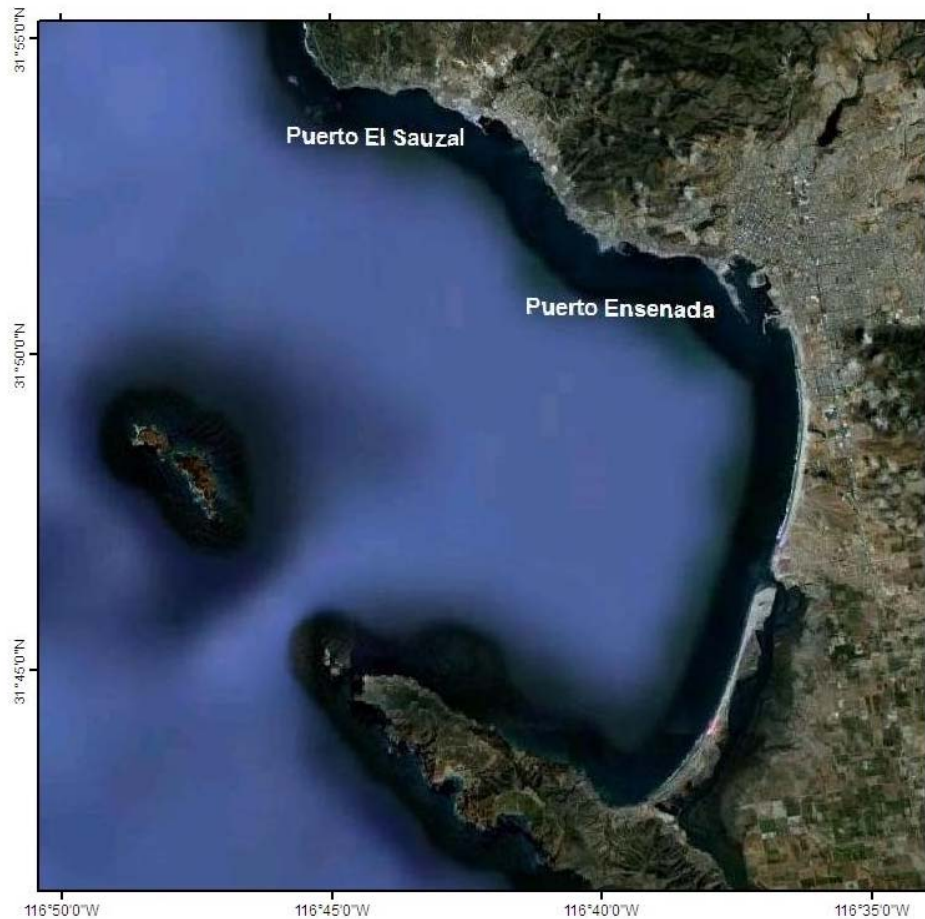


Figura 3. Bahía de Todos Santos, Baja California (Modificada de Google).

Los vientos dominantes provienen del Noroeste y Sureste, en la mayor parte del año; con ligeras variaciones estacionales en verano de Oeste a Este, y algunos vientos ocasionales del Este como la “Condición Santana” (cálidos y secos) principalmente durante el otoño (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009).

Las direcciones de aproximación del oleaje a la bahía son del Noroeste (NW), Oeste Noroeste (WNW) y Oeste (W) con alturas que en condiciones normales oscilan entre 0.2 y 2.4 m (Coria, 1991) alcanzando máximos de 3.47 y 3.97 para tormentas con periodo de retorno de 50 y 100 años respectivamente.

Respecto a las corrientes litorales, en la parte Norte de la bahía la dirección de la corriente predomina hacia el Sureste (SE), mientras que en la parte central las corrientes convergen y en el Sur la dirección de la corriente es hacia el Norte en dirección del puerto de Ensenada.

El Puerto El Sauzal es un puerto de cabotaje con giro pesquero y mercante, ubicado al Norte de la Bahía de Todos Santos en un poblado llamado El Sauzal de Rodríguez un centro urbano e industrial cuya densidad de construcción ha aumentado con la ocupación de la franja costera (Bermúdez-Zavala, 1999). Se localiza en la latitud Norte $31^{\circ} 53' 37.8''$ y la longitud Oeste $116^{\circ} 42' 12.87''$; dentro de la Península de Baja California, aproximadamente a 9 km al Norte de la ciudad de Ensenada, entre el poblado San Miguel y Punta Morro (Figura 2). Su rada portuaria está separada por un rompeolas de rocas,

de 500 m de largo, y su comunicación con la bahía es a través de una entrada de aproximadamente 100 m de ancho que permite el acceso de las embarcaciones.

El puerto El Sauzal se orienta de Noroeste a Sureste y tiene una superficie total de $15 \times 10^4 \text{ m}^2$. Su canal principal de navegación tiene profundidades máximas de 9 m.



Figura 4. Área de estudio, Sauzal de Rodríguez, BC. La línea roja indica la franja costera que se considera como zona de estudio en este trabajo (Modificada de Google).

OBJETIVOS

El objetivo general es establecer la modificación del patrón de oleaje que arriba a la costa de El Sauzal como consecuencia de la ampliación del puerto El Sauzal y el posible impacto que esta modificación tendrá sobre los cantiles de la zona de acuerdo a su susceptibilidad a ser erosionados. Todo con base en una comparación entre las condiciones actuales y las condiciones posteriores a la ampliación del puerto.

Objetivos particulares

1. Obtener la refracción del oleaje y el comportamiento espacial de la altura de ola (H) mediante el modelo numérico REF/DIF1 (Kirby y Dalrymple, 1994) para las condiciones actuales.
2. Obtener la refracción del oleaje y el comportamiento espacial de la altura de ola (H) mediante el modelo numérico REF/DIF1 (Kirby y Dalrymple, 1994) para las condiciones posteriores a la ampliación del puerto.
3. Definir las zonas de mayor susceptibilidad a la erosión con base en la altura de la ola que impacta la costa, la presencia o ausencia de estructuras, el tipo de playa y la litología de los cantiles.

METODOLOGÍA

La metodología se dividió en dos secciones, modelación del oleaje y características de la costa (litología y acorazamiento).

1. Modelación del oleaje

El oleaje es uno de los factores más importantes a modelar cuando se quiere construir una estructura costera.

Para caracterizar adecuadamente el oleaje, es conveniente contar con datos correspondientes al mayor periodo de tiempo posible. La climatología del oleaje (altura, periodo y dirección) es precisamente eso, la caracterización del oleaje a largo plazo, ya que se busca describir las tendencias estadísticas del oleaje durante un periodo de tiempo largo.

En este trabajo se utilizaron los datos del clima de la ola en aguas profundas propuesta por Reyes-Cisneros (2007) para la zona de estudio. Dichos datos están dados por estación del año; para primavera, verano y otoño se consideran dos trenes de ola porque el patrón de oleaje es variante; mientras que para el invierno solo se considera un tren de onda, ya que en invierno el patrón de oleaje es predominante.

Los datos fueron tomados de los reportes del Coastal Data Information Program (CDIP) correspondientes a la boya 091 ubicada en Loma Point, San Diego, CA; y comprenden el periodo de noviembre de 1995 a mayo de 2002.

La batimetría es otro factor indispensable en la modelación del oleaje, ya que la altura y velocidad de fase de la ola en aguas someras se ven afectadas

al pasar de un medio a otro con profundidad diferente. La batimetría utilizada en este trabajo corresponde al área de El Sauzal y fue proporcionada por la Secretaría de Marina, Armada de México (SEMAR, 2008). Los datos crudos fueron blanqueados y ajustados a la zona de interés. La figura 3 muestra la batimetría de la zona después de los ajustes realizados.

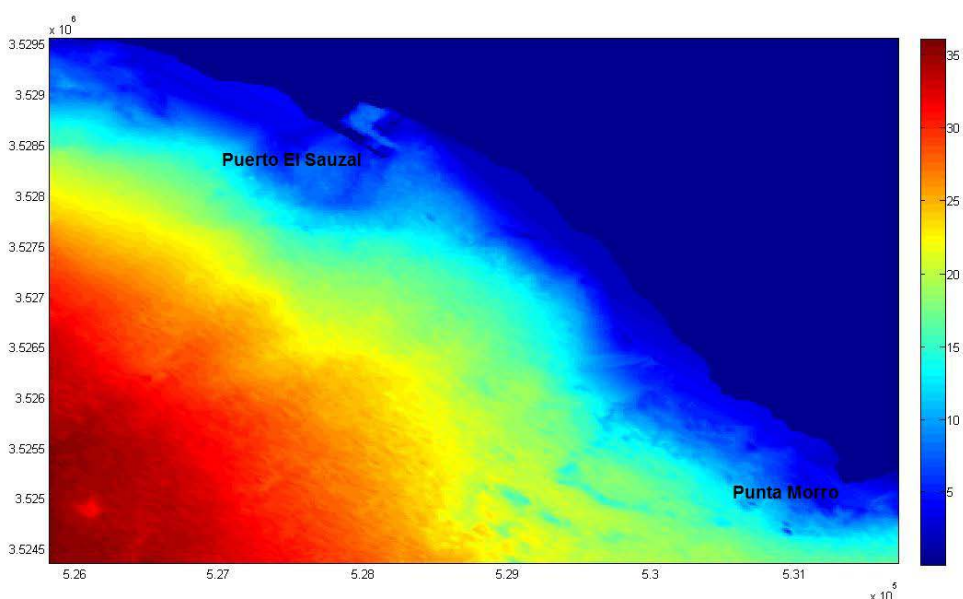


Figura 5. Batimetría correspondiente a la zona del Sauzal. La zona comprende desde el puerto El Sauzal hasta Punta Morro. La profundidad en metros se muestra con base en la escala de colores.

A partir de los datos del oleaje en aguas profundas y la batimetría de la zona, se utilizó el modelo numérico REF/DIF1 (Kirby y Dalrymple, 1994) para simular la propagación espacio-temporal del campo de oleaje en la zona costera de El Sauzal. Este modelo de estado estacionario está basado en la solución por aproximación parabólica de la *Ecuación de Pendiente Suave* (EPS) (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de

desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009). En este trabajo el modelo se utilizó como un modelo de ola monocromática.

Hay ciertas ventajas y desventajas al usar modelos numéricos lineales. Dentro de las ventajas es que al estar basados en la EPS resultan ser modelos hasta cierto punto accesibles para el usuario, ya que las ecuaciones que los gobiernan son menos complejas que las de modelos basados en ecuaciones de movimiento no lineales, como es el caso del Modelo FUNWAVE (Kirby, Wei et al., 1998).

Las condiciones que forman la base de los modelos de *Pendiente Suave* son:

- i) La onda se propaga sobre un fondo plano.
- ii) Los términos que incluyan la pendiente y la curvatura del fondo son despreciables.

Debido a que los fenómenos modelados, derivados de las modificaciones del oleaje no son lineales; al usar modelos lineales se desprecian factores importantes que afectan dichos fenómenos, como son la pendiente y el fondo.

Como consecuencia de esto, con el paso del tiempo la EPS se fue fortaleciendo, como en los trabajos de Booij (1983), Kirby (1983) y Kirby (1984), en los que se incluye la interacción del oleaje con corrientes y términos disipativos.

Más tarde, Kirby (1986) introdujo una variación de la EPS para reproducir el comportamiento de un tren de ondas viajando sobre un fondo ondulado.

Chamberlain y Porter (1995) propusieron la *Ecuación de Pendiente Suave Modificada* (EPSM), la cual es una generalización de la EPS en cuya derivación se incluyen los términos de segundo orden y de curvatura despreciados en las condiciones de la EPS. La EPSM ha demostrado ser una herramienta muy poderosa para determinar la evolución del oleaje cercano a la costa.

Radder (1979) introdujo una parabolización de la EPS que se restringe a los casos en los que la onda sigue una dirección de propagación preferente y los efectos de reflexión son despreciables; toda vez que la ecuación se convierte en parabólica, es posible implementar métodos iterativos simples de solución. Esta aproximación es la base del modelo de propagación de oleaje REF/DIF1 usado en este trabajo.

Porter y Staziker (1995) obtuvieron lo que se conoce como *Ecuación de Pendiente Suave Extendida* (EPSE), y Kim y Bay (2004) propusieron una nueva ecuación de pendiente suave a la que llamaron *Ecuación de Pendiente Suave Complementaria* (EPSC). Al igual que la EPSM, la EPSE y la EPSC son modificaciones que fortalecen la EPS.

Como se describe en los párrafos anteriores, con el fortalecimiento de la EPS, las ecuaciones gobernantes se han hecho cada vez más complejas y

difíciles de resolver, y aunque estas ecuaciones han demostrado reproducir satisfactoriamente la evolución de una onda propagándose sobre un fondo variable, distan cada vez más de la simplicidad de la EPS original. La complejidad introducida hace que el costo computacional y el trabajo para resolver las ecuaciones sea cada vez mayor (Vázquez-Peredo, 2007).

Aunque el REF/DIF1 es un modelo lineal, los resultados que provee son bastante satisfactorios y aceptados dentro de la modelación de oleaje. Al estar basado en la EPS se hace un tanto fácil de manejar y comprender su funcionamiento. Sin embargo, es importante considerar que no posee la misma precisión que los modelos que manejan términos no lineales y que por ese hecho se acercan más a la realidad.

Para hacer las corridas usando el modelo, se consideraron dos condiciones diferentes en la zona:

1. **Condiciones normales.-** Como se encuentra la zona de estudio en la actualidad.
2. **Condiciones fase 2.-** Considerando las estructuras costeras que habrá en la zona al finalizar la fase 2 de ampliación del puerto.

Como se mencionó anteriormente, los datos de clima del oleaje están dados por estación del año (Tabla I), por lo que se realizaron corridas para cada estación y bajo cada condición. En total se realizaron 14 corridas, es decir 7 para condiciones normales y 7 para condiciones fase 2.

Tabla I. Clima de la ola en aguas profundas para la región frente a El Sauzal (Tomados de Reyes-Cisneros, 2007). Donde H_0 corresponde a la altura significativa (metros), T_0 periodo significativo (segundos) y Θ_0 es el ángulo de aproximación del oleaje hacia la costa (grados azimutales).

Estación	H_0 (m)	T_0 (s)	Θ_0
Primavera Tren 1	1.4638	9.5458	277.05°
Primavera Tren 2	1.1263	15.0019	201.73°
Verano Tren 1	1.0925	7.1554	279.76°
Verano Tren 2	1.0579	14.7098	195.74°
Otoño Tren 1	1.1605	9.9433	282.52°
Otoño Tren 2	0.81	13.9439	202.26°
Invierno	1.5158	12.6952	262.91°

Para identificar los puntos donde se concentra la energía del oleaje debido a las nuevas estructuras del puerto, se hizo una resta de matrices de resultados de cada corrida para cada estación bajo cada una de las 2 condiciones. Es decir, a las matrices de resultados de la fase 2 se les restaron las matrices de resultados bajo condiciones normales, con esto se obtuvieron nuevas matrices que muestran las zonas donde hay cambios en el oleaje debido a las estructuras costeras. Mostrando las diferencias valores positivos al aumento de la altura del oleaje y valores negativos a la disminución de la altura del oleaje.

2. Características de la costa

Mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG), los resultados anteriores se plasmaron en mapas georeferenciados para mostrar el cambio en el comportamiento del oleaje después de la ampliación del puerto, es decir la fase 2. Con esto, se pueden apreciar los puntos sobre la costa donde se concentra la energía del oleaje.

Es importante conocer la litología de la zona para relacionarla con el comportamiento del oleaje. Para obtener información sobre la litología de los cantiles de El Sauzal se hizo un recorrido por la zona de estudio, la cual comprende desde el puerto El Sauzal hasta Punta Morro.

El recorrido consistió en levantar columnas estratigráficas de los cantiles en aquellos puntos donde existía diferencia entre ellos. Además se consideró información litológica de estudios previos que se han realizado en la zona.

Dentro de la zona de estudio existen franjas de costa acorazadas con muros de protección que han sido construidos por los habitantes de El Sauzal como alternativa para mitigar la erosión producida por el oleaje en su infraestructura.

Como parte del trabajo, usando un sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) se tomó la posición geográfica donde inicia y donde termina cada muro y su longitud. Posteriormente esta información se plasmó sobre mapas georeferenciados con ayuda de un SIG. En dichos

mapas se muestran las zonas que están protegidas del oleaje y las zonas expuestas donde se presentan los cantiles sin ninguna protección.

Para denotar zonas propensas a la erosión debido al comportamiento resultante del oleaje después de la ampliación del puerto; primeramente se ubicaron las zonas sobre la costa donde la altura de la ola se incrementa, una vez ubicadas las zonas se recurrió a la información litológica y obras de protección para conocer la composición del cantil o si es que esa zona ya está protegida por un muro.

Con base en esta información se establecieron las zonas que serían las más afectadas debido a la ampliación del puerto El Sauzal considerando las modificaciones del oleaje, la litología de los cantiles y la presencia o ausencia de estructuras de protección.

RESULTADOS

Para el presente trabajo se utilizó el modelo numérico REFDIF1 con el cual es posible simular condiciones prevalecientes de oleaje, determinar las alturas máximas que pueden presentarse por propagación sobre la costa e identificar las zonas donde estas alturas ocurren. Para evaluar posteriormente el grado de afectación debido a la construcción de estructuras de defensa del puerto de El Sauzal en su fase 2, con relación a las condiciones actuales tomando como base las características litológicas de los cantiles de la zona y las obras de protección. En los siguientes apartados se muestran los resultados.

Campo de oleaje en la zona de estudio

En la Tabla I se muestra el clima de ola empleado en este trabajo. Los valores más grandes de altura (H_0) se encuentran en invierno y primavera. Las alturas menores se presentan en verano. Las épocas de otoño y primavera pueden considerarse como épocas de transición, ya que en otoño los valores de H_0 incrementan alcanzando el máximo en invierno, mientras que en primavera disminuyen alcanzando el valor mínimo en verano.

Tabla I. Clima de la ola en aguas profundas para la región frente a El Sauzal (Tomados de Reyes-Cisneros, 2007). Donde H_0 corresponde a la altura significativa (metros), T_0 periodo significativo (segundos) y Θ_0 es el ángulo de aproximación del oleaje hacia la costa (NW).

Estación	H_0 (m)	T_0 (s)	Θ_0
Primavera Tren 1	1.4638	9.5458	277.05°
Primavera Tren 2	1.1263	15.0019	201.73°
Verano Tren 1	1.0925	7.1554	279.76°
Verano Tren 2	1.0579	14.7098	195.74°
Otoño Tren 1	1.1605	9.9433	282.52°
Otoño Tren 2	0.81	13.9439	202.26°
Invierno	1.5158	12.6952	262.91°

El resultado de las modelaciones arroja que la construcción de las estructuras de ampliación modifica el campo de oleaje actual incrementando las alturas del oleaje en zonas específicas sobre la costa. Se muestran los resultados obtenidos para verano e invierno por ser las temporadas representativas del oleaje de menor y mayor altura respectivamente. Primavera y otoño se consideran épocas de transición.

La figura 6 muestra la modificación del oleaje para el invierno. Se observa que el rompeolas refracta el oleaje hacia el Sur y crea una zona de baja energía en la costa inmediata al puerto e incrementa la altura en la costa Sur entre el puerto y Punta Morro. El incremento va aproximadamente de 2 m en condiciones actuales a 2.5 m con la construcción del rompeolas. Los colores encendidos que se presentan en la frontera superior se consideran error y no forman parte de los resultados.

Para el verano se modelaron dos trenes de ola. Bajo las condiciones del tren 1, el rompeolas de igual manera refracta el oleaje pero no se observa un

incremento significativo en la altura de las olas, por el contrario crea una zona de calma en la parte inmediata al puerto (Figura 7).

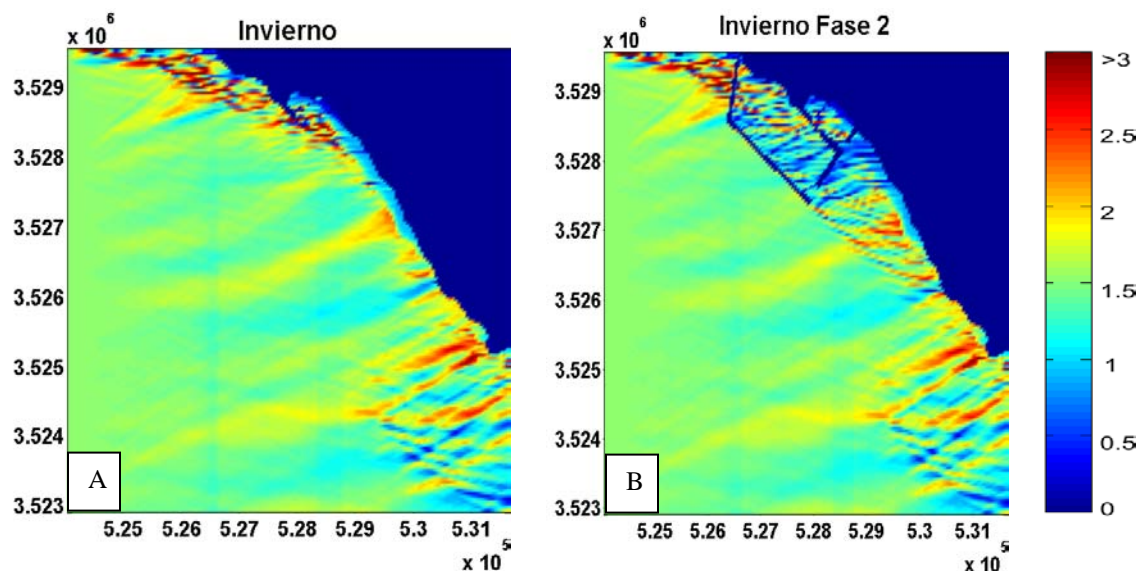


Figura 6. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 262.91° .

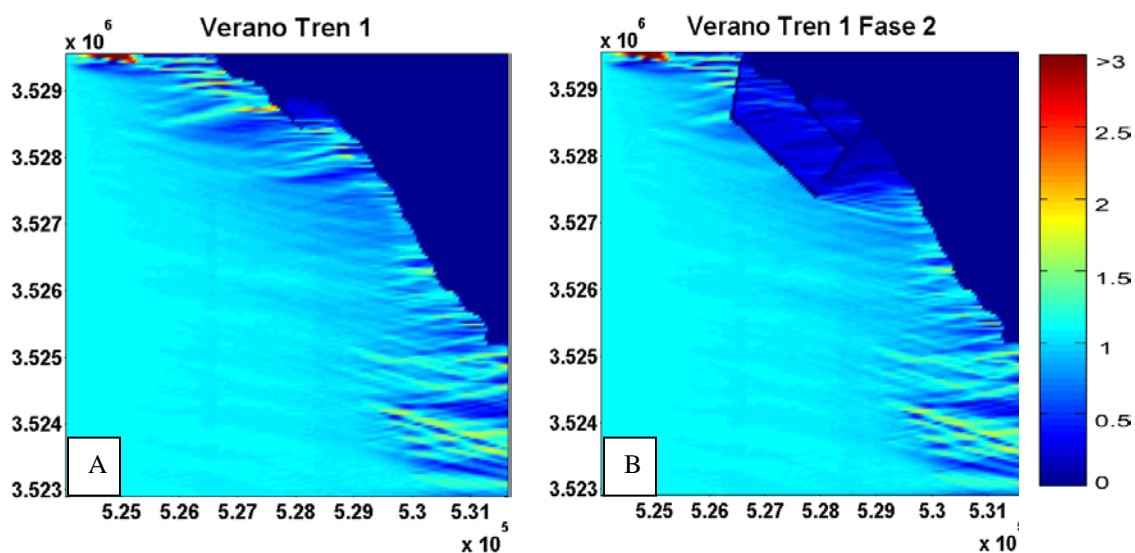


Figura 7. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 279.76° .

En el tren 2 el oleaje se modifica en la zona Norte del puerto incrementando la altura decenas de centímetros. Este incremento también se

puede observar a un costado del puerto de manera perpendicular a los canales de acceso, en donde se concentra una mayor altura sobre el canal de acceso pegado a la costa (Figura 8).

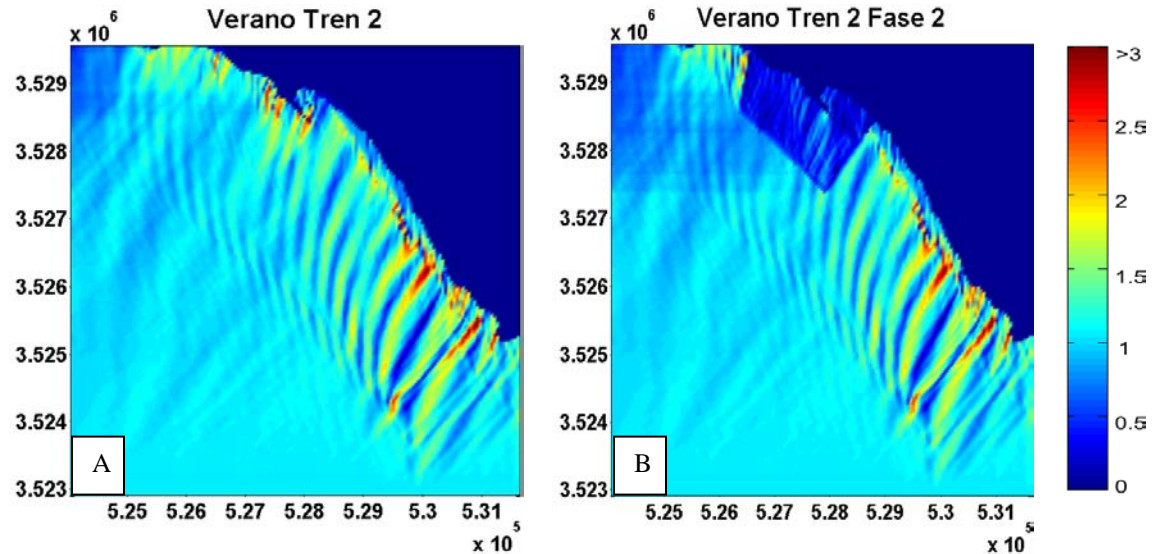


Figura 8. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera inferior e izquierda con un ángulo de 195.74° .

Igual que en el tren 1 de verano, para el tren 1 de primavera el rompeolas refracta el oleaje hacia el Sur pero no se observa incremento significativo en la altura de las olas, se crea una zona de calma en la parte inmediata al puerto (Figura 9).

En el tren 2 el oleaje incrementa su altura en la zona Norte del puerto, este incremento también se puede observar perpendicular a los canales de acceso, en donde se concentra una mayor altura sobre la boca del canal de acceso pegado a la costa (Figura 10).

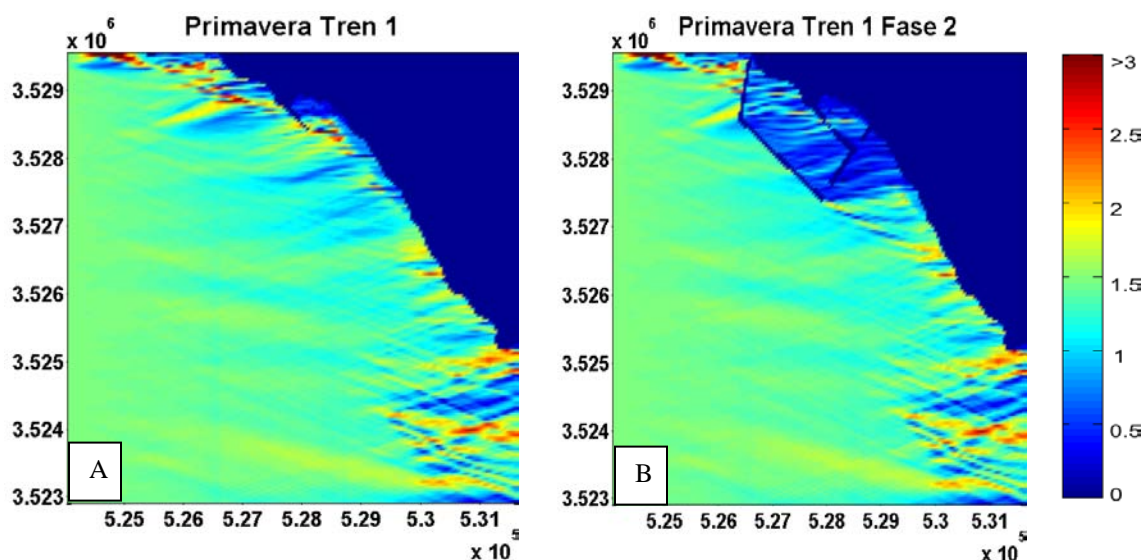


Figura 9. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 277.05° .

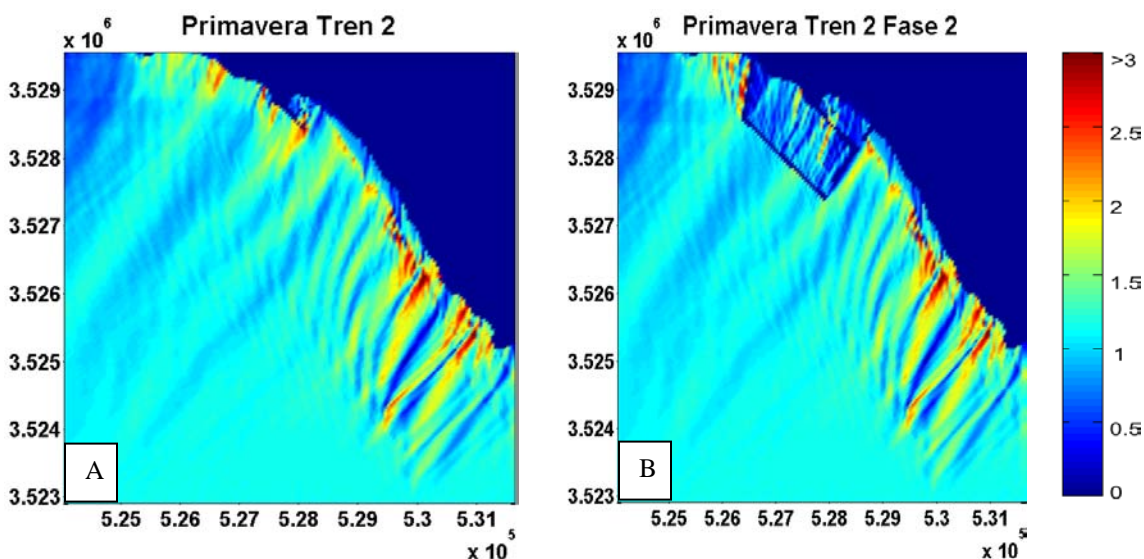


Figura 10. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera inferior e izquierda con un ángulo de 201.73° .

En otoño bajo las condiciones del tren1 no se observan incrementos considerables de la altura debido al rompeolas, existe la refracción del oleaje hacia el Sur por la estructura pero la variación de alturas entre condiciones

actuales y condiciones fase 2 es muy baja (Figura 11). Lo que se observa en la frontera superior es error, por lo que no se consideró como resultados.

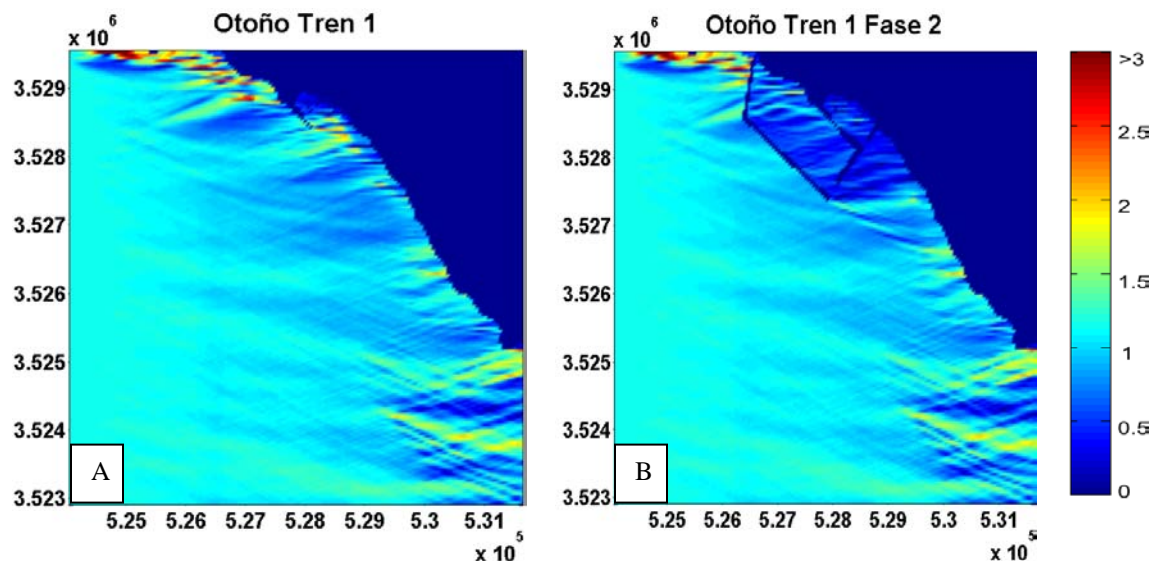


Figura 11. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera izquierda con un ángulo de 282.52° .

Para el tren 2 de otoño no se observan modificaciones del campo de oleaje actual después de la ampliación del puerto (Figura 12).

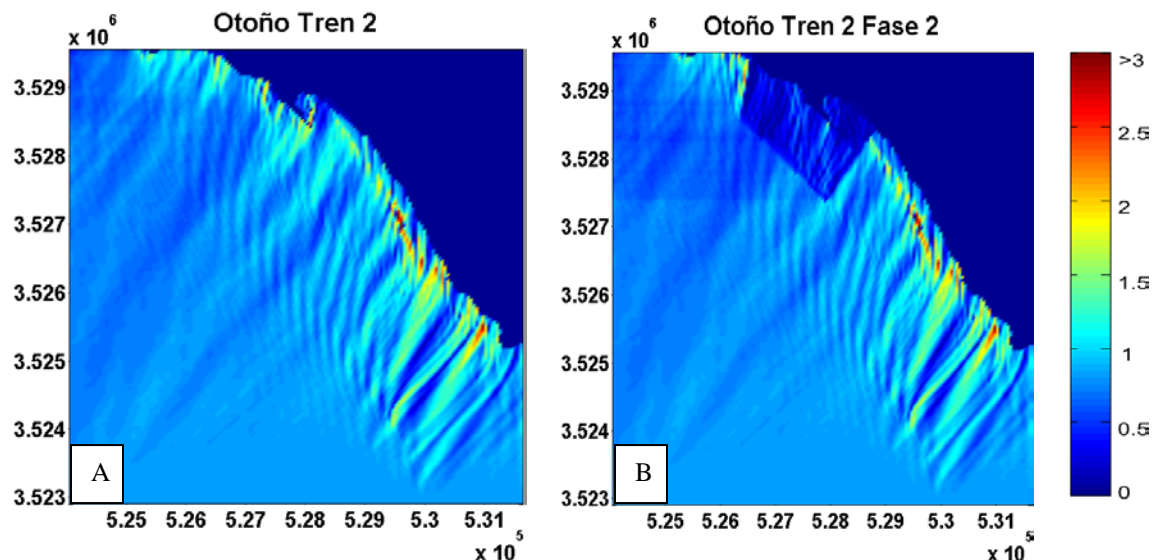


Figura 12. Campo de oleaje antes (A) y después de la ampliación del puerto (B). El oleaje incide por la frontera inferior e izquierda con un ángulo de 202.26° .

Para apreciar mejor la modificación del campo del oleaje entre las condiciones actuales y las condiciones posteriores a la ampliación del puerto, se muestran las figuras 13, 14, 15 y 16 las cuales representan la diferencia entre las alturas del oleaje antes y después de la construcción de las estructuras.

En cada figura, el color verde representan las zonas donde el valor es cero, es decir, donde las estructuras de ampliación del puerto no afectan la dinámica del oleaje actual. Los valores positivos indican incrementos en la altura de las olas.

En estas figuras puede apreciarse que en todas las épocas del año bajo condiciones del tren 1, las estructuras no modifican el campo de oleaje al Norte del puerto, las únicas modificaciones se presentan hacia el Sur. Estas modificaciones oscilan entre 0.5 y 1 m.

Sin embargo, todas las épocas bajo condiciones del tren 2 muestran que el rompeolas de ampliación modifica el oleaje hacia el Sur y hacia el Norte del puerto. Estas modificaciones también oscilan entre 0.5 y 1 m pero en el Norte se aprecian algunas zonas donde la altura incrementa hasta casi 1.5 m.

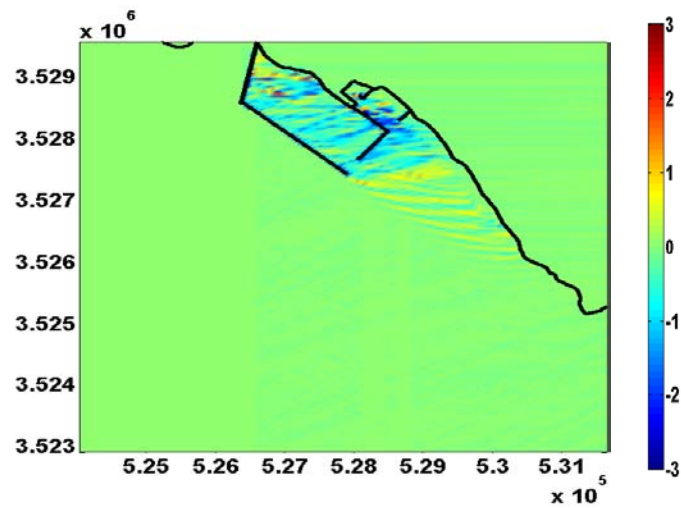


Figura 13. Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de invierno.

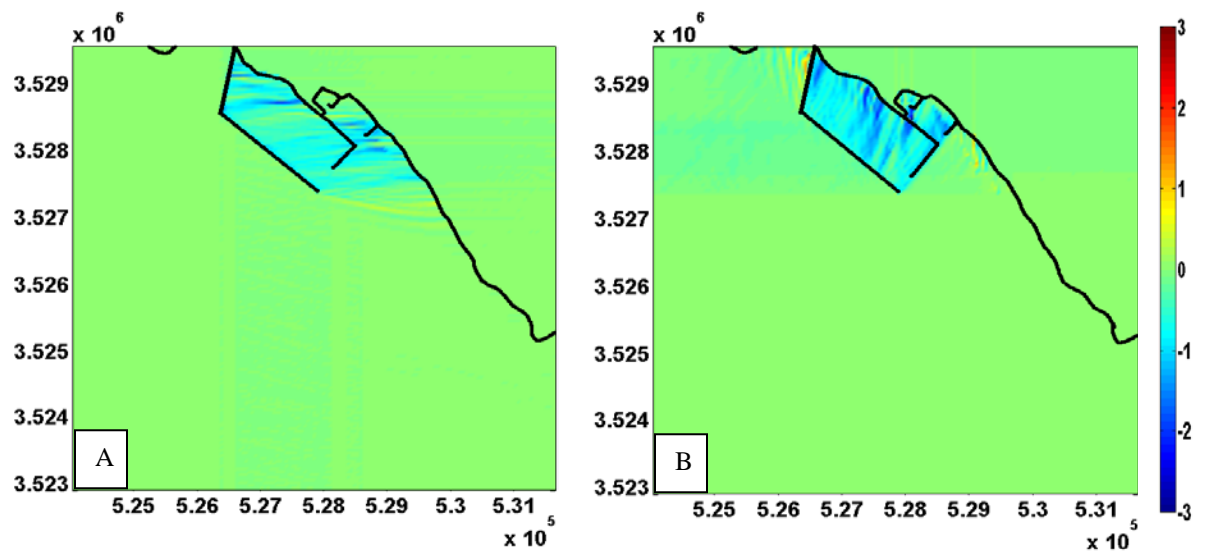


Figura 14. Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de verano tren 1 (A) y tren 2 (B).

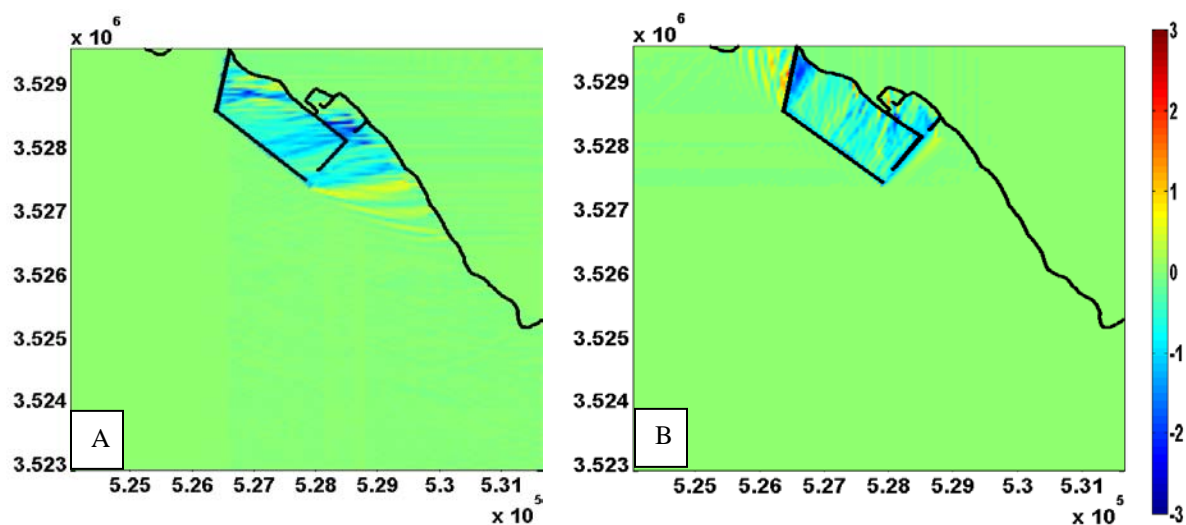


Figura 15. Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de primavera tren 1 (A) y tren 2 (B).

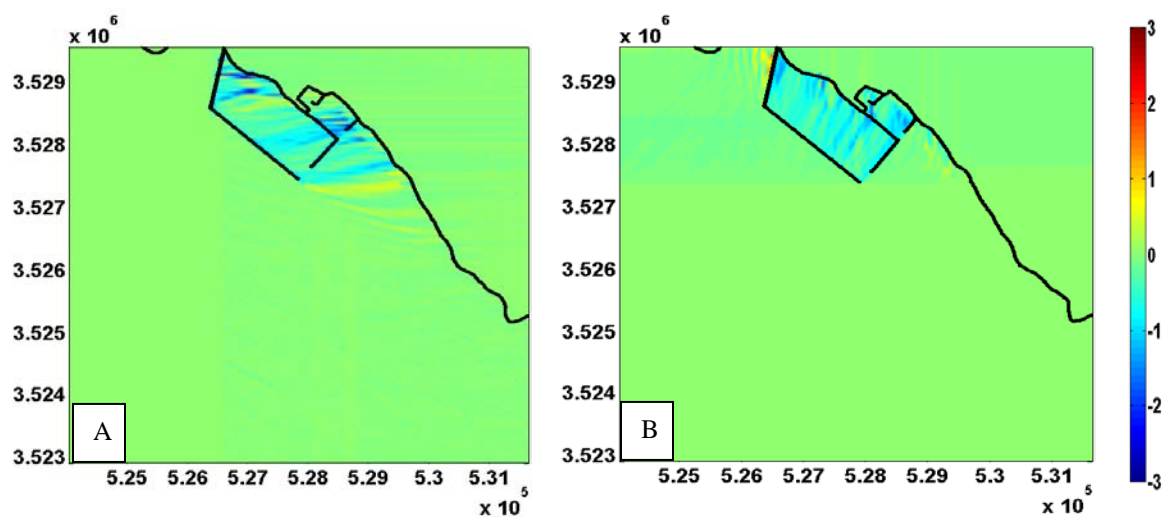


Figura 16. Diferencia entre alturas del oleaje antes y después de la ampliación del puerto para la época de otoño tren 1 (A) y tren 2 (B).

Por otra parte, estas modificaciones se presentan con un patrón en el que se mezclan aumentos y disminuciones de la altura en el orden de decenas de centímetros. Estas modificaciones en conjunto con factores como la

dirección de arribo del oleaje modifican los procesos costeros, lo que puede repercutir en erosión costera.

Litología y acorazamiento en la zona de estudio

En la franja costera de El Sauzal se encuentra una serie de cantiles activos e inactivos, siendo predominantes los activos, los cuales varían en tamaño y composición litológica, la cual puede verse reflejada en las características de las playas, que están constituidas por materiales que van desde arenas finas a cantos rodados y bloques, producto de la erosión de los cantiles (Cruz-Colín y Cupúl-Magaña, 1997).

En este trabajo se designaron tres tipos de playas, arenosa, rocosa y de basalto; entendiendo como rocosa playas donde predominan los cantos rodados. En la zona de El Sauzal las playas de tipo rocoso son las que predominan, localizándose en casi toda la franja que comprende el área de estudio, con excepción de la zona inmediata al puerto donde se localiza la playa arenosa conocida como *Stacks* y la zona aledaña al Norte de Punta Morro donde predominan derrames basálticos (Figura 17).



Figura 17. Tipo de playa en la zona de estudio.

La franja costera de El Sauzal está considerada como una zona de alta energía (Enríquez-González, 2005), debido a esta alta energía y a la litología de los cantiles, muchos de los habitantes que están situados sobre ellos han sido sorprendidos por la rápida erosión de los mismos, por lo que se han visto en la necesidad de construir obras de protección en la base del cantil para mitigar la erosión y proteger su infraestructura. De acuerdo a información existente (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009) el 5.6% de los cantiles en la zona son inactivos, el 44.4% son activos y el 50% ya están protegidos por un muro.

La figura 18 muestra la distribución de los cantiles a lo largo de esta zona que abarca desde el puerto de El Sauzal hasta Punta Morro. La misma figura muestra también los muros que han sido construidos a la fecha por los habitantes dentro de la Zona Federal Marítimo Terrestre.



Figura 18. Muestra los cantiles y muros existentes en la franja costera desde la zona inmediata al puerto de El Sauzal hasta Punta Morro.

La litología de los cantiles del Sauzal consta básicamente de arenisca, aluvión, lutitas y basalto (en algunas zonas). Se muestran cuatro columnas estratigráficas que representan la litología de los cantiles en la zona.

La columna 1 (Figura 19) muestra la composición de los cantiles localizados desde el puerto hasta poco antes del edificio más alto del Sauzal conocido como condominios El Sauzal. La base de estos cantiles principalmente es de lutitas seguidas por aluvión sin consolidar y cantos

rodados. Los números a la izquierda de cada columna representan la altura promedio del cantil en metros.

La columna 2 representa los cantiles ubicados entre dicho edificio y la zona frente a la refinería de Pemex. Estos cantiles siguen el patrón de composición que se muestra en la columna (Figura 19).

La columna 3 corresponde a los cantiles que se encuentran entre la refinería de Pemex y la curva anterior al hotel Las Rosas. Estos cantiles se componen de aluvión con areniscas, cantos rodados pequeños, gravas pequeñas y arcillas. La columna 4 muestra la composición de los cantiles ubicados desde el hotel Las Rosas hasta Punta Morro (Figura 20).

Los cantiles de la columna 1, 2 y 3 tienen en promedio 5 m de altura y los que integran la columna estratigráfica 4 tienen 6 m de altura. Cabe aclarar que estas 4 columnas representan el promedio de 17 columnas levantadas en la zona de estudio.

Columna estratigráfica 1



Columna estratigráfica 2

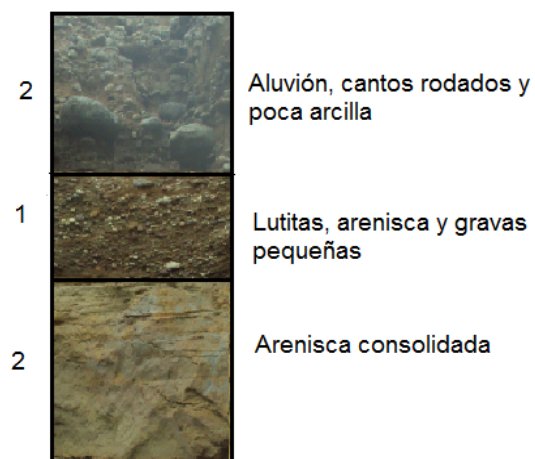


Figura 19. Muestra la columna estratigráfica 1 que corresponde a los cantiles localizados entre el puerto El Sauzal y los condominios El Sauzal. La columna estratigráfica 2 corresponde a los cantiles localizados entre los condominios El Sauzal y la refinería de Pemex.

Columna estratigráfica 3



Columna estratigráfica 4



Figura 20. Muestra la columna estratigráfica 3 que corresponde a los cantiles localizados entre la refinería de Pemex y la curva anterior al hotel Las Rosas. La columna estratigráfica 4 corresponde a los cantiles localizados entre el hotel Las Rosas y Punta Morro.

En El Sauzal existen alrededor de 20 muros de dimensiones y características diversas (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009) (Figura 21). A pesar de que la mayoría de las obras construidas en la bahía presentan un grado de funcionalidad intermedio y una condición física aceptable, los muros de El Sauzal presentan problemas de erosión lateral, erosión en la base, cimentación, agrietamiento, varillas oxidadas y un sistema de drenaje inadecuado (Guardado-France, 1997) (Figura 22).



Figura 21. Diferentes tipos de muros localizados en la costa del Sauzal.



Figura 22. Principales problemas que presentan los muros de El Sauzal. Se observa erosión lateral (esquina superior izquierda), erosión en la base (esquina superior derecha), varillas oxidadas (esquina inferior izquierda) y drenaje inadecuado (esquina inferior derecha).

Las siguientes figuras relacionan las condiciones físicas y litológicas de la franja costera del Sauzal para cada época del año, con la finalidad de establecer las zonas propensas a erosión.

El invierno es la época en donde se observa mayor modificación del campo de oleaje ya que el rompeolas de ampliación lo difracta mayor distancia. Se presentan incrementos a lo largo de la franja de El Sauzal pero el oleaje llega de manera directa sobre la zona donde se encuentra ubicado el hotel Las Rosas y la curva anterior a él; aquí hay cantiles expuestos y muros, respectivamente (Figura 23).

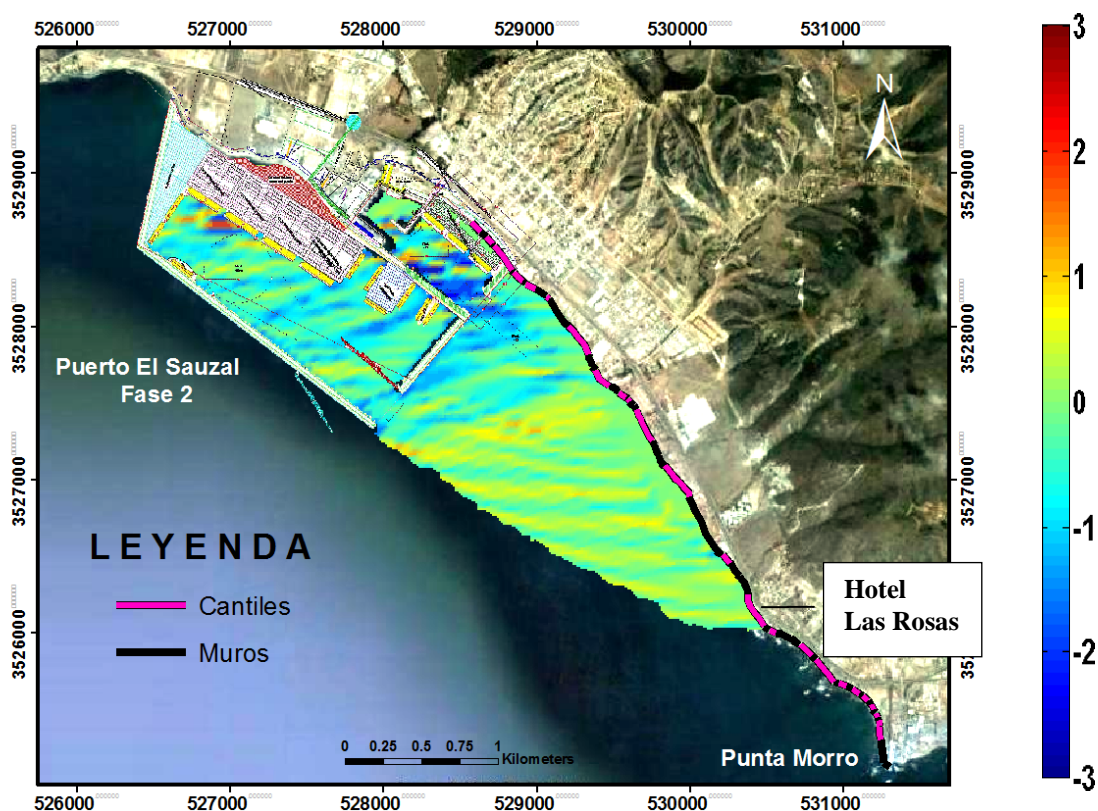


Figura 23. Muestra las zonas donde se presentan incrementos de altura durante el invierno y las zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola en la punta del hotel Las Rosas.

Para el otoño, las mayores alturas (cerca a 1 m) se concentran sobre los cantiles existentes frente a la refinería de Pemex. En su mayoría los cantiles de esa zona están expuestos. Sin embargo, en zonas como la costa frente al Centro de Estudios Tecnológicos del Mar (CET del Mar) también se incrementa la altura del oleaje pero es una zona que se encuentra protegida casi en su totalidad por muros (Figura 24).

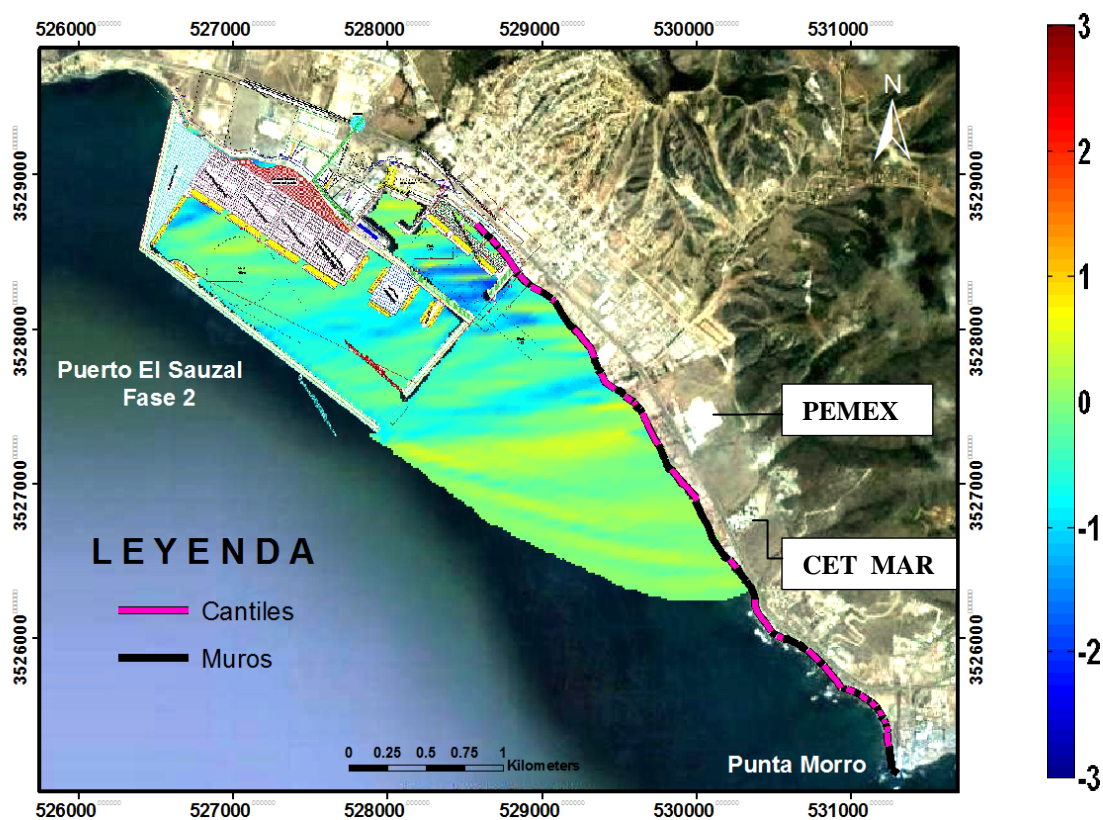


Figura 24. Incrementos de altura durante el otoño tren 1 y zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola frente a Pemex y el CET del Mar.

En primavera y verano el oleaje se modifica de manera similar al otoño, presentándose las alturas mayores en las mismas zonas (Figura 25 y 26).

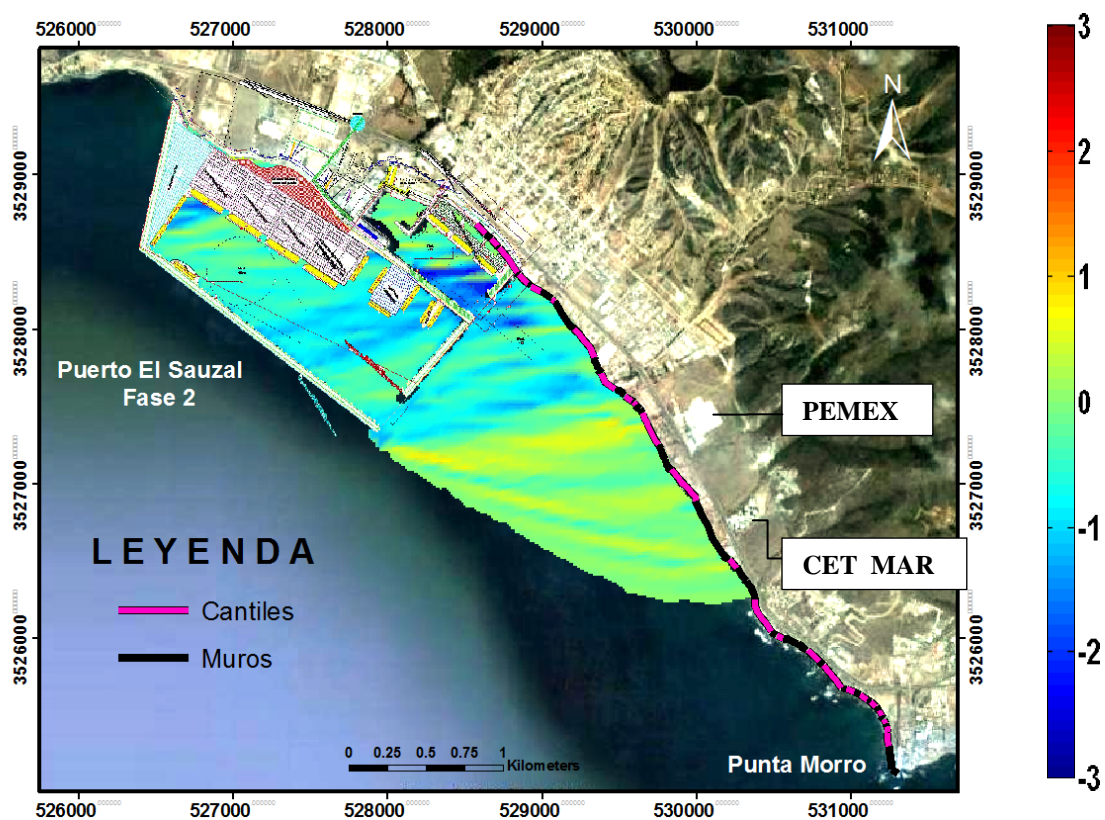


Figura 25. Incrementos de altura para el tren 1 de primavera y zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola frente a Pemex y la franja costera entre la refinería y el CET del Mar.

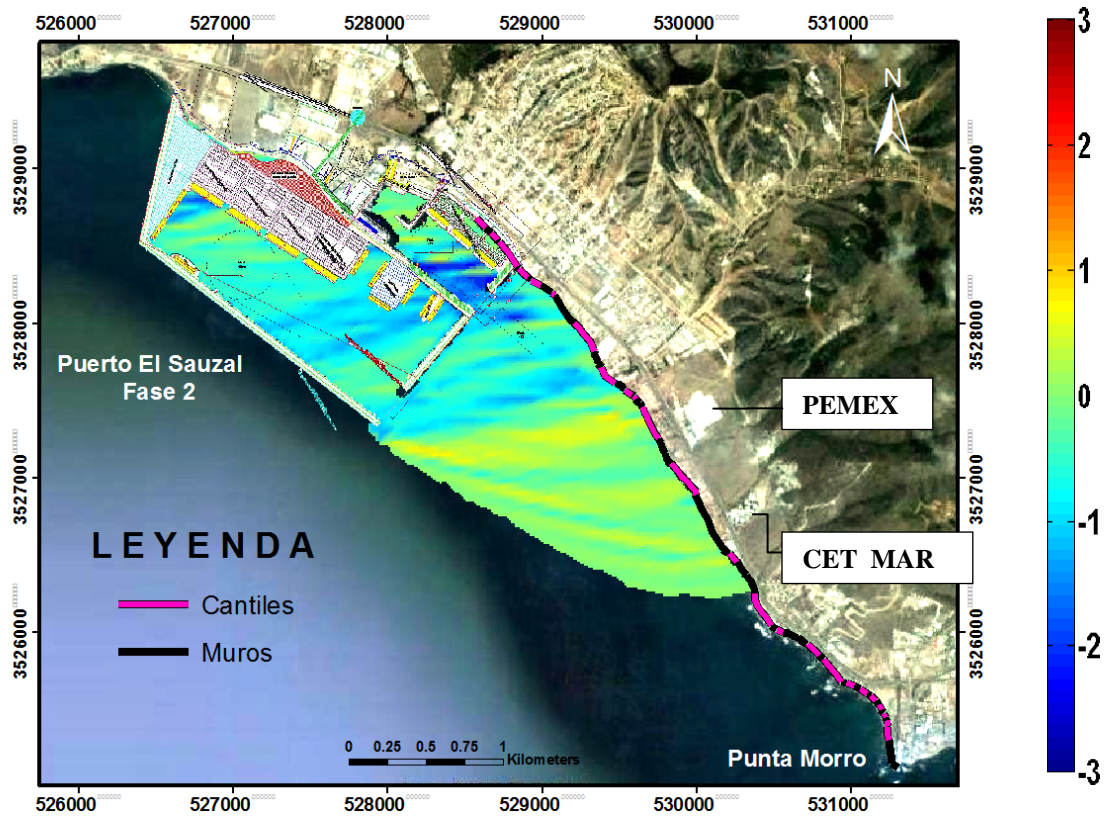


Figura 26. Incrementos de altura para el tren 1 de verano y zonas con cantiles expuestos o protegidos por un muro. Se observa incremento de altura de ola frente a Pemex y la franja costera entre la refinería y el CET del Mar.

DISCUSIÓN

El principal agente causante de los cambios en la zona costera es el oleaje, ya que dependiendo de su energía puede formar hermosas playas u ocasionar resultados muy negativos.

La determinación de sus características a largo plazo requiere realizar mediciones extensas y cuidadosas en direcciones, longitudes, alturas y periodos de olas a lo largo de varios años, para que la información obtenida sea confiable y los recursos invertidos proporcionen resultados suficientes para poder llevar a cabo predicciones a futuro con un grado aceptable de seguridad (Guillén-Sánchez, 1998).

Sin embargo, aunque lo óptimo es tener bases de datos de periodos de tiempo largo (orden de décadas), estas mediciones son objeto de una labor larga, continua y costosa. Por lo que en la mayoría de los casos, una vez que se presenta la necesidad de llevar a cabo la construcción de cualquier estructura oceánica o costera, es casi imposible retrasarla por más de 7 u 8 meses, por lo que es también de utilidad usar bases de datos existentes o realizar mediciones por periodos de tiempo cortos (meses o pocos años) (Martínez-Díaz de León et al., 1989).

Por lo expresado anteriormente es que en este trabajo se utilizó la climatología de oleaje propuesta por Reyes-Cisneros (2007) basada en 7 años de mediciones.

El uso de los modelos numéricos lineales nos permite tener una buena aproximación de las posibles modificaciones del oleaje al arribar a la costa bajo ciertas condiciones establecidas.

A medida que las olas se aproximan a la costa, los factores de la variación del fondo y las fronteras (playas, estructuras costeras) se hacen presentes, trayendo como consecuencia fenómenos como la refracción y la difracción. Debido a la alta no linealidad de estos fenómenos, su estudio resulta ser matemáticamente muy complicado.

Al inicio de los resultados se muestra la simulación del campo de oleaje en la zona de estudio en condiciones actuales y condiciones fase 2. La matriz base que se usó como malla de propagación fue de 166x157 puntos (considerada como malla gruesa), aunque el modelo soporta una malla de hasta 400x400 puntos (considerada como malla fina).

Inicialmente las corridas fueron con base en la malla gruesa, sin embargo la diferencia entre usar una malla gruesa y una malla fina radica en que con la malla gruesa, DX y DY (Figura 27) son valores grandes ya que la cantidad de puntos que compone a la malla es menor, es decir, DX y DY incrementan inversamente proporcional al número de puntos de la malla.

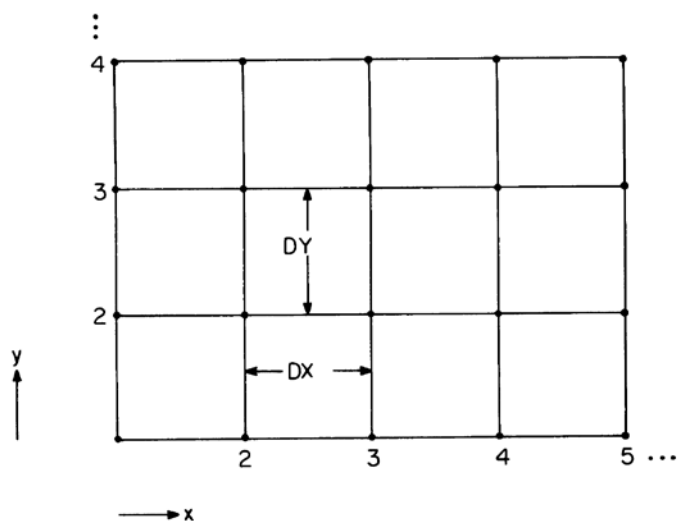


Figura 27. Malla de referencia usada por el REFDIF1. Modificada de Documentation and User's Manual (Kirby y Dalrymple, 1994).

Es recomendable modelar sobre una malla fina, ya que al haber mayor número de puntos el oleaje se desplaza de mejor manera y muestra modificaciones que quizá con una malla gruesa no se observarían.

Considerando lo anterior, se hizo un segundo set de corridas bajo las mismas condiciones pero con base en una malla fina. A pesar de la diferencia de puntos entre mallas se observó que la propagación del oleaje se comportó de la misma manera, ya que en ambos casos las mayores alturas que se presentan son aproximadamente de 1 m y se concentran en las mismas zonas. Las figuras 28 y 29 muestran un ejemplo de la comparación entre las modelaciones con malla fina y con malla gruesa.

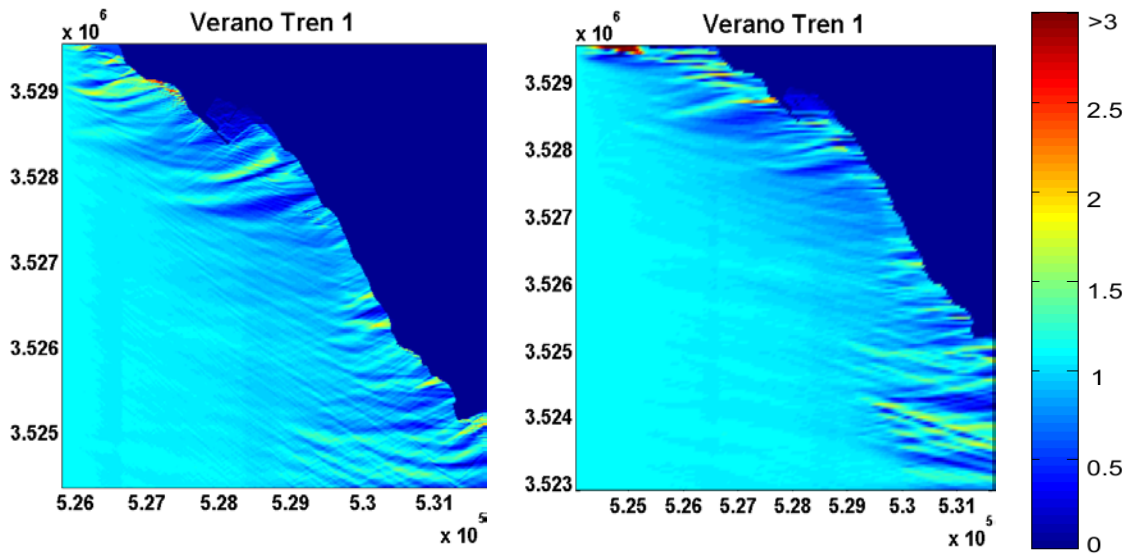


Figura 28. Alturas de ola en condiciones normales para las dos mallas usadas. La imagen de la izquierda corresponde a la malla fina y la de la derecha a la malla gruesa.

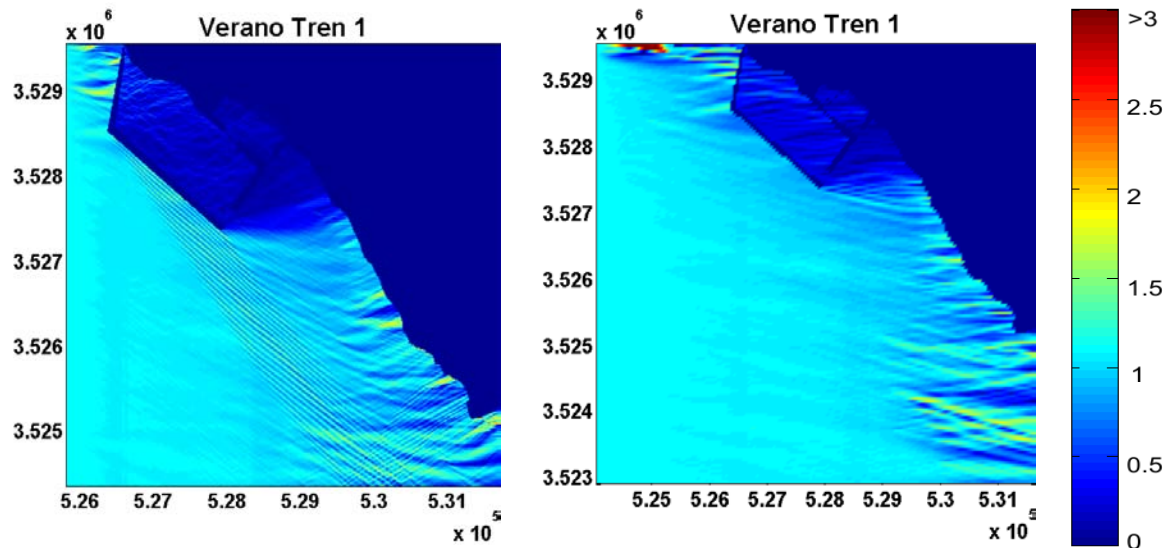


Figura 29. Alturas de ola en condiciones fase 2 para las dos mallas usadas. La imagen de la izquierda corresponde a la malla fina y la de la derecha a la malla gruesa.

El hecho de que en este trabajo se presenten los resultados con base en una malla gruesa se debe a que al utilizar la malla fina el modelo arrojó errores, esto se observó en las corridas de todas las temporadas para condiciones fase 2.

El error se muestra como una difracción del oleaje al tocar el rompeolas, la cual se propaga hacia la frontera inferior y en algunos casos hacia la frontera superior, es decir, pareciera que el modelo no está considerando que las fronteras estén abiertas. Para las corridas de primavera e invierno el error fue más notorio (Figura 30).

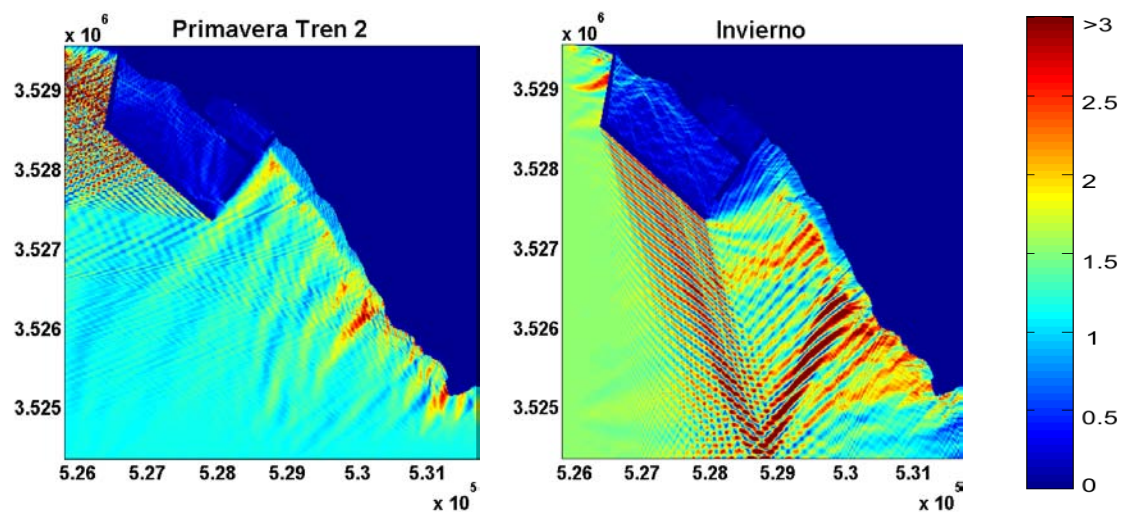


Figura 30. Se muestra la difracción (rojo intenso) del oleaje al tocar el rompeolas usando la malla fina.

A medida que las olas se aproximan a la costa, los efectos de la variación del fondo se hacen presentes. La ola que originalmente se desplazaba sin restricciones relativas a la profundidad, comienza a ser frenada por fricción con el fondo; esta fricción trae como consecuencia fenómenos como someramiento, refracción, reflexión y ruptura. Además, la interacción de la ola con las fronteras (playas, paredes, rompeolas) genera a su vez difracción y disipación de energía (Silva, 2004).

Las modelaciones de oleaje se realizaron utilizando el modelo numérico REF2DIF1, por ser un modelo que incluye refracción y difracción, es relativamente fácil de manejar y eficiente para modelar la propagación del oleaje.

Cada modelación de los campos de oleaje establecidos en la metodología arrojó diferentes resultados que se traducen en diferentes alturas de ola para diferentes zonas de la costa. Es importante recordar que el objetivo de este trabajo es establecer la modificación de la dinámica costera actual, por lo tanto las discusiones estarán enfocadas en los resultados que representan la diferencia entre las alturas del oleaje antes y después de la construcción de las estructuras.

Las zonas donde el campo de oleaje no se ve afectado por la ampliación del puerto se muestran en color verde, es decir, el valor de altura de ola es cero. En contraste con las zonas donde se incrementa (valores positivos) o disminuye (valores negativos) la altura de las olas (Figura 13, 14, 15 y 16). Por

ejemplo, en la zona aledaña al puerto el incremento en la altura de ola oscila entre 0.5 y 1 m lo que se traduce en un incremento, mientras que dentro de la rada portuaria los valores están por debajo de cero, es decir la altura de ola disminuye.

En todas las épocas del año bajo condiciones del tren 1, las estructuras de ampliación modifican el campo de oleaje sólo en la región Sur del puerto, esto se debe a la forma como se está aproximando el oleaje a la zona y la difracción del mismo al tocar el rompeolas. Para todos los trenes 1, la dirección de incidencia del oleaje es del Noroeste (NW), como respuesta a esto el oleaje al chocar con el morro del rompeolas se difracta hacia el Sur.

Lo contrario sucede para el tren 2 de cada estación, donde la mayor modificación de oleaje se observa en la región Norte del puerto, ya que la altura de la ola se incrementa entre 0.5 y 0.8 m en la zona Norte inmediata al rompeolas. También se observan incrementos de altura de la ola en la zona Sur pero sólo en la región inmediata a las estructuras. De igual manera, se debe a la dirección de aproximación del oleaje ya que para estos casos proviene del Suroeste (SW) siendo difractado hacia el Sur por el morro del rompeolas mientras que la difracción hacia el Norte se da por el brazo principal del rompeolas.

Aunque aparentemente el incremento en la diferencia de alturas antes y después de la ampliación del puerto en la zona Sur del recinto, es el mismo para todas las épocas, entre 0.7 y 1 m, en invierno se observa mayor difracción

de oleaje hacia el Sur, en contraste con el verano que es la época que presenta la menor difracción.

Primavera y otoño muestran un patrón de difracción muy parecido entre ellas, son consideradas épocas de transición porque en otoño los valores de altura de la ola van incrementando desde 0.6 m hasta alcanzar el valor máximo en invierno que es de 1 m, mientras que en primavera disminuyen de 0.7 m hasta alcanzar el valor mínimo aproximado que es de 0.4 m en verano.

De acuerdo a los datos utilizados y los resultados, durante la temporada invernal se presenta el oleaje con mayor altura, ya que en condiciones actuales se presenta una altura significativa de 1.5 m aproximadamente (Tabla II) y en los resultados se muestran incrementos de casi 1 m después de la ampliación del puerto (Figura 13).

Durante invierno se presenta la mayor difracción del oleaje en la zona de estudio. El contraste es el oleaje de verano, el cual presenta las menores alturas, la menor energía y según los resultados, el menor incremento de la altura de ola y difracción al chocar con el rompeolas del puerto. Según Komar (1998) a este tipo de oleaje se le caracteriza como oleaje constructivo, ya que prevé de sedimento a la playa.

La importancia de la difracción del oleaje estriba en el hecho de que virtualmente todas las estructuras marinas se construyen en aguas bajas o intermedias, donde las olas sufren considerables cambios debido al efecto de refracción. Es de gran importancia considerar los fenómenos de refracción y

difracción cuando se piensa en la construcción de estructuras marinas, ya que el cambio en el patrón del oleaje puede causar un efecto de concentración de energía de forma tal que unas zonas de la costa pueden estar sometidas a condiciones más severas del oleaje que otras.

Las playas naturales en una bahía son excelentes disipadoras de la energía del oleaje (Guillén-Sánchez, 1998). En la zona de estudio se tienen 3 tipos de playas, arenosa, rocosa y de basalto (Figura 17). La arenosa se localiza inmediatamente al Sur del puerto en el sitio conocido como *Stacks*, una playa que actualmente se utiliza con fines recreativos y donde se practica el surf por mantener condiciones de oleaje ligeramente altas.

Existen otras zonas a lo largo de la franja de El Sauzal donde también se localiza arena pero no de forma predominante, por lo que se puede decir que *Stacks* es la única playa plenamente arenosa en toda la zona de estudio. Es importante mencionar que con la ampliación del puerto esta playa va a desaparecer, ya que se encuentra ubicada dentro del terreno designado para la ampliación.

La playa rocosa es la que predomina en la zona, se localiza desde el límite Sur de *Stacks* hasta la curva anterior a la punta donde se ubica el hotel Las Rosas. A partir del hotel Las Rosas hasta poco antes de Punta Morro predominan derrames basálticos, para después predominar de nuevo los cantos rodados (Figura 31).

Desde el puerto El Sauzal hasta cerca de Punta Morro, la playa es angosta y rocosa. Su geomorfología está dominada por cantiles marinos compuestos básicamente de arenisca, aluvi3n, lutitas y en la zona Sur de derrames basálticos como base del cantil (Figuras 19, 20 y 32).



Figura 31. Tipos de playa en la zona de estudio. Se muestra la playa de Stacks (A) vista de Norte a Sur, playa rocosa entre el puerto y el hotel Las Rosas vista de Sur a Norte (B) y de Norte a Sur (C) y la zona donde comienza la playa de basamento en la curva anterior al hotel Las Rosas (D).

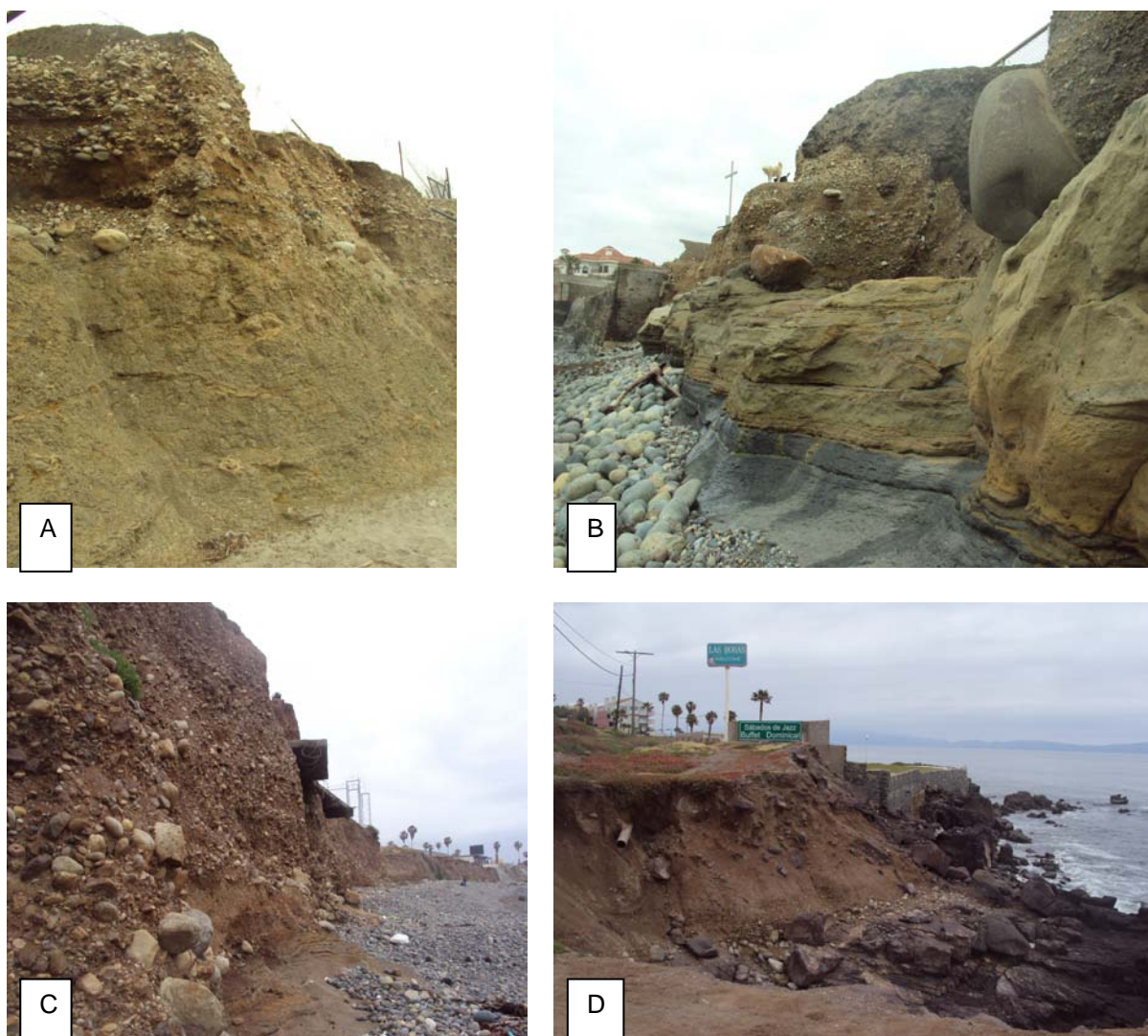


Figura 32. Litología de los cantiles en la franja costera del Sauzal. Cada fotografía corresponde a las columnas estratigráficas descritas en los resultados, columna 1 (A) columna 2 (B) columna 3 (C) y columna 4 (D).

La zona de estudio corresponde a la zona Sur de la celda litoral I de las IV celdas que se tienen identificadas en la BTS. En esta zona Sur, la información existente indica que los procesos erosivos dominan sobre los procesos de depositación o acreción. El incremento en la construcción de

muros que se ha dado en los últimos 10 años (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009) es una clara evidencia de esto.

Quizá el hecho de que en El Sauzal dominen los procesos erosivos sobre los de depositación no sería problema si olvidáramos que en El Sauzal los desarrollos industriales y urbanos se encuentran ubicados sobre los cantiles marinos (Figura 33).



Figura 33. Infraestructura construida sobre los cantiles marinos en la franja costera del Sauzal. Los polígonos azules delimitan las zonas desarrolladas. Como se puede observar la costa de El Sauzal está desarrollada casi en su totalidad.

Para mitigar la erosión, muchas de las personas que habitan sobre cantiles se han visto en la necesidad de construir obras de protección en la base del cantil para proteger su infraestructura. Las obras de protección utilizadas son muros cuyo objetivo de construcción es evitar el retroceso de la línea de costa. Existen alrededor de 20 muros de dimensiones y características diversas sobre la franja costera de El Sauzal (Figura 21).

A pesar de que la mayoría de las obras construidas en la bahía presentan un grado de funcionalidad intermedio y una condición física aceptable, los muros presentan problemas diversos por lo que no son la mejor opción de protección ya que no son del todo funcionales y solo benefician un área limitada, evitan el aporte de sedimento del cantil a la playa e incrementan la erosión en zonas adyacentes.

De acuerdo a Guardado-France (1997), el concepto de funcionalidad debe ser entendido como un concepto único que indique si una obra cumple o no con el objetivo de su construcción y si es la obra más apropiada para cumplir con ese objetivo, así como su estado físico.

Las diferencias entre las alturas del oleaje antes y después de la construcción de las estructuras marinas en el puerto de El Sauzal (Figuras 13, 14, 15 y 16) muestran que estas estructuras modifican el patrón de oleaje principalmente hacia el Sur del puerto, ya que el oleaje se difracta al encontrarse con el rompeolas de ampliación. De tal forma que, esta difracción

en conjunto con factores como la dirección de arribo del oleaje modifican los procesos costeros, lo que puede repercutir en erosión costera.

Debido a esto, la zona de estudio es muy vulnerable a los impactos que podrían generarse por la ampliación del puerto, ya que estará sujeta a fragmentación por cambio de uso de suelo y alteraciones en los procesos costeros (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009).

Sin embargo, no toda la zona de estudio se verá afectada por la ampliación del puerto. De acuerdo a los resultados presentados en el apartado *campo de oleaje en la zona de estudio* (Figura 13, 14, 15 y 16), sólo se presentan incrementos en la altura de la ola hasta la zona donde se encuentra ubicado el hotel Las Rosas, al Sur del puerto y es durante la temporada de invierno (Figura 13).

Por lo tanto, se puede establecer que la zona donde se ubica este hotel sería el límite del área que resultaría afectada (Figura 35), es decir, cualquier impacto o modificación sobre la línea de costa debido al incremento en la altura de la ola, ocurrirá en la franja costera del puerto de El Sauzal hasta el hotel Las Rosas.

De toda la zona de estudio, los cantiles más susceptibles a la erosión son precisamente los que se encuentran en la curva anterior a donde se ubica el hotel Las Rosas. Esto se debe a que el material que los compone está pobremente consolidado (Figura 19 (columna 1)), la playa es de basalto (Figura

17) que no amortigua la energía del oleaje y la ausencia de muros que evitan el embate de las olas sobre la base del cantil.

Actualmente, en esta zona la erosión causada por el oleaje en la base de los cantiles ha ocasionado derrumbes, dañando incluso la infraestructura vial y se ha requerido llevar a cabo diversas reparaciones a lo largo de los últimos 10 años (Figura 34).



Figura 34. Cantiles activos en la curva anterior al hotel Las Rosas (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010).



Figura 35. Punta donde se localiza el hotel Las Rosas. Esta zona corresponde al límite del área que resultaría afectada debido a las modificaciones del oleaje (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010).

Durante primavera, verano y otoño se verán afectadas las zonas que se encuentran frente a la refinería de Pemex (Figura 36) y el CET del Mar (Figura 37), aunque en las dos zonas el incremento de altura del oleaje oscila entre 0.5 y 1 m, la diferencia es que frente a Pemex la mayoría de los cantiles están expuestos mientras que en el CET del Mar la mayoría están protegidos por un muro (Figuras 24, 25 y 26).

Los cantiles de las zonas propensas a erosión son cantiles frágiles ya que el sedimento que los compone en la base está pobremente consolidado (Figura 20) y el tipo de playa que se encuentra en sus bases es rocosa (Figura 17) lo que permite que la acción del oleaje erosione sus bases. La unión de éstos y otros factores los hace poco estables, además la infraestructura

construida sobre ellos se traduce en presión, ya que al tener una construcción encima incrementa el peso y los hace más susceptibles a derrumbes.

A esto se suma el mal estado físico en el que se encuentra la mayoría de los muros (socavamiento en la base o en los lados, desprendimiento de bloques, etc.) que si bien no son la mejor opción de protección el hecho de estar dañados les resta funcionalidad (Figura 38).



Figura 36. Franja costera frente a la refinería de Pemex. Se muestra que casi no hay muros de protección en esa área (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010).



Figura 37. Franja costera entre la refinería de Pemex y el CET del Mar. Se muestra la presencia de un muro amplio (Modificada de Proyecto de Desarrollo del Puerto de El Sauzal, Baja California, 2010).



Figura 38. Ejemplos de los principales problemas que presentan los muros del Sauzal.

Otro factor que es importante mencionar es la falta de drenaje adecuado en la zona, ya que el agua de desecho de varias viviendas se vierte sobre los cantiles generando humedad y agregando inestabilidad al sedimento (Figura 39).

Algunos cantiles presentan vegetación generalmente en sus crestas, ya sea debido a la humedad que poseen y que permite el crecimiento de hierba sobre ellos o porque los habitantes de la zona la han implementado como

jardín en sus casas. La vegetación le da estabilidad a los cantiles ya que mantiene el sedimento consolidado y no permite que se escape (Figura 40).



Figura 39. Drenaje inadecuado en lo franja costera del Sauzal. Se muestran la forma en la que los habitantes se deshacen de los desechos líquidos y la humedad que esto genera en los cantiles.



Figura 40. Presencia de vegetación sobre los cantiles en diferentes zonas de la franja costera del Sauzal.

Debido a que los cantiles son el elemento más sensible a los procesos costeros, la modificación de ellos resulta de interés por ser éstos los que determinan los patrones de erosión de la zona. Para que un cantil esté activo, es decir que presente erosión, es necesario que las olas que arriban excedan una cierta altura conocida como altura crítica y que los materiales del cantil sean susceptibles a ser erosionados por ese oleaje. De acuerdo con esto, un cantil que actualmente esté activo ya ha cumplido con esas condiciones. Por lo tanto, cualquier incremento en la altura del oleaje que arribe al pie de ese cantil

incrementará la erosión (Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal, 2009).

Actualmente, los cantiles que se encuentran en la zona de El Sauzal están clasificados como cantiles activos, es decir la altura de ola que arriba a ellos es suficiente para erosionar el material que los compone.

El Plan de Crecimiento del puerto El Sauzal es un proyecto que tiene la finalidad de hacer del puerto de El Sauzal un puerto de altura mediante una ampliación del mismo. Los resultados presentados en este trabajo muestran que dicha ampliación modificará el patrón de oleaje que arriba a la zona, difractando las olas hacia el Sur principalmente e incrementando su altura en un rango de entre 0.5 a 1 m, con respecto a la altura de ola actual.

Los cantiles ubicados en la curva anterior al hotel Las Rosas son el ejemplo más claro de erosión dentro de la zona de estudio. Si la altura de la ola actual ya excede la altura crítica, un incremento de entre 0.5 a 1 m de altura debido a la ampliación del puerto podría traer graves consecuencias, tales como acelerar el proceso de erosión que repercutiría en daños a la infraestructura de la zona.

La erosión no prevista de un cantil puede causar resultados dramáticos que se traducen en pérdidas económicas y, en algunos casos pudiendo llegar hasta la pérdida de vidas humanas. Por esta razón, es muy importante conocer la evolución de los cantiles marinos, sobre todo en áreas que se encuentran

desarrolladas o que presentan un potencial de desarrollo, como es el caso de El Sauzal.

Existen planes de manejo para zonas que presentan o están expuestas a la erosión costera, los cuales se encargan de monitorear las playas y establecer medidas para mitigar la erosión.

Considerando los resultados obtenidos en este trabajo está claro que la ampliación del puerto El Sauzal modificará la difracción actual del oleaje y con esto incrementará la erosión de los cantiles de la zona, quizá en algunas más que en otras, sin embargo, sea mucho o poco se debe implementar un programa de monitoreo de los procesos costeros en la franja costera del puerto El Sauzal-Punta Morro principalmente y se crear un plan de manejo de la erosión costera.

Aunque debe quedar claro que en una costa que presenta altas tasas de erosión de los cantiles y de retroceso de la línea de costa como es el caso de El Sauzal, cualquier alternativa de mitigación fallará eventualmente aún si se diseña de manera adecuada.

CONCLUSIONES

En todas las épocas del año bajo condiciones del tren 1, las estructuras de ampliación modifican el campo de oleaje sólo en la región Sur del puerto, debido a la dirección de aproximación del oleaje a la zona (NW) y la difracción del mismo al tocar el rompeolas. Bajo condiciones del tren 2 sucede lo contrario, la mayor modificación del campo de oleaje es en la parte Norte del puerto ya que la dirección de aproximación es SW. Estas modificaciones se traducen en incrementos de la altura de ola que oscilan entre 0.5 y 1 m en ambos casos.

En el invierno se presenta la mayor difracción del oleaje (en dirección Sur al puerto) alcanzando un incremento en la altura de ola de 1 m. En contraste, en el verano se presenta la menor difracción del oleaje presentando un incremento de altura de la ola de 0.4 m. Primavera y otoño se consideran épocas de transición.

La ampliación del puerto El Sauzal modificará el campo de oleaje actual incrementando la altura de la ola entre 0.5-1 m y difractando el oleaje principalmente hacia el Sur del puerto. Los efectos que traerán consigo estas modificaciones estarán limitados a la zona de estudio y podrían sumarse al actual proceso de deterioro de los cantiles y el retroceso de la línea de costa de El Sauzal.

La zona que limita el área que presentará modificaciones del campo de oleaje es donde se ubica el hotel Las Rosas, de tal manera que cualquier

incremento en la erosión de los cantiles ocurrirá en la franja del puerto a este hotel.

Con base en la litología de los cantiles, la presencia o ausencia de muros y el incremento de altura de la ola, la zona más afectada por la ampliación del puerto será la curva anterior al hotel Las Rosas. Sin embargo, los cantiles que se encuentran en la zona frente a la refinería de Pemex y el CET del Mar también se verán afectados.

BIBLIOGRAFÍA

- Anfuso, G. (2001). Morfología y dinámica sedimentaria del litoral gaditano entre Chipiona y Rota. Ph.D. thesis, Univ. Cádiz, 375 p.
- Ahumada-Sempoal, M. A. (1993). Corrientes litorales inducidas por oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C., México. 38 p.
- Appendini-Albrechtsen, C.M. (1998). Plan de manejo de la erosión costera para Playas de Rosarito, Baja California, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C., México.
- Appendini, C. y Fischer, D. (1998). Hazard ,management planning for severe storm erosion. *Shore & Beach*. Vol. 66(4):5-8 pp.
- Ávila-Serrano, G.E., Santa Rosa del Río, M.A., Anfuso-Melfi, G., Benavente-González, J., Guardado-France, R., González-Yajimovich, O. y Velázquez-González, E.K. (2009). Variaciones sedimentarias y transporte litoral en Playa de la Victoria, Cádiz, España. *Ciencias Marinas*. 35(3):259-269 pp.
- Bermúdez-Zavala, R.D. (1999). Diseño de un rompeolas separado de la costa como alternativa de protección en la zona de el Sauzal de Rodríguez, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 72 p.
- Coria-Méndez, P. (1991). Distribución de probabilidad de la altura significativa del oleaje y cálculo de periodos de retorno para el puerto de Ensenada, BC. México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, BC. México. 40 p.
- Cruz-Colín, M.E. y Cupul-Magaña, L.A. (1997). Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la Bahía de Todos Santos, Baja California, en el periodo de 1970 a 1991. *Ciencias Marinas*. 23(3): 303-315 pp.
- Cruz-Falcón, A. (1983). La refracción del oleaje y la determinación del error en el ángulo de aproximación. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, BC. México. 49 p.
- Dalrymple, R. A. (1988). Model for refraction of wáter waves. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 114(4): 423-435 pp.

- Dingemans, M.W. (1997). Water wave propagation over uneven bottoms: Part 1 Linear wave propagation. Singapore, World Scientific.
- Dolan, R. y Davis, R.E. (1992). An intensity scale for Atlantic coast northeast storms. *J. Coastal Research*. 16:145-152 pp.
- Espinoza-Díaz, F. (1990). Análisis de funcionalidad del puerto del Sauzal de Rodríguez BC. Pregunta problema, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, BC., México.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C., Imberger, J. y Brooks, N. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Press.
- Flores-Vidal, X., Ramírez-Aguilar, I., Czitrom-Baus, S. (2005). Simulación numérica de la hidrodinámica de un puerto y el efecto de un sistema de bombeo por energía de oleaje. *Ciencias Marinas*. 31(1A):57-77 pp.
- García-Gastelum, A. (1997). Clasificación integral del litoral costero de la Bahía Todos Santos, B.C., México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, BC. México. 81 p.
- González-Villagrán, A. (1992). Reevaluación de los estudios utilizados para el diseño del Puerto de Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 126 p.
- Guardado-France, R. (1990). Sobre los cantiles del Sauzal de Rodríguez, Baja California, México. Resúmenes VIII Congreso Nacional de Oceanografía.
- Guardado-France, R. (1997). Funcionalidad de las obras de protección costera construidas en la Bahía de Todos Santos, B.C. México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 145 p.
- Gutiérrez-de MacGregor, M.T. y González-Sánchez, J. (1999). Las costas mexicanas y su crecimiento urbano. *Investigaciones Geográficas*. Boletín 40. Instituto de Geografía UNAM. México, D.F.
- Griggs, G.B., Tait, F.J. y Corona, W. (1994). Interactions of Seawalls and Beaches: Seven Years of Monitoring, Monterey Bay, California. *Journal of the American Shore and Beach Preservation Association*, Vol. 63(2).
- Inman, D.L. (1953). Beach and Nearshore Processes along the Southern California Coast. *Scripps Institution of Oceanography*. Reference 53-35, 9 pp.

- Johnson, J.W. (1957). The Littoral Drift Problem at Shoreline Harbors. *Journal of the Waterways and Harbor Division, Proceedings of the Am Soc. of Civil Engineers*. v 83, 1211-1237 pp.
- Kirby, J. T. (1986). Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves. *Journal of Geophysical research*. 91(C1): 933-952.
- Kirby, J.T. y R.A Dalrymple. (1983). A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. *Journal of fluid mechanics*. 136. 453-466.
- Komar, P.D. (1976). *Beach Processes and Sedimentation*. 2^{da} edición. Prentice-Hall. USA, 425 p.
- Komar, P.D. y D.L.Inman. (1970). Longshore Sand Transport on Beaches *Journal of Geophysical Research*. v. 75, 5914-5927 pp.
- Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice-Hall, 544 p.
- López-Luna, M. (1990). Cuantificación del volumen de sedimento transportado por la corriente litoral en las playas, El Sauzal y pesquera Zapata, ubicadas en la zona norte de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, México.
- Lizárraga-Arciniega, R., Martínez-Díaz de León, A., Delgado-González, O., Torres, C.R. y Galindo-Bect., L.A. (2007). Alternancia de los ciclos de erosión/acreción de playa relacionados con el oleaje en Rosarito, Baja California, México. *Ciencias Marinas*. 33(3):259-269 pp.
- Longuet-Higgins, N.S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. *Journal of Geophysics Research*. 75(33): 6778-6789.
- Maa, J.P.-Y., T.-W. Hsu, et al. (2002). The RIDE model: an enhanced computer program for wave transformation. *Ocean Engineering*. 29. 1441-1458.
- Marichal-González, A.M. (2001). Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, BC, de 1994 a 1998. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 70 p.

- Martínez-Díaz de León, A., Nava-Button, C. y Ocampo-Torres, F.J. (1989). Estadística del oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C., de septiembre de 1986 a agosto de 1987. Ocean wave statistics for Todos Santos Bay, B.C., from September 1986 to August 1987. *Ciencias Marinas*, 15(3):1-20 pp.
- Medina-Enríquez, P. (1993). Anteproyecto de un modelo hidráulico del puerto del Sauzal. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, BC., México, 83 p.
- Padilla-Hernández, R. (1989). Potencia y dirección del oleaje en la costa Noroeste de la Península de Baja California y su aprovechamiento. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, BC., México, 58 p.
- Pérez-Higuera, R. y Chee-Barragán, A. (1984). Transporte de sedimentos en la Bahía de Todos Santos, B.C. *Ciencias Marinas*. 10(3): 31-52 pp.
- Radder, A.C. (1979). On the parabolic equation method for water waves propagation. *Journal of fluid mechanics*. 95(1): 159-176.
- Ramos-Olvera, R. (1993). Cantiles en la zona del Sauzal de Rodríguez: perfiles, procesos y problemas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, BC., México, 35 p.
- Renaul-Ballester, P. y García-Gutiérrez, C. (1994). Plan de desarrollo urbano, Ensenada, BC. Dirección de Desarrollo Urbano y Ecología, Departamento de Planeación, Ensenada, BC. 119 p.
- Ross, D. A. (1988). *Introduction to Oceanography*. Prentice Hall Inc. U.S.A.
- Silva, R. (2004). Manual del usuario y documento de referencia del programa WAPO2D. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Silvester, R. y Hsu, J. (1993). *Coastal Stabilization, Innovative Concepts*. PTR Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Soria-Velásquez, I. (1995). Obras de protección costera en la Bahía de Todos Santos. Unidad audiovisual. Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C.
- Shepard, F.P. (1950). Beach Cycles in Southern California. Beach Erosion Board Technical Memorandum No. 20, 26 p.

- Shepard, F.P. y D.L. Inman. (1950). Nearshore Water Circulation related to bottom Topography and Wave Refraction. American Geophysical Union Transactions, v. 31, 196-212 pp.
- Torres-Navarrete, C.R. (1986). Comparación y análisis de registros de oleaje obtenidos en una localidad al Sur de la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C. 73 p.
- Ulloa-Torres, M. J. (1989). Refracción lineal del oleaje en el puerto de Ensenada. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada, B.C.
- Vázquez-Peredo, C.A. (2007). Modelo de propagación de oleaje en coordenadas curvilíneas. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Marinas, Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Ensenada, B.C. 47 p.
- Manifestación de Impacto Ambiental Regional para el proyecto de desarrollo del puerto de El Sauzal (en línea). Resumen Ejecutivo. 2009. Dirección URL:
<http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/bc/estudios/2010/02/BC2010ID014>