

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
Facultad de Ciencias Marinas



ROMPEOLAS SEPARADO DE LA COSTA.
ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN PARA CANTILES UBICADOS
EN EL COSTADO NORTE
DEL HOTEL LAS ROSAS, ENSENADA, B.C.

T E S I S
Que para obtener el título de
OCEANOLOGO
Presenta:

Angela Ferrer Vega

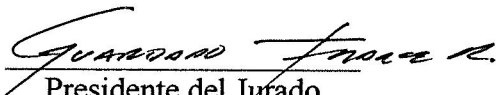
**“ROMPEOLAS SEPARADO DE LA COSTA.
ALTERNATIVA DE PROTECCIÓN PARA CANTILES UBICADOS
EN EL COSTADO NORTE
DEL HOTEL LAS ROSAS, ENSENADA, B.C. ”**

TESIS

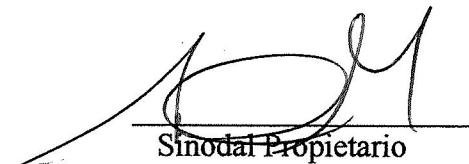
Que presenta:

Angela Ferrer Vega

Aprobada por:


Presidente del Jurado
M.C. Rigoberto Guardado France


Sinodal Propietario
DR. Rafael Hernández Walls


Sinodal Propietario
M.C. Luis Antonio Cupul Magaña

Resumen

Cuando se presentan problemas de erosión en una zona de cantiles comúnmente las alternativas de protección son los muros, gabiones y rompeolas separados de la costa. Estos últimos se construyen con el fin de mitigar la energía del oleaje que permite una depositación de sedimento tras la estructura, protegiendo la playa e inclusive haciéndola más amplia. Dentro de la Bahía de Todos Santos se encuentra una zona que presenta una alta tasa de erosión, se localiza a un costado del hotel Las Rosas, cuya litología se encuentra constituida por un cantil muy activo compuesto de aluvión, el cual soporta a la carretera federal. Por esta razón se plantea como alternativa de protección al cantil, la construcción de un rompeolas separado de la costa. De acuerdo a los estudios oceanográficos del área de estudio se encontró que el oleaje que más lo afecta es el de invierno, dando una ola de diseño con las siguientes características: 2.88 m de altura, 11.1 s de período y 300° de dirección azimutal. Con esta información se propone la construcción de un rompeolas paralelo a la costa, a una distancia de 230 m a la costa, compuesto de tres capas. El peso de los elementos de cada sección fue: 6 toneladas para la capa coraza, 700 kg para la capa secundaria y 30 kg para el núcleo.

Dedicatoria

A mi mama por apoyarme, escucharme y ayudarme en todo momento
A mi papa por siempre estar y por sus buenos consejos
A Jimena por no solo ser una buena hermana también una buena amiga

Por que aunque estaban lejos siempre estuvieron con migo.

Andres por hacer la carrera y ahora mi vida mucho mas emotiva, feliz y divertida. Por enseñarme que solo es querer.

MIANTEMU

AGRADECIMIENTOS

Rigoberto Guardado por su tiempo, su apoyo incondicional, su paciencia y excelente dirección, ya que sin el esta tesis no hubiera sido posible.
A demás por ser tan buena persona.

A mis sinodales Luis Cupul y Rafael Hernández por escucharme, por sus buenos consejos y revisar este trabajo.

A Rafael Bermúdez por todo su apoyo.

Andres por todos los momentos que le dedico con migo a esta tesis.

y todos los que participaron en este trabajo.

A la Facultad de Ciencias Marinas por las enseñanzas de cada uno de mis maestros.

A Lau por todos los momentos y experiencias tan divertidas.

Y todos los demás amigos de Ensenada con los que aprendí a disfrutar y compartir ratos increíbles.

A Livier y Amaya por que a pesar de la distancia nada cambio.

A Ensenada y al Océano por enriquecer mi vida.

Índice

Lista de figuras	I
Lista de tablas	II
1.Introducción	1
2. Objetivo	5
3.Antecedentes	5
3.1 Antecedentes generales.....	5
3.2 Antecedentes particulares.....	7
4. Área de estudio	11
Delimitación.....	11
5.Metodología	13
5.1 Transformación de los datos de oleaje.....	13
5.1.1oleaje.....	13
5.2 Batimetría.....	14
5.3 Análisis de Refracción.....	14
5.4 Pendiente de la cara de la playa.....	16
5.5 Niveles de agua	16
5.6 Diseño de la estructura.....	16
5.6.1 Altura rompiente.....	17
5.6.1.2Profundidad de rompiente.....	17
5.6.2. Pendiente de la playa.....	18
5.6.3 Peso de los elementos.....	18
5.6.4 Talud de la estructura.....	19
5.6.5 Ancho mínimo de la corona.....	19
5.6.5.1Ancho mínimo de la capa secundaria.....	20
5.6.5.2 Ancho mínimo del núcleo.....	20
5.6.6 Run Up (Ru) y Run Down (Rd).....	21
5.6.7 Numero de elementos.....	22
5.6.8 Altura de ola necesaria para mover el material.....	22

5.6.9 Analisis granulometrico del sedimento que compone los cantiles y la playa.....	23
5.6.10 Orientación, longitud de la estructura y distancia a la costa.....	23
5.6.11 Porcentaje de daño.....	24
6.Resultados.....	25
6.1 Oleaje.....	25
6.2 Batimetría.....	28
6.3Refracción.....	30
6.4 Niveles de agua.....	33
6.5Altura rompiente y Profundidad de rompiente.....	33
6.6 Perfiles de la cara de la playa.....	35
6.7 Sedimentos en la playa.....	39
6.8 Diseño Estructural de la obra.....	39
6.8.1 Características del diseño de la obra.....	39
6.8.2 Orientación, longitud de la estructura y distancia a la costa.....	42
6.8.3 Porcentaje de daño.....	42
7.Discusión.....	44
8.Conclusión.....	50
9.Referencias.....	51

Lista de figuras

Figura 1. Transporte litoral en la Bahía de Todos Santos.....	7
Figura2. Corrientes litorales en la Bahía de Todos Santos.....	8
Figura 3. Localización del área de estudio.....	12
Figura 4. Histograma de direcciones predominantes.....	25
Figura 5. Histograma de alturas significantes.....	26
Figura 6. Direcciones predominantes de arribo para la zona de Las Rosa.....	27
Figura 7. Rasgos batimétricos de la zona de estudio.....	29
Figura 8. Diagrama de refracción para $H_o=1.5\text{m}$, $T_s=11.1$ y 300o	30
Figura 9. Diagrama de refracción para $H_o=5\text{m}$, $T_s=12.5$ y 285o	31
Figura 10. Diagrama de refracción para $H_o=5\text{m}$, $T_s=14.3$ y 290o	32
Figura 11. Diagrama de los perfiles del área de Las Rosas.....	36
Figura 12. Perfil 1 de la cara de la playa.....	36
Figura 13. Perfil 2 de la cara de la playa.....	37
Figura 14. Perfil 3 de la cara de la playa.....	37
Figura 15. Perfil 4 de la cara de la playa.....	38
Figura 16. Perfil 5 de la cara de la playa.....	38
Figura 17. Sección transversal del rompeolas.....	41

Lista de tablas

Tabla I Porcentaje de daño.....	24
Tabla II Resumen de los datos de oleaje.....	28
Tabla III Altura de mareas reportadas para Ensenada.....	33
Tabla IV Datos para el calculo de Hb.....	34
Tabla V Profundidad de rompiente db.....	34
Tabla VI Ángulos y pendientes de cada perfil.....	35
Tabla VII Parámetros para el diseño de la estructura.....	40
Tabla VIII Pesos (w) para cada cantil.....	41
Tabla IX Porcentaje de daño para diferentes alturas.....	42

1. INTRODUCCIÓN

Las costas son uno de los ambientes más dinámicos en nuestro planeta. A simple vista parecen lugares tranquilos y placenteros para vivir, debido a sus paisajes y al importante papel económico que representan, principalmente como zonas de uso habitacional, de recreación e industrial. Sin embargo son afectados por diversos factores que generan cambios en su morfología. Entre estos factores se incluyen los cambios en el nivel del mar, el régimen de mareas, aporte de sedimentos, tormentas periódicas y en las últimas décadas el acelerado crecimiento de las actividades humanas. La construcción de infraestructura, se ha convertido en un factor muy importante de perturbación de los procesos costeros (Edgren 1993, Appendini y Fisher, 1998).

Unos de los principales inconvenientes de vivir en la costa son los problemas asociados a la erosión debido principalmente a la acción del oleaje. El conocimiento de las razones de erosión en periodos largos, nos permite visualizar los posibles cambios en la línea de costa. Una de las formas costeras más comunes son los cantiles, o sea, las pendientes abruptas que bordean las costas, su inclinación los hace parecer muy angostos vistos de planta, se encuentran aproximadamente en el 80% de las costas del mundo (Emery, K.O. y Kuhn, G.G. 1982, tomado de Ramos 1993) y representan una importante fuente de sedimento a la zona costera pasando de episodios de actividad a episodios de inactividad y viceversa. La cantidad de material sedimentario que es aportado por estos al sistema litoral, ayuda a mantener el balance sedimentario de la zona costera, mismo que se ve reflejado en la formación o erosión de las playas (Komar 1976).

Tradicionalmente cuando se presenta un problema de erosión en una zona de cantiles, y se requiere proteger infraestructura, las alternativas de protección son, principalmente, la construcción de muros, revestimientos y gabiones así como rompeolas separados de la costa y el uso combinado de alguna de estas modalidades

con relleno artificial para restaurar y mantener el ancho de la playa. (Shankar et al, 1996).

Sin embargo, no siempre la construcción de una obra de protección es sinónimo de seguridad, puesto que pueden interferir con la circulación del agua y sedimento, produciendo erosión en algunas zonas y deposición en otras (Edge, *et al*, 1994) citado en Guardado – France, 1997. Por ello, previo a la construcción de la obra, es necesario realizar un estudio en el área para identificar los problemas ya sean erosión o deposición y pronosticar el efecto causado por la estructura; además de que ya construidas, deben aplicarse programas de monitoreo de las obras. De esa forma se podrá mantener la zona protegida (Guardado- France, 1997).

Una de las obras más comunes para disminuir la erosión costera son las paredes que son estructuras de pendiente casi vertical que protegen a la costa de la erosión del oleaje, generalmente se construyen donde hay cantiles, y su efecto protector se limita al área inmediata tras el muro (Shore Protection Manual, 1984)

Los rompeolas separados de la costa, a diferencia de las paredes que protegen sólo una porción de la costa pueden ser construidos como una sola estructura o en una serie de rompeolas pequeños. Una sola estructura es usada para proteger una porción de costa, mientras que una serie de estructuras protege un área más extensa de la misma.

Estas estructuras se construyen con el fin de mitigar la energía del oleaje lo que permite una deposición de sedimento tras la estructura, protegiendo la playa e inclusive haciéndola más amplia.

Existe una gran variedad de tipos y formas de rompeolas separados de la costa, los cuales se clasifican por su geometría:

- a) De talud con pendientes tales que disipen el oleaje.
- b) De pared vertical, este tipo de estructura no permite que la ola rompa mas bien que se refleje.

- c) Elementos artificiales como: Tetrápodos, bloques de concreto y otros elementos prefabricados.
- d) Sumergidos ya sea de geotextil o enrocamiento

Cuando se construye un rompeolas es importante tomar en cuenta la respuesta que va a tener la playa frente a éste y cómo va a evolucionar en el tiempo, además de considerar el tipo de forma costera que se desea generar. Existen tres posibles respuestas ante la presencia de un rompeolas separado de la costa; formación de salientes, tómbolos o la posibilidad de que no exista cambio alguno. Las salientes se presentan cuando la estructura se encuentra relativamente separada de la costa, de tal manera que los patrones de difracción tras la estructura generan corrientes litorales en sentidos opuestos y cuando convergen propician la depositación de sedimento, sin embargo, esta saliente no se une con la estructura. Los tómbolos tienen un origen similar al de las salientes, pero en este caso sí existe una unión entre la forma costera y el rompeolas.

En caso de que el rompeolas se construya suficientemente lejos de la costa, no se presentará respuesta alguna en la playa, ya que por la lejanía del rompeolas no se verán afectados los procesos hidrodinámicos en la misma.

Es importante considerar que en caso de que se genere una saliente o un tómbolo, se debe tomar en cuenta el posible efecto erosivo corriente abajo ya que parte del sedimento transportado por la corriente litoral será atrapado en estas formas costeras.

En el caso de la costa noroccidental de Baja California la mayoría de los desarrollos turísticos, industriales y urbanos se encuentran ubicados sobre cantiles marinos, los cuales son susceptibles a ser erosionados por la acción del oleaje en su base y por agentes sub-aéreos en su cresta (Cruz- Colin y Cupul -Magaña, 1997). Debido a esto, ha sido necesario proteger algunas zonas construyendo paredes. Sin embargo, en su mayoría esas obras han sido mal diseñadas y no cumplen

correctamente su objetivo, poniendo en riesgo las propiedades aledañas. (Bermúdez, 1999).

Dentro de la Bahía de Todos Santos, al costado norte del hotel Las Rosas, se localiza una playa angosta compuesta por una serie de cantiles activos que miden aproximadamente entre 4 y 5 m de altura, los cuales están conformados de sedimento tipo aluvión principalmente limos y arcillas. El material aportado por estos es muy fino y es puesto en suspensión debido al transporte de las olas y, por lo tanto, no se presenta material formador de playa en este sitio. (Cruz- Colin, 1994)

De acuerdo a lo anterior y a la razón de retroceso de la línea de costa que es de 1.54 m/año (Cruz- Colin, 1994), la playa presenta serios problemas de erosión; la salpicadura del oleaje es suficiente para humedecer el cantil y acelerar el proceso erosivo, poniendo en riesgo la carretera federal, que está construida sobre dichos cantiles y es la única vía de comunicación por el lado norte a la ciudad de Ensenada. Por esta razón este trabajo plantea como alternativa de protección al cantil y seguridad a la carretera el diseño preliminar de una obra de protección costera.

Promoviendo como alternativa la construcción de un rompeolas separado de la costa para disipar la energía del oleaje y evitar los posibles daños.

2. OBJETIVO

Diseñar un rompeolas separado de la costa como alternativa de protección, para reducir la tasa de erosión de la zona de cantiles, ubicados en el costado norte del Hotel las Rosas en el Sauzal de Rodríguez B.C.

3. Antecedentes Generales

Actualmente, de los 125 países con costas, la mayoría sufre de problemas de erosión que resultan en pérdidas económicas y sociales considerables. (Appendini, 1998)

El gran desarrollo de las zonas costeras en el mundo durante el siglo pasado junto con el aumento relativo del nivel del mar, llevó a la preocupación por protegerlas de la acción erosiva del oleaje. Como resultado, se tuvo un avance en el desarrollo de las obras de protección.

El Shore Protection Manual (1984) realiza un estudio preliminar tendiente a desarrollar una metodología que sirva para evaluar la condición física de rompeolas separados de la costa con el objetivo de implementar un programa de mantenimiento. El estudio es una recopilación de información sobre problemas que se presentan en rompeolas separados de la costa y enfatiza la importancia de diseñar una técnica adecuada para evaluar la condición física de este tipo de obras.

Dally, W. R. Y J. Pope (1986) realizan un estudio de los rompeolas como obras de protección y proponen que la longitud de la obra puede ser del doble de la que existe entre estos y la costa.

Mansard (1990) aplica un modelo físico a los rompeolas separados de la costa contruidos con roca, concluyendo que para su diseño se debe considerar la estabilidad hidráulica así como la integridad estructural de las rocas de la coraza.

Chasten, *et al.*, (1993) (citado en Bermúdez, 1999) elabora una guía ingenieril para el diseño de rompeolas separados de la costa como estructuras de estabilización. Propone métodos de construcción, monitoreo y evaluación de otras técnicas, con base

en los rompeolas separados de la costa existentes en Estados Unidos, Japón, España, Dinamarca y Singapur.

En México, fue hasta los años treinta del siglo pasado cuando se hicieron los primeros estudios para determinar las medidas, cantidades y formas adecuadas para la construcción de las obras de protección (rompeolas, escolleras, espigones), tomando en cuenta los factores que los pudieran afectar. La mayoría de las obras de protección consiste actualmente en capas de roca natural de diferentes tamaños, protegidas por una o más capas de roca de un peso mayor, colocadas con precisión para obtener secciones de forma trapezoidal, cuyo diseño y dimensión se basa en la fórmula de Hudson modificada (Ruiz, *et al.*, 1999 citado en Bermúdez 1999).

Appendini - Albrechtsen (1995) hace una recopilación de trabajos realizados por diversos autores y elabora lo que denomina "manual para el diseño de rompeolas separados de la costa como obras de protección costera". En este manual se presentan de manera clara y sencilla los aspectos básicos del diseño empírico de rompeolas separados de la costa.

3.1 Antecedentes Particulares

El Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), apoyados con las tablas de predicción de mareas publicadas por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), obtuvieron los planos de mareas para Ensenada, donde la marea pleamar máxima registrada es de 1.47 m mientras que la marea mínima registrada es de -2.902.

Plaza - flores (1979) menciona que la elevación del mar máxima reportada es de 2.60 m

Mendez- Arriaga (1982) reporta que la parte norte de Ensenada, compuesta de acantilados y playas rocosas presenta un transporte litoral neto hacia el Sur. En la parte sur (la barra del estero) el transporte es hacia el norte convergiendo en la parte central de la Bahía frente a la dársena del Puerto de Ensenada. (figura1)

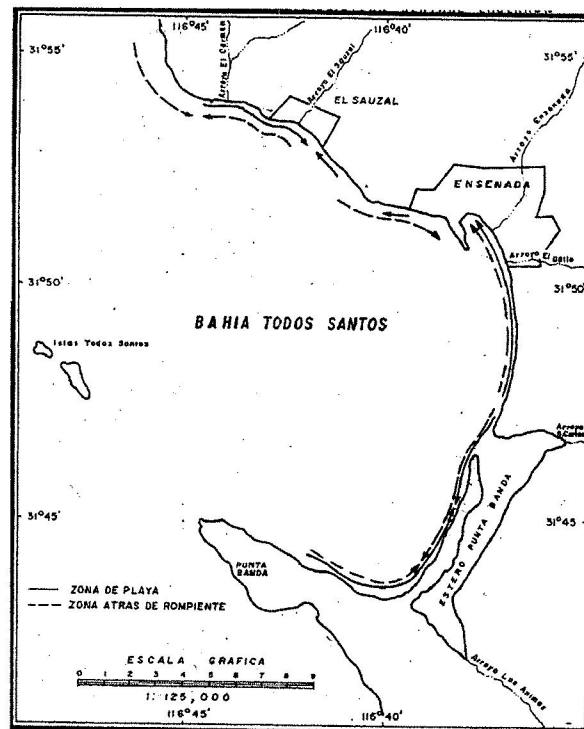


Figura 1. Transporte litoral en la Bahía Todos Santos

(Tomada de Méndez Arriaga 1982)

Ahumada -Sempoal (1993), realiza un estudio sobre las corrientes en la Bahía Todos Santos reportando que se presentan dos tipos de corrientes, la corriente litoral y la corriente superficial.

La dirección predominante de la corriente litoral al Norte de la BTS es hacia el Sur con magnitud promedio de 55.4 cm s^{-1} en verano y 98.3 cm s^{-1} en invierno. En la parte central existe un área de convergencia donde son invertidas las corrientes y en la parte Sur, la dirección es hacia el Norte hasta la rada del puerto de Ensenada Ahumada- Sempoal (1993), (Figura 2.).

Las corrientes superficiales son variables de septiembre a enero cuando los vientos reinantes son débiles con una intensidad de 2-3 m/s la corriente superficial es lenta, con un desplazamiento neto hacia la costa de 5-8 cm/s. Sin embargo entre los meses de marzo y agosto los vientos reinantes son de intensidad de 5-6 m/s. y mucho mas persistentes. La corriente superficial tiene una rapidez promedio de 15 cm/s. con un máximo de 40 cm/s. Esta misma tiene un comportamiento hacia lo largo de la costa. Ahumada- Sempoal (1993)

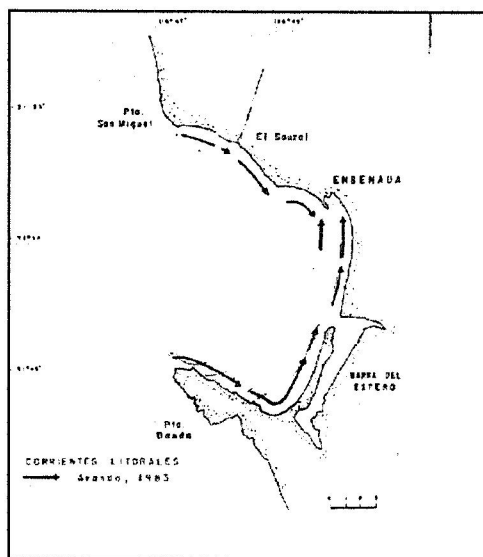


Figura 2. Corriente Litoral en la Bahía Todos Santos

(Tomado de Ahumada-Sempoal, 1983)

Ramos- Olvera (1993) realiza un estudio descriptivo de los cantiles costeros que se encuentran en la zona del Sauzal de Rodríguez mencionando que se clasifican como activos, ya que presentan una continua erosión y contribuyen con material sedimentario al sistema litoral.

Soria- Velásquez (1995) realiza un video sobre la condición física que presentan las obras de protección construidas en la Bahía de Todos Santos. Concluye que la mayoría de estas obras se encuentran en mal estado y menciona la falta de programas de mantenimiento.

Miranda – Vera (1995) describe el oleaje que se presenta en la Bahía Todos Santos reportando que generalmente tiene una dirección Noroeste en invierno y del Suroeste en verano. La altura de ola significativa es del orden de 3.0 m y la media de 1.8 m. La época del año en la cuál se presenta el oleaje con mayor energía es invierno, coincidiendo con el ciclo de tormentas que se presenta en estos meses.

Cruz-Colin y Curul- Magaña (1997) reportan una razón de retroceso de .97 m/año y un aporte sedimentario de 13.996 m³/año, en los cantiles del Sauzal siendo los que presentan la más alta razón de retroceso en la Bahía de Todos Santos.

Guardado- France (1997) realiza una evaluación de la funcionalidad y estado físico de las obras existentes en la Bahía, proponiendo implementar programas de monitoreo de las obras de protección costera construidas en las costas de la Bahía Todos Santos, con el fin de dar mantenimiento preventivo a las mismas y de esta manera disminuir el daño a futuro. Concluyendo que de 45 obras presentes 19 son funcionales, 21 tienen funcionalidad intermedia y 5 no son funcionales.

Appendini – Albrechtsen (1998), describe que en la zona norte de la Bahía Todos Santos el oleaje proviene del mar abierto a través de una ventana de 30° hacia el oeste, Punta San Miguel y las Islas. La clase de tormentas que afectan a Ensenada son del tipo denominado “ciclones” de invierno y tormentas “tropicales” (chubascos). Los primeros provienen de latitudes altas durante las tormentas de invierno que ocurren de diciembre a marzo.

Las tormentas tropicales se originan en la costa oeste de México, estas ocurren casi exclusivamente durante los meses de julio a octubre produciendo lluvias en las zonas montañosas.

Bermúdez- Zavala (1999) diseña un rompeolas separado de la costa en la zona del Sauzal, como alternativa de protección de la zona costera, concluyendo que es lo más adecuado para proteger la zona de cantiles y la propiedad en ellos existente.

4.Área de Estudio

La Bahía de Todos Santos es un cuerpo de agua semiprotegido con un litoral de casi 50 km. que se encuentra localizada en la costa occidental de la península de Baja California, entre los 31° 41' y 31° 56' de latitud norte y los 116° y 116° 51' de longitud oeste, a 100 km. al sur de la frontera México-Estados Unidos.

El área de estudio se encuentra ubicada a un costado del hotel Las Rosas localizado al norte de la ciudad de Ensenada, Baja California, aproximadamente en el km 107 de la carretera Tijuana – Ensenada, entre los 31° 52.459' y 31° 52.350' latitud Norte y los 116° 40.835' y 116° 40.733' de longitud oeste. (Fig. 3). Esta franja costera tiene una longitud aproximada de 640.00 m, constituida de cantiles con aluvión en su cresta y basalto en su base.

Los cantiles que forman parte de la línea de costa en la zona de estudio son activos, ya que presentan evidencias de erosión marina y subaérea; la altura de los cantiles oscila entre los 4.0 y 5.0 m. La playa está compuesta por cantos rodados que descansan sobre una plataforma basáltica.

La zona de las rosas se puede considerar como una costa abierta debido al grado de exposición del oleaje, la cual presenta problemas de erosión debido a los rasgos batimétricos, a la forma en que incide el oleaje predominante con dirección noroeste y a la concentración de energía del oleaje que se presenta en el costado sur ya que se encuentra una punta rocosa.

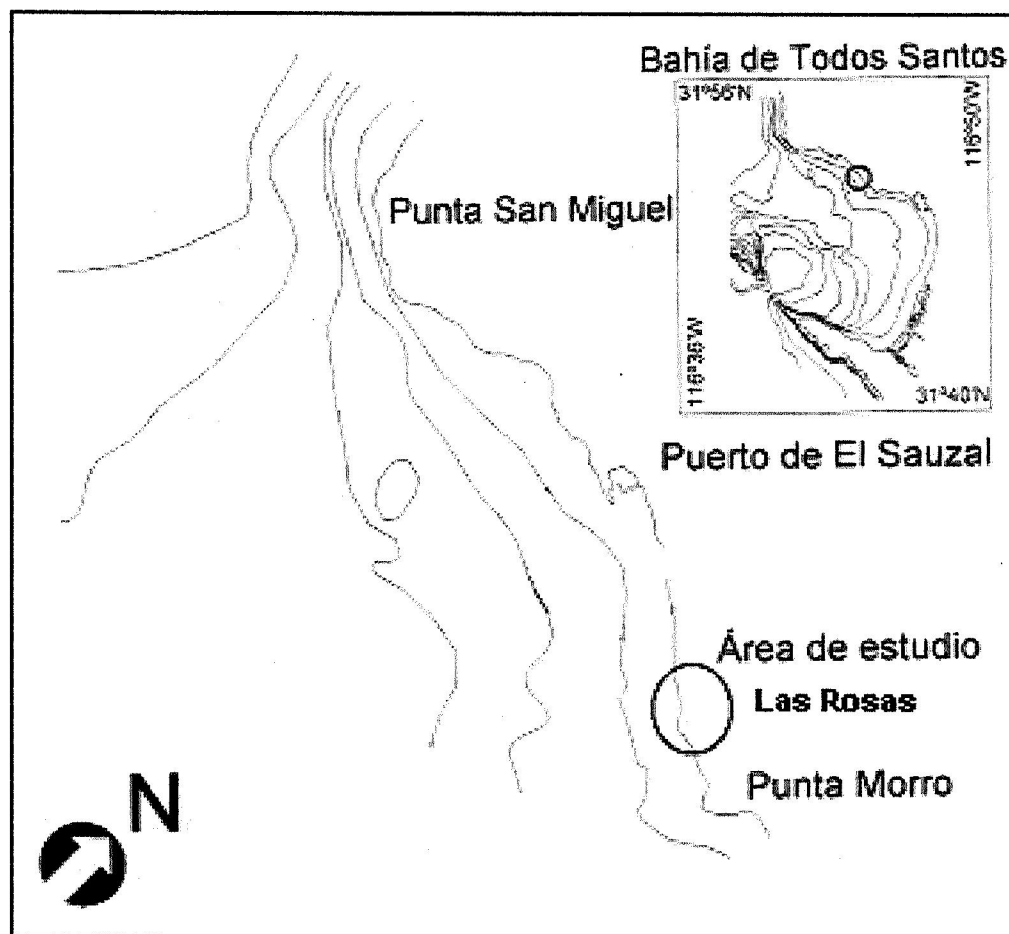


Figura 3. Localización del área de estudio.

5. Metodología

5.1 Transformación de los datos de oleaje

5.1.1 Oleaje

Para realizar el diseño de la obra es necesario tomar en cuenta el oleaje extremo de tormentas, ya que es uno de los factores más importantes y con base en éste, se determinará la altura de ola de diseño.

La información de oleaje se obtuvo a partir del Coastal Data Information Program (CDIP), a través de la boya con clave 46042, anclada en la Bahía de Monterrey, California, a una profundidad de 1920.2 m. y se localiza a los 36° 45' 1" de latitud Norte y a los 122° 24' 27" de longitud Oeste. La cual fue procesada por Bermúdez (1999); La información fue verificada mediante una comparación con los datos proporcionados por la boya Harvest, la cual se encuentra anclada aproximadamente a 9 millas al oeste de Point Arguello, California y se localiza a los 34 27.467 N 120 46.820 W, a una profundidad de 548.64m

La información obtenida fue:

Hs: Altura Significante

Tp: Período Significante

Dp: Dirección promedio en grados en el sentido de las manecillas del reloj a partir del Norte verdadero.

Con estos datos se establecen las características del oleaje en aguas profundas, pero es necesario transportar y transformar los datos de aguas profundas, a datos en aguas someras y obtener las características del oleaje que arriba a la zona de estudio, para eso es importante conocer la batimetría del área donde se desea realizar el diseño.

5.2 Batimetría

La información contenida en un mapa batimétrico se utiliza como base para determinar la distancia adecuada a partir de la costa en la que se deberá construir el rompeolas y es de suma importancia para realizar los estudios de refracción del oleaje, con el fin de determinar condiciones de energía en la zona.

Se realizó una batimetría en la zona de estudio con una ecosonda GPS MAP 168 Sounder marca Garmin . Los datos obtenidos fueron tratados y graficados en el programa Surfer 7.0. Se le insertó la línea de costa a partir de datos tomados con un GPS modelo Garmin e trex obteniendo así un mapa detallado hasta la isobata de 16m.

El mapa se sobrepuso a una fotografía aérea georreferenciada para trabajar con coordenadas UTM. Posteriormente se amplió el mapa a escala 1: 133.33. Este mapa fue utilizado para realizar los estudios pertinentes del oleaje en aguas someras mientras que en aguas profundas se utilizó un portulano de la Bahía de Todos Santos, elaborado por el gobierno del Estado de Baja California y el ayuntamiento de Ensenada escala 1:35,000. A partir de estos mapas se obtuvo la profundidad de desplante de la estructura y la pendiente de la playa.

5.3 Análisis de Refracción

El proceso de refracción depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda, mientras la profundidad sea mayor a un medio de la longitud de onda la ola se considera que viaja en aguas profundas, pero cuando la profundidad se encuentra entre $1/2$ y $1/25$ de la longitud de onda se considera que son aguas intermedias, y una vez que “siente fondo”, es decir, que viaja en aguas de profundidad menor a $1/25$ de la longitud de onda, se considera que viaja en aguas someras, disminuyendo su velocidad y tendiendo a alinearse con los contornos batimétricos.

Con el cálculo de refracción podemos determinar la altura de la ola en cualquier profundidad así como la distribución de la energía de la misma en la zona costera.

El cambio de dirección de diferentes partes de la ola resulta en una convergencia o una divergencia de la energía afectando directamente la fuerza ejercida por las olas sobre las estructuras.

Con los datos obtenidos de la estadística de oleaje para aguas profundas y la batimetría se realizó el análisis de refracción utilizando la metodología propuesta por el Shore Protection Manual (1984).

Se trazaron las ortogonales que arriban a la Bahía en la parte norte hacia la zona de estudio, para determinar el comportamiento del oleaje y el ángulo de aproximación a la costa.

El cálculo de la longitud de onda se realizó con base en esta formula:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \dots\dots\dots (1)$$

Donde :

L_0 : longitud en aguas profundas

g = gravedad

T = período

También se calculó la profundidad donde siente fondo la ola con la relación:

$$d = \frac{L_0}{2} \dots\dots\dots(2)$$

donde:

d = profundidad

Posteriormente se calculó el coeficiente de refracción

$$KR = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \dots\dots\dots(3)$$

donde:

b_0 = Distancia entre ortogonales en aguas profundas

b = Distancia entre ortogonales en aguas someras

A partir de esta información se calculó el coeficiente de someramiento utilizando la técnica propuesta en el shore Protection Manual (SPM, 1984). El cual esta en función de la longitud de la ola,

$$\frac{d}{L_o} \dots\dots\dots(4)$$

Este valor (4) se busca en las tablas propuestas en el SPM y se obtiene:

$$\frac{H}{H_o} = \text{Coeficiente de someramiento}$$

donde :

H= altura en aguas someras

H_o = altura en aguas profundas

La información obtenida será presentada en tablas y figuras.

5.4 Pendiente de la cara de la playa

Con el fin de caracterizar la playa, se realizaron 5 perfiles a lo largo del área de estudio con ayuda de un nivel, un estadal y una cinta métrica.

La información obtenida fue procesada en el programa EXCEL para determinar la pendiente de la playa y los resultados se presentan en tablas y figuras.

5.5 Nivel de agua

Las características del diseño de la estructura fueron determinadas a través de la obtención de los niveles de agua referidos en la tabla I.

5.6 Diseño de la estructura

Los parámetros de mayor importancia para diseñar un rompeolas separado de la costa son la altura y profundidad de rompiente de diseño, pendiente de la playa, densidad de los elementos (rocas que serán utilizadas en la construcción), coeficientes

de estabilidad y de capa; una vez obtenidos, se hace uso de la ecuación propuesta por Hudson (1952) para obtener el peso de los elementos que conformarán la estructura.

5.6.1 Altura rompiente (Hb)

Con el coeficiente de refracción (KR), el coeficiente de someramiento (KS) y la altura de ola en aguas profundas (H₀) se determinó la altura rompiente (SPM,1984).

$$Hb = (KR)(KS)(H_0) \dots\dots(5)$$

5.6.1.2 Profundidad de rompiente (db)

Para el cálculo de la profundidad de rompiente (db) se utilizaron las siguientes fórmulas (SPM,1984) resultado del estudio de la naturaleza del oleaje: altura de ola rompiente, período y la pendiente de la playa.

$$\frac{Hb}{gT^2} \dots\dots\dots(6)$$

este valor (6) se busca en graficas del SPM y se obtiene

$$\frac{db}{Hb} \dots\dots\dots(7)$$

se despeja db para obtener

$$db = (Hb * (7)) \dots\dots\dots (8)$$

donde:

Hb= Altura rompiente

T= Período

db= Profundidad de rompiente

Después de obtener los datos anteriores fue necesario calcular el promedio de la pendiente de la playa.

5.6.2 Pendiente de la playa

Se obtuvo utilizando el mapa batimétrico, Se calculó la distancia de la costa a la isobata de los 5m, se realizó el cambio de escala y se obtuvo la tangente de la playa.

5.6.3 Peso del elemento

Según las condiciones de diseño, disponibilidad y capacidad del equipo de construcción (SPM, 1984) se obtendrá el peso del elemento (W), empleando la formula propuesta por Hudson (1952), aunque existen varias formulas, es la más convencional, y ha sido utilizada en el diseño de las obras en esta zona, por eso se calcularán los pesos con base en ella:

$$W = \frac{W_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \dots\dots\dots(9)$$

donde:

W= Peso del elemento

W_r = Densidad del elemento

H= Altura de diseño

K_D = Coeficiente de estabilidad el cual depende de la forma del elemento ya sea: redondeado liso, rugoso angular, paralelepípedo, tetrápodo, etc. y del tipo de oleaje que llega a la estructura ya sea que rompa sobre esta o rompa antes. Los valores se obtienen de las tablas propuestas por el SPM 1984.

S_r = Gravedad específica de la unidad del armazón (W_r/W_w)

$\cot \alpha$ = El ángulo de la pendiente del talud

5.6.4 Talud de la estructura

Para consideraciones prácticas se utilizó el valor entre el rango $1.5 \leq C \leq 3$, donde C es la pendiente propuesta de la estructura (Chasten, *et al.*, 1993 y Garcia Flores, 1988), ya que pendientes mayores generan deslizamientos y menores aumentan costos, por ello se recomienda $C=2$

El ángulo del talud de la estructura se calculó con base a la siguiente ecuación:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1}{C} \right) \dots \dots \dots (10)$$

donde:

α = ángulo del talud de la estructura

Con los datos del talud y los pesos de los elementos para cada sección del rompeolas se puede calcular la sección transversal de éste, la cual se encuentra dividida en tres partes: capa coraza, secundaria y núcleo.

5.6.5 Ancho mínimo de la corona

El ancho de la parte superior de la estructura, llamada corona y que se encuentra formada por una o dos capas de elementos, se obtiene utilizando la siguiente formula:

$$B = nK_{\Delta} \left(\frac{W}{W_r} \right)^{1/3} \dots \dots \dots (11)$$

donde:

B= Ancho de la corona

n= numero de capa

K_{Δ} = Coeficiente de capa, el cual se obtiene de las tablas propuestas por el SPM 1984 y esta en función de la porosidad del elemento.

W= Peso de los elementos

W_r = Densidad del elemento

5.6.5.1 Ancho mínimo de la capa secundaria

La capa secundaria soporta los elementos de la capa coraza y sirve además como filtro para evitar que salgan los elementos de la capa en que se apoya. Se utiliza la misma fórmula con la que se obtuvo el ancho de la capa coraza, para obtener el ancho mínimo de la capa secundaria aunque se cambia el peso del elemento ya que lleva rocas más pequeñas

$$B = nK_{\Delta} \left(\frac{W/10}{W_r} \right)^{1/3} \dots\dots\dots(12)$$

5.6.5.2 Ancho mínimo del núcleo

El núcleo sirve como soporte y relleno de la estructura. Para él calculo del ancho mínimo de la corona del núcleo se utiliza la fórmula con la que se obtuvo el ancho de la capa coraza. Se encuentra formado por rocas más chicas que las secciones anteriores, por lo que el peso de los elementos es menor.

$$B = nK_{\Delta} \left(\frac{W/200}{W_r} \right)^{1/3} \dots\dots\dots(13)$$

Obtenida la parte transversal de la estructura, el siguiente paso es calcular la altura que tendrá la estructura, la cual se obtiene a partir del Run UP , Run down y cambios en el nivel del mar.

5.6.6 Run Up (Ru) y Run Down (Rd)

El Run Up de una ola se define como la altura máxima del agua por arriba del nivel medio del mar que alcanza en la pendiente de la estructura. El cual depende de la forma y rugosidad de la estructura, la profundidad donde se construye la obra, la pendiente de la estructura y de las características de la ola incidente. (SPM,1984)

El Run down es la altura máxima del nivel del agua por arriba del nivel medio del mar en el punto más bajo de la retirada de la ola en la pendiente de la estructura. (SPM,1984)

De acuerdo a Bruun, *et al.*, (1977) ambos están relacionados con el tipo de rompimiento que tiene la ola. Este parámetro se define:

$$\xi_b = \tan \alpha \sqrt{\frac{Hb}{L_0}} \dots\dots\dots(14)$$

donde ξ indica el tipo de rompiente:

$2.0 < \xi$	surgin o collapsig (colapso)
$0.4 < \xi < 2.0$	plunging (tubo)
$\xi < 0.4$	spilling (derrame)

El Run up (Ru) se calcula con base a las fórmulas y gráficas del SPM con la siguiente razón:

$$\frac{Ru}{H_0} \dots\dots\dots(15)$$

Al valor obtenido se le hace una corrección para tener datos más exactos y el cálculo depende de la pendiente de la estructura.

Run down (Rd) se obtiene mediante la ecuación:

$$Rd = Ru (1 - 0.4 \xi) \dots\dots\dots(16)$$

Con base en los parámetros anteriores, se puede calcular el número de elementos que conformaran cada sección de la estructura.

5.6.7 Numero de elementos

Para obtener el número total de elementos por unidad de área, para construir cada sección del rompeolas, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Na = nK_{\Delta} \left[1 - \left(\frac{P}{100} \right) * \left(\frac{\delta_r}{W} \right) \right] * A \dots\dots\dots(17)$$

donde : Na = número de rocas requeridas

n= número de capas

K_{Δ} = Coeficiente de capa

W= Peso del elemento

P= porosidad

δ_r = densidad de la roca

A= área a cubrir

La información del diseño estructural será presentada en tablas, figuras y un plano.

5.6.8 Altura de ola necesaria para mover el sedimento de la playa

Como se mencionó anteriormente, los rompeolas separados de la costa pueden mitigar la energía del oleaje tras la estructura con el fin de que el sedimento aportado por los cantiles no sea erosionado y de esta manera se genere una playa protectora.

La altura de ola mínima necesaria para mover el sedimento aportado por los cantiles, se puede determinar a partir de la fórmula de Hudson (1952).

$$H = \sqrt[3]{\frac{(K_d)(S_r)(\cot \alpha)(w)}{W_r}} \dots\dots\dots(18)$$

donde:

Kd = Coeficiente de estabilidad (tomado de la tesis de Peredo, 1994)

δ_R = Gravedad específica del sedimento aportado por el cantil (w_r/w_w)

$\text{Cot } \alpha$ = ángulo de la pendiente de la playa

W = Peso individual del sedimento aportado por el cantil

W_r = Densidad del sedimento

Para lograr esto, es necesario determinar las características del sedimento que compone tanto el cantil como la playa.

6.6.9 Análisis granulométrico del sedimento que compone los cantiles y la playa

Se tomó una muestra del sedimento del cantil y mediante la técnica de tamizado en húmedo se determinaron los porcentajes de arena y Limo – arcilla. En el caso de la playa se midió directamente con un vernier las dimensiones promedio de los cantos rodados.

5.6.10 Orientación, longitud de la estructura y distancia a la costa

Una vez calculados los parámetros anteriores se prosiguió al cálculo de la longitud de la estructura (L_s) y la distancia que debe existir entre la costa y el rompeolas (x) para que el sedimento que compone la playa se mantenga en la zona.

Pope y Dally (1986), especifican que dependiendo de la relación que existe entre la longitud de la costa y la distancia que hay de ésta a la isobata donde se construirá la estructura se obtendrá una respuesta particular de la playa.

De acuerdo a estos autores, la relación entre la distancia de la costa y la longitud de la obra debe de ser la siguiente, para la formación de un tómbolo

Dally y Pope (1986) $L_s / X = 1.5$ a 2.0

Mientras que para la formación de una saliente se requiere la siguiente relación:

Dally y Pope (1986) $L_s / X = 0.5$ a 0.67

En este caso nos interesa la formación de un tómbolo por lo que se debe seguir la relación de $L_s / X = 2$

En ambos casos los autores recomiendan que la obra se construya de manera paralela a la costa.

Una vez obtenido el diseño estructural, es necesario evaluar los posibles daños que sufrirá el rompeolas cuando se presenten condiciones extremas.

5.6.11 Cálculo del porcentaje de daño de la estructura

El daño que sufrirá la estructura se calcula con base a una tabla propuesta en el SPM (tabla I), la cual está en función de las características del elemento y presenta la siguiente fórmula:

$$H/H_{D=0}$$

Donde:

H= altura de ola rompiente (m)

$H_{D=0}$ = altura de ola de diseño (m)

Tabla I. Porcentaje de daño (SPM)

Elemento		Porcentaje de daño						
		0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50
Lisa	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.14	1.20	1.29	1.41	1.54
Rugosa	$H/H_{D=0}$	1.00	1.08	1.19	1.27	1.37	1.47	1.56 ³
Tetrápodos	$H/H_{D=0}$	1.00	1.09	1.17 ³	1.24 ³	1.32 ³	1.41 ³	1.50 ³
Tribar	$H/H_{D=0}$	1.00	1.11	1.25 ³	1.36 ³	1.50 ³	1.59 ³	1.64 ³
Dolos	$H/H_{D=0}$	1.00	1.10	1.14 ³	1.17 ³	1.20 ³	1.24 ³	1.27 ³

6. Resultados

6.1 Oleaje

El análisis del comportamiento del oleaje se realizó desde 1995 (inicio de registros) hasta el año 2000 (fin del registro), el cual se obtuvo a partir de datos de la boya Harvest (figuras 4 y 5). En la tabla II, se muestra el oleaje que arriba a la zona de estudio donde se puede observar un altura máxima de 4.8 m y una mínima de 1.8 m., de igual manera se observa que el oleaje se encuentra entre los 240 y 300° (SO-NO) (Estos datos se obtuvieron de la tesis de Bermúdez, 1999.)(Figura 6). Las direcciones que afectan el área de estudio son las que llegan durante los meses de tormentas (invierno – primavera) las más frecuentes registradas son 285, 290, 300° correspondiente a oleaje que se origina en altas latitudes y tienen mayor intensidad.

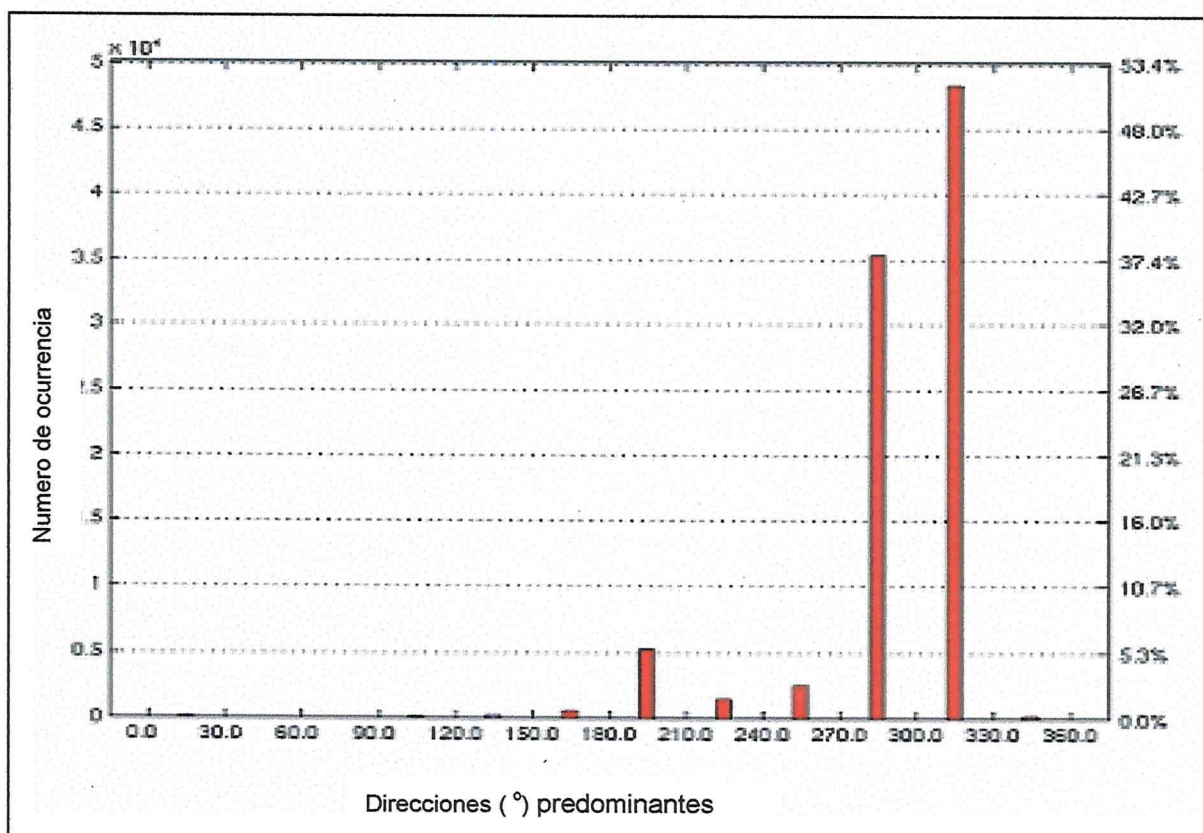


Figura 4. Histograma de direcciones predominantes

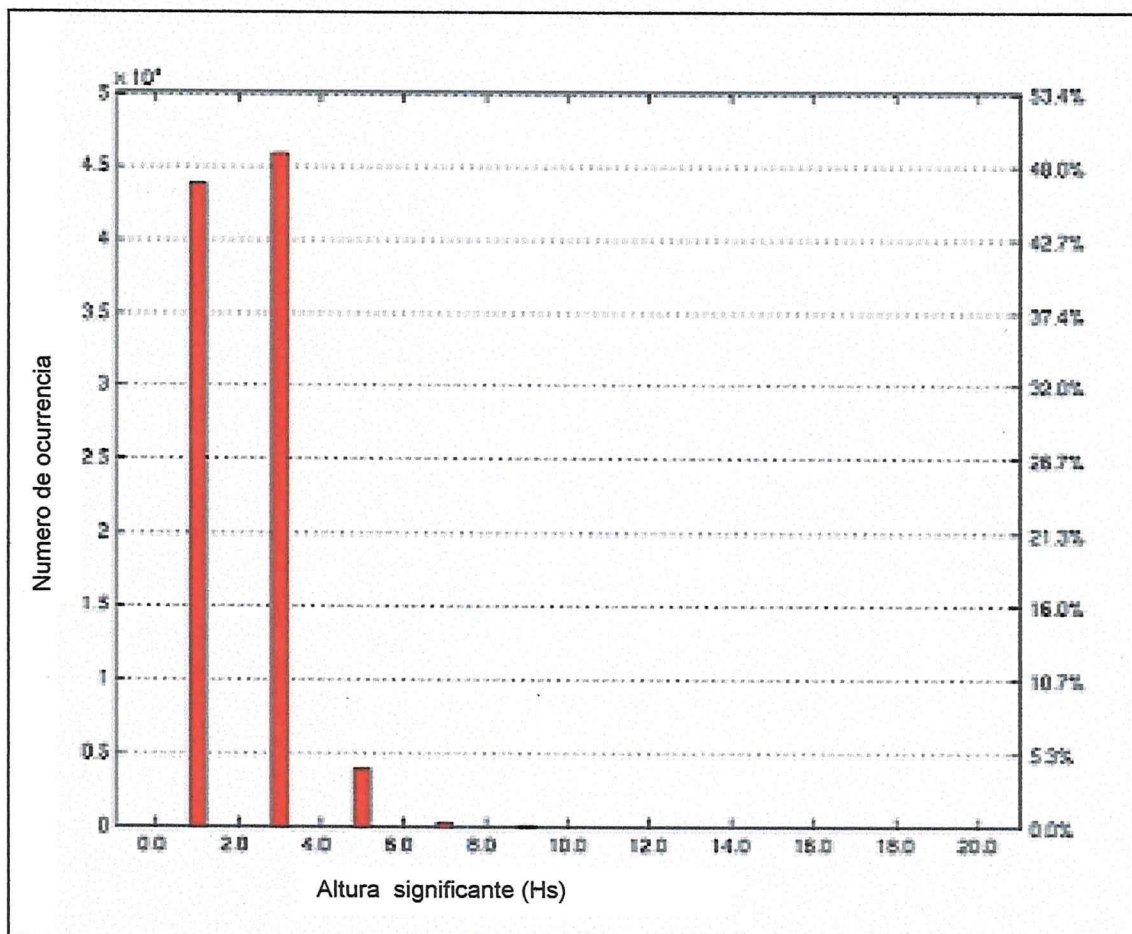


Figura 5. Histograma de altura significativa

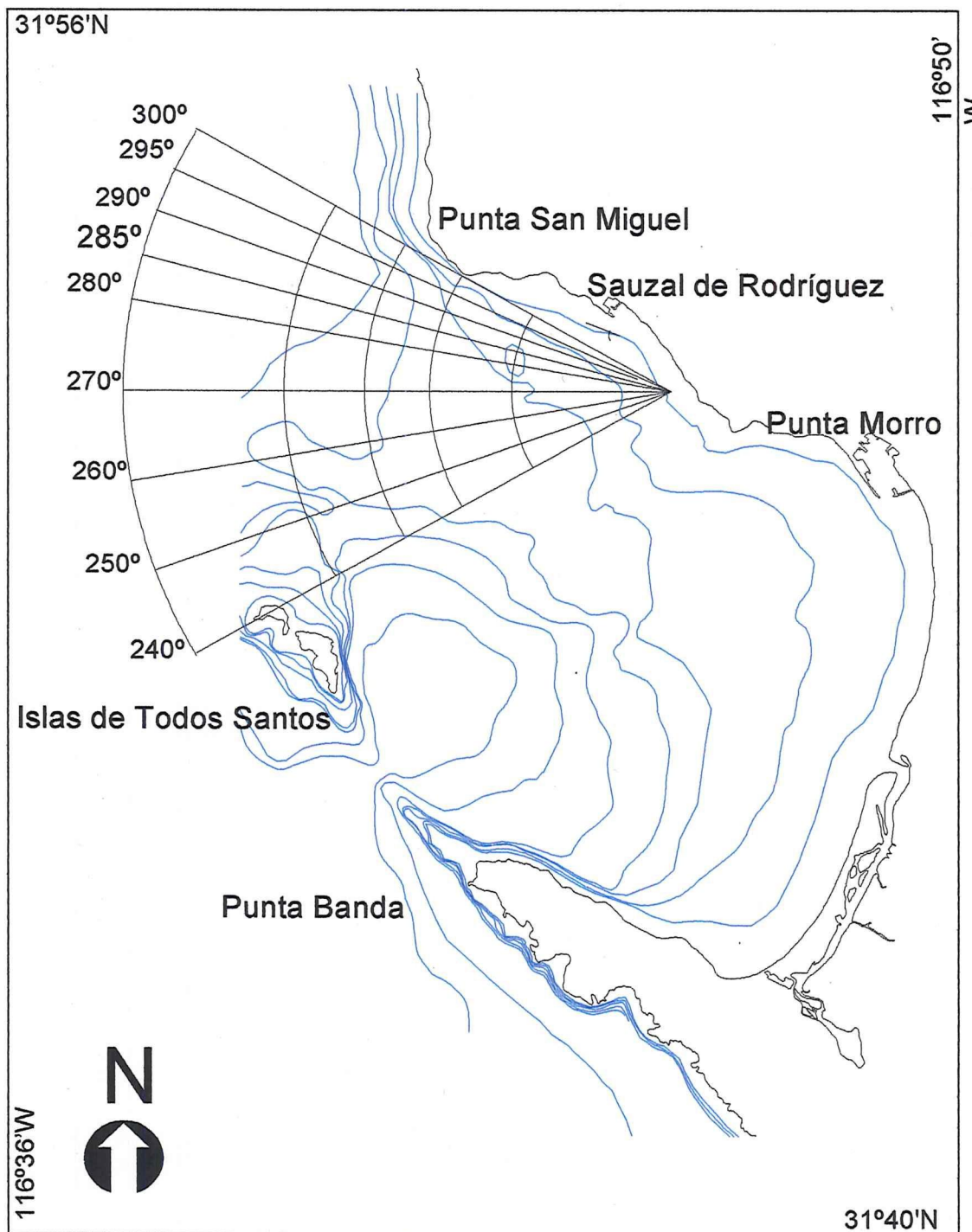


Figura 6. Direcciones predominantes de arribo para la zona de las Rosas

Tabla II. Resumen de los datos de oleaje

	Altura máxima	Período	Longitud	Dirección
	m	s	m	grados (°)
Condiciones Normales	1.8	11.1	192.20	300°
Condiciones Tormenta	5	14.3	319	290°
Condiciones Tormenta	5	12.5	243.75	285°

Los valores considerados para realizar el diseño de la obra fueron de oleaje en condiciones de invierno normales con alturas de ola de 1.8 m, periodo de 11.1s y dirección de 300°.

6.2 Batimetría

El plano batimétrico muestra que la zona presenta una plataforma extensa con una pendiente suave, manteniendo una pendiente 1:100, la cual se extiende hasta la isobata de los 6 m, después se vuelve un poco más abrupta aunque no se observan rasgos sobresalientes como cañones o bajos. La figura 7 muestra el plano batimétrico del área de estudio, las isobatas tienen un espaciamiento de un metro empezando de 2 m. hasta la de 16 m. de profundidad

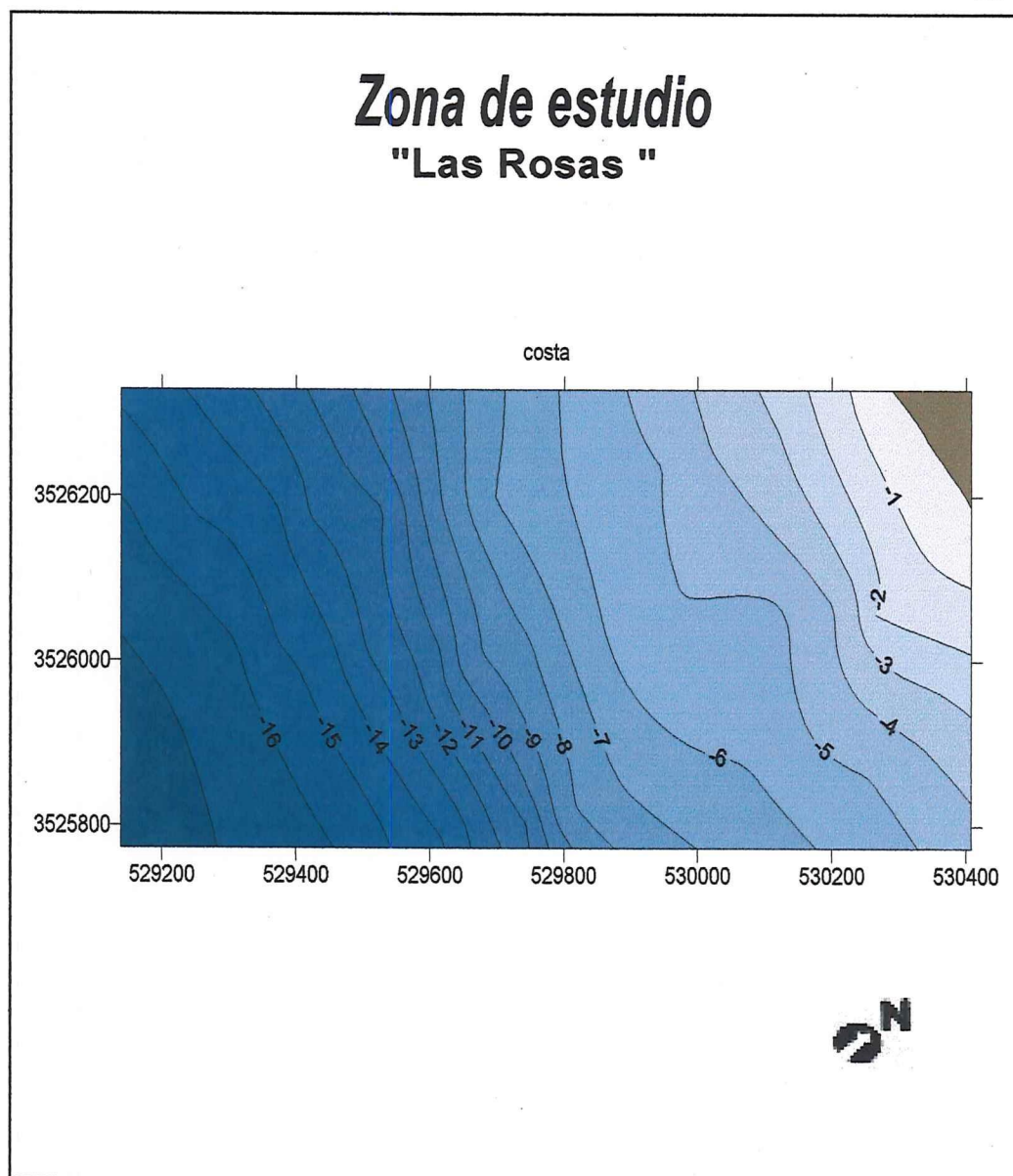


Figura 7. Rasgos batimétricos de la zona de estudio.

(La profundidad esta expresada en metros.)

6.3 Refracción

Los diagramas de refracción fueron realizados utilizando los resultados de oleaje antes descritos. Para oleaje en condiciones normales con dirección de 300° , altura de 1.8m y periodo de 11.1s, la ola siente fondo a los 3 m. de profundidad con una longitud de onda de 192.20 m. Con esta información se obtuvo un coeficiente de refracción (k_r) de 1.624 (figura 8).

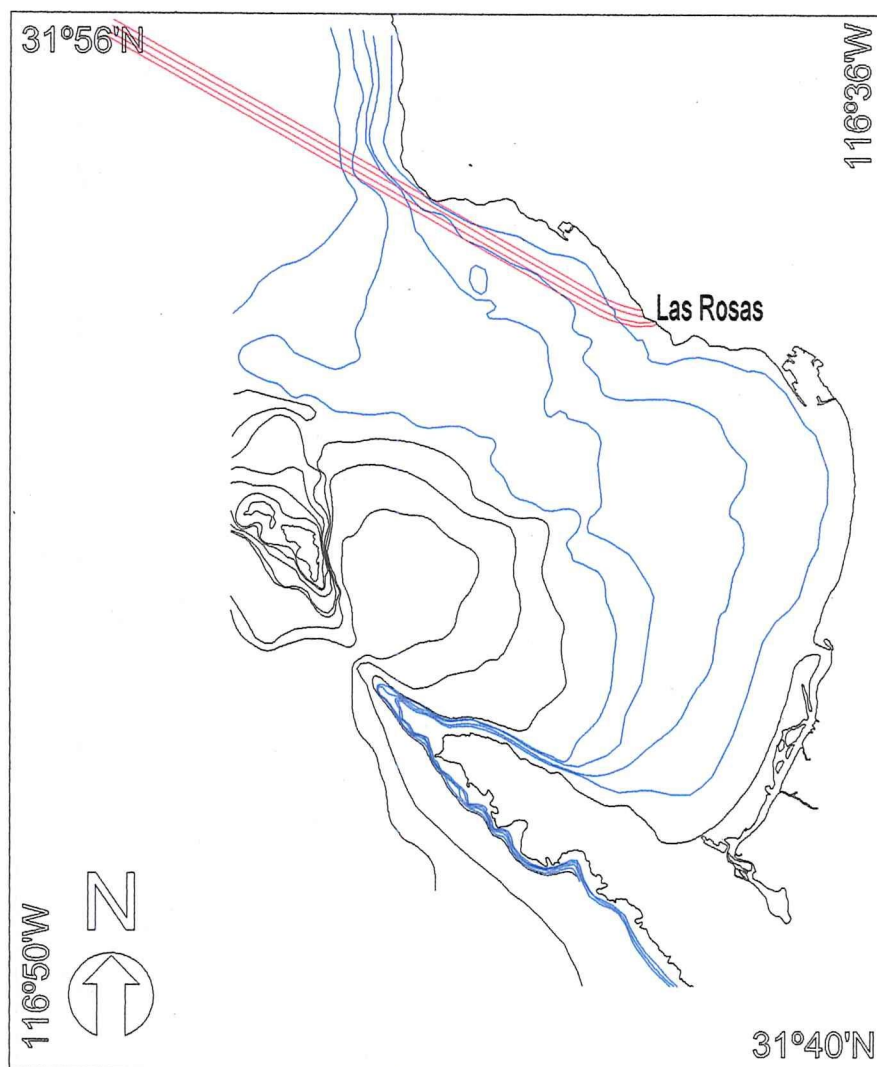


Figura 8. Diagrama de refracción para $H_0 = 1.8$ m, $T_s = 11.1$ s y 300°

Como se observa en la figura 8 las ortogonales se ven influenciadas por la batimetría y por la saliente rocosa de Las Rosas, presentando una concentración de energía en el costado norte de la misma que es la zona de estudio.

En el caso del oleaje que arriba en condiciones de tormenta con dirección de 285° , altura de 5 m. y período 12.5 s, la ola comienza a tocar fondo a los 7.7 m. de profundidad con una longitud de onda de 319 m., con un coeficiente de refracción (k_r) de .81 (figura 9).

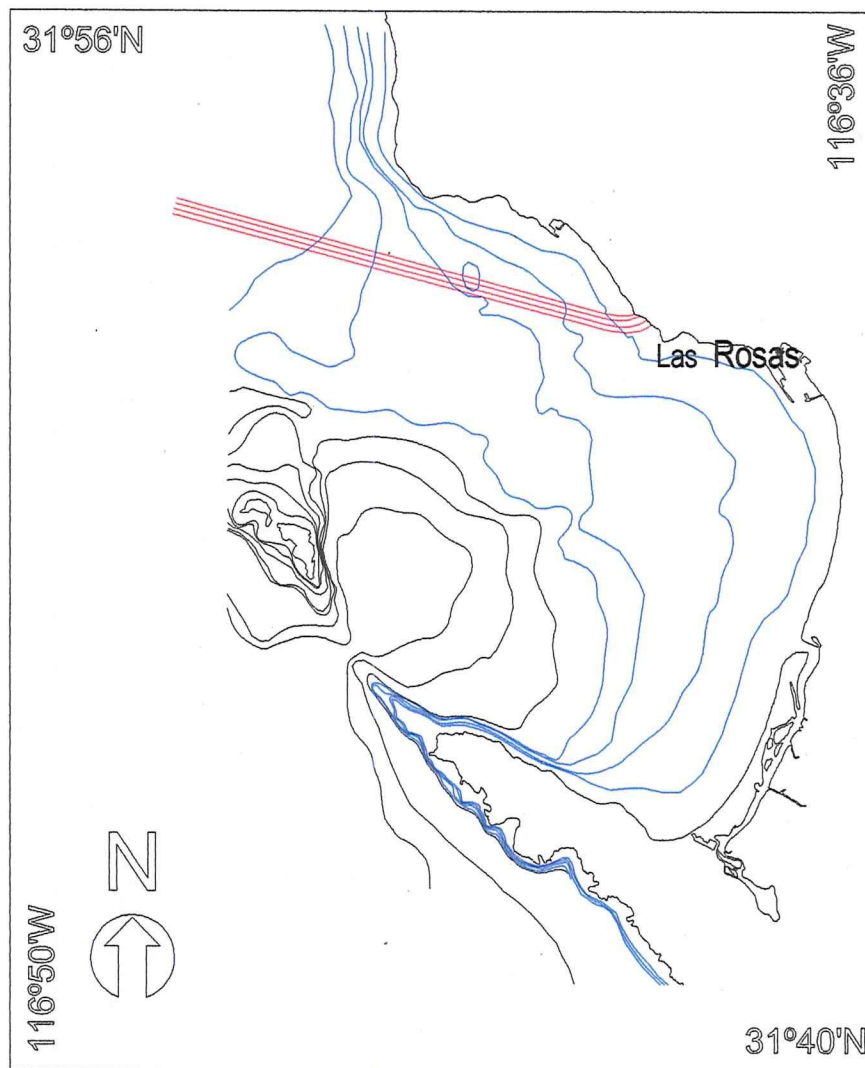


Figura 9. Diagrama de refracción para $H_0 = 5$ m, $T_s = 12.5$ s y 285°

En la figura 9 observamos que las ortogonales se separan en la zona de estudio lo que implica una disipación de energía para estas condiciones.

En condiciones de tormenta con un ángulo de aproximación de 290° , altura 5 m. y período 14.3 s, la ola comienza a tocar fondo a los 7 m. con una longitud de onda de 243.75 m., presentando un coeficiente de refracción de 1.0047 (figura 10).

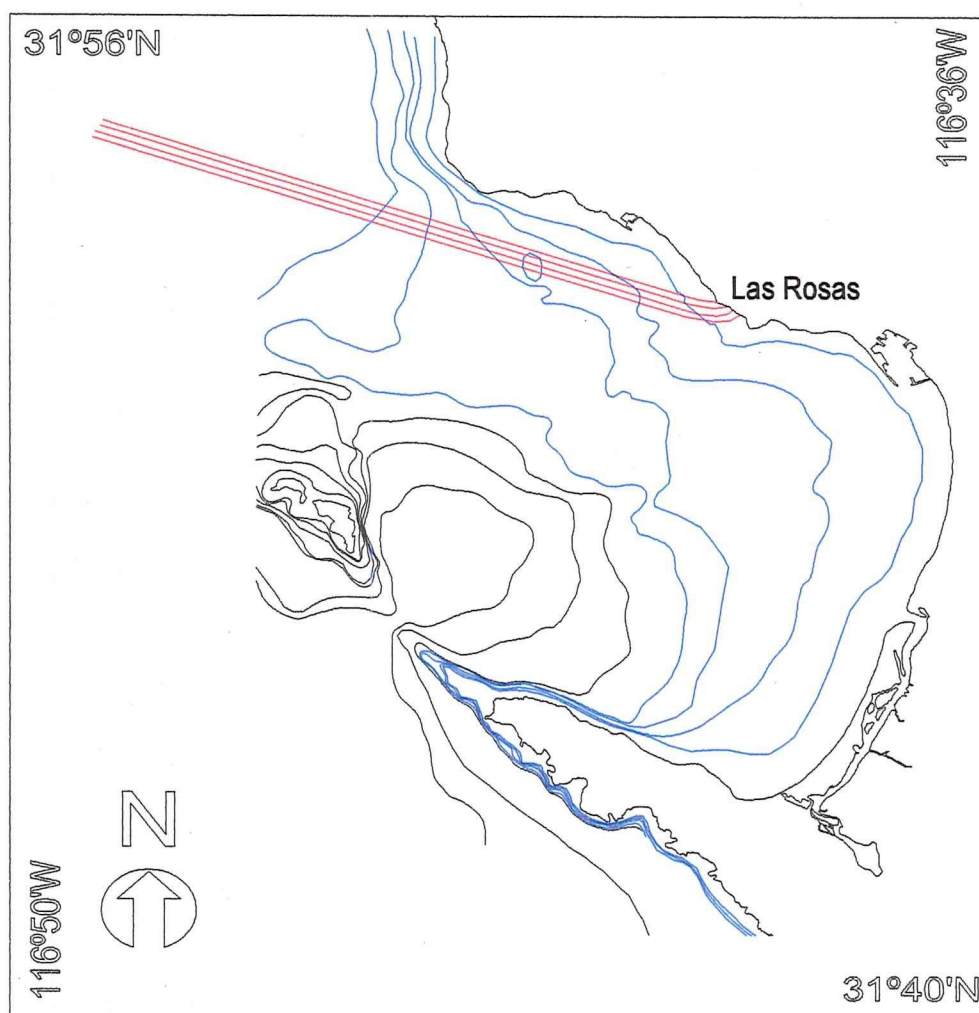


Figura 10. Diagrama de refracción para $H_0=5$ m, $T_s=14.3$ s y 290°

Al igual que en el caso de oleaje normal, para estas condiciones también se observa una concentración de energía en la zona de estudio

6.4 Niveles de Agua

La marea existente en Ensenada, B. C., es mixta semidiurna, teniendo así dos pleamares y dos bajamares, observables en el transcurso del día, presentándose en períodos de aproximadamente 12 horas, siendo la elevación máxima reportada de 2.60 m. (plaza flores, 1979). Tabla III

Tabla III. Alturas de marea reportada para Ensenada

Nivel de Marea	Elevación (m)
Pleamar máxima registrada	1.487
Nivel de pleamar media superior	0.781
Nivel de pleamar media	0.577
Nivel medio del mar	0.000
Nivel de media marea	0.003
Nivel de bajamar media	-0.572
Nivel de bajamar media inferior	-0.822
Bajamar mínima registrada	-1.409
Altura mínima registrada	-2.902

La marea por tormenta (Storm surge) En esta zona rara vez exceden los 30 cm. de amplitud y se estima que pueden elevar el nivel del mar en el orden de 15 cm. por un promedio de 2 a 6 días (Flick, 1989 citado en Appendini ,1998)

6.5 Altura rompiente (Hb) y profundidad de rompiente (db)

Obtenida la información sobre oleaje, batimetría, refracción y coeficiente de someramiento, la altura de ola rompiente (Hb) para condiciones de invierno normales y de tormenta se presentan en la tabla IV, mientras que las profundidades de rompiente (db) se muestran en la tabla V

Tabla IV Datos para el cálculo de la altura rompiente (Hb)

	H ₀	KR	KS	Hb
Condiciones Normales	1.8	1.624	1.226	2.88
Condiciones Tormenta (14.3 s)	5	1.047	1.168	6.11
Condiciones Tormenta (12.5 s)	5	.81	1.14	4.6

Tabla V. Profundidad de rompiente (db)

	Pendiente	Hb (m)	db (m)
Condiciones Normales	0.01	2.88	3
Condiciones Tormenta (14.3s)	0.01	6.11	7.7
Condiciones Tormenta (12.5s)	0.01	4.6	7

6.6 Perfiles de la cara de la playa

La ubicación de los perfiles de playa se puede observar en la figura 11; la pendiente promedio es de 9.23°

En la tabla VI se presenta la pendiente de cada uno de los perfiles mientras que en las figuras 12,13,14,15 y 16 se presentan las características de cada perfil.

En las figuras se observa que la pendiente es más abrupta del lado que se encuentra cerca al hotel Las Rosas y va disminuyendo hacia el lado norte.

La playa se conforma de cantos rodados, presentando dos bermas que se encuentran sujetas al movimiento de las olas, dependiendo de los cambios estacionales. Estas se observan también en las figuras 12,13,14,15 y 16.

Tabla VI. Ángulos y pendientes para cada perfil

Perfil	Pendiente	Angulo
1	0.2021	11.425°
2	0.2267	12.77°
3	0.1001	5.716°
4	0.1996	11.28°
5	0.0872	4.983°

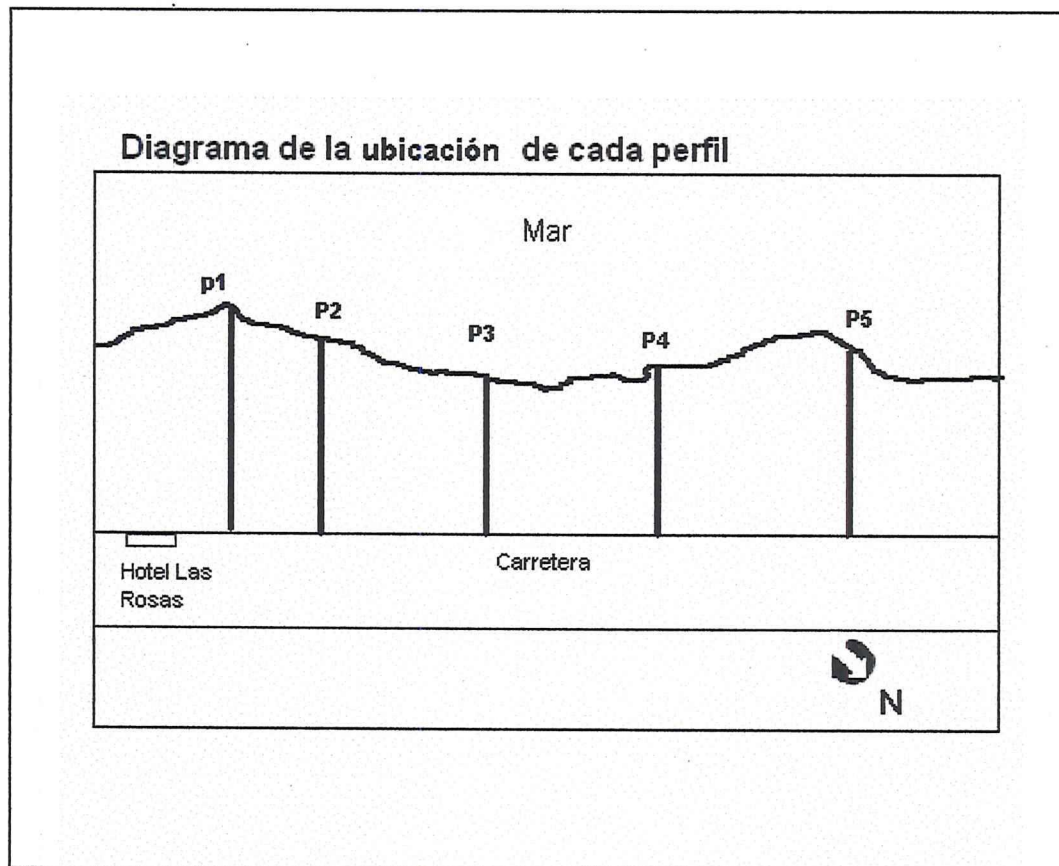


Figura 11. Diagrama de los perfiles del área de Las Rosas

Perfiles realizados en la cara de la playa:

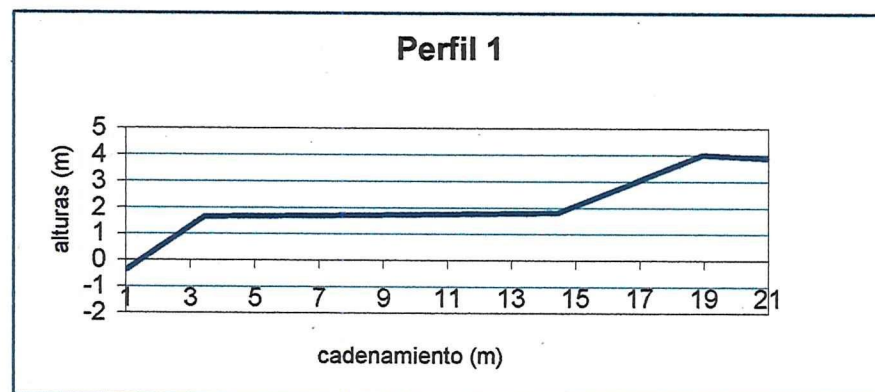


Figura 12. Perfil 1 de la cara de la playa

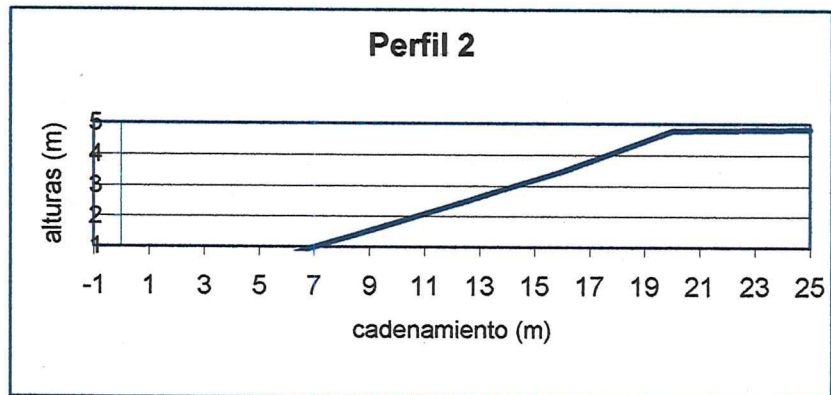


Figura 13. Perfil 2 de la cara de la playa

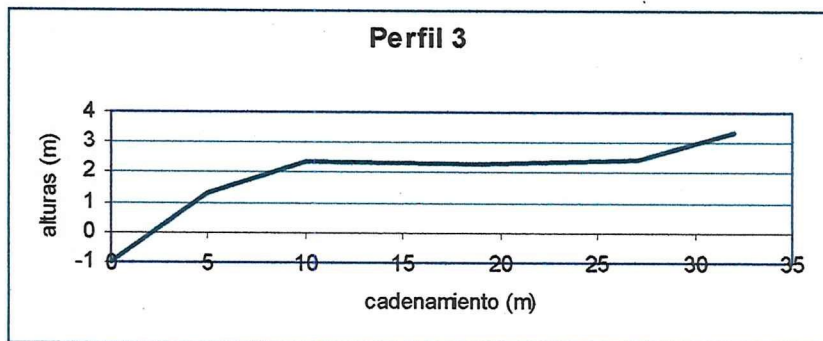


Figura 14. Perfil 3 de la cara de la playa

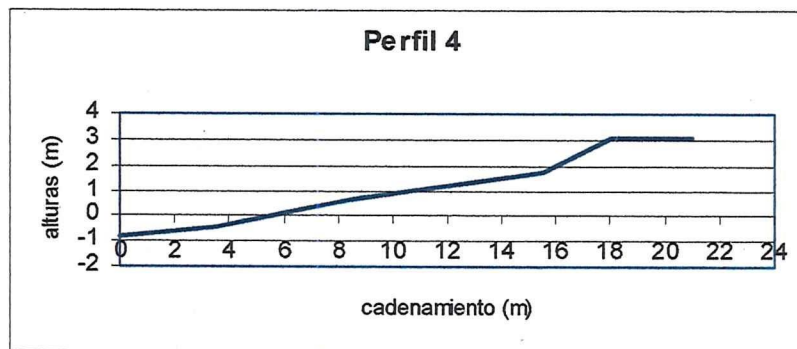


Figura 15. Perfil 4 de la cara de la playa

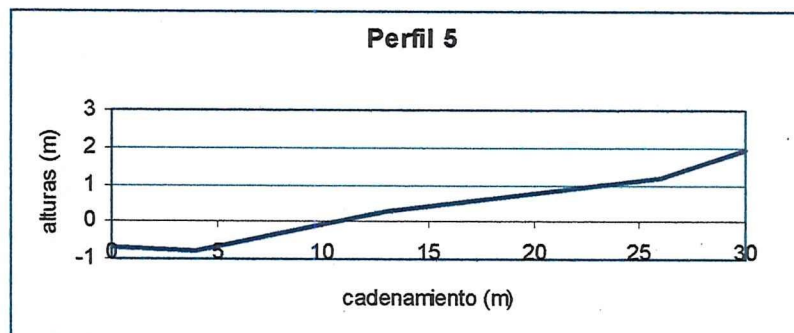


Figura 16. Perfil 5 de la cara de la playa

6.7 Sedimento aportado por el cantil

Después de obtenidos todos los parámetros para el diseño de la estructura fue necesario calcular la energía necesaria para mover el sedimento aportado por el cantil y poder disiparla lo suficiente para evitar que la energía del oleaje erosione el sedimento. La altura de ola sería de .15 m y mueve el material que pesa 0.06842 kg.

6.8 Diseño Estructural de la obra

Una vez definidas las características del oleaje rompiente para condiciones normales y de tormenta, la altura de ola utilizada para el diseño, la cual es para condiciones normales de invierno; altura rompiente de 2.88 m, periodo de 11.1 s, ángulo de incidencia en la zona de estudio de 270° y profundidad rompiente de 3 m.

6.8.1 Características de la obra

Una vez aplicada la ecuación de Hudson (1956) utilizada en el diseño del rompeolas se obtuvieron los siguientes parámetros (tabla VII), y la sección transversal del rompeolas con los pesos de cada una (tabla VIII, figura 17)

Tabla VII. Parámetros para el diseño de la obra

Parámetros	Ecuación	Parámetro
Talud (ángulo) de la estructura	10	$\alpha = 26^{\circ} 33'$
Ancho de la capa coraza	11	3 m
Número de elementos del ancho de la coraza	17	1000 elementos
Número de elementos del talud de la coraza	17	6450 elementos
Número de elementos en la tapa de la coraza	17	54 elementos
Ancho de la capa secundaria	12	1.25 m
Número de elementos en lo ancho de la capa secundaria	17	1939 elementos
Número de elementos en el talud de la capa secundaria	17	18922 elementos
Número de elementos en la tapa de la capa secundaria	17	87 elementos
Ancho del núcleo	13	0.46 m
Volumen del núcleo	17	5161 m ³
Tipo de rompiente	14	Derrame
Run up	15	2.90
Run down	16	2.60

Rompeolas Sección Transversal

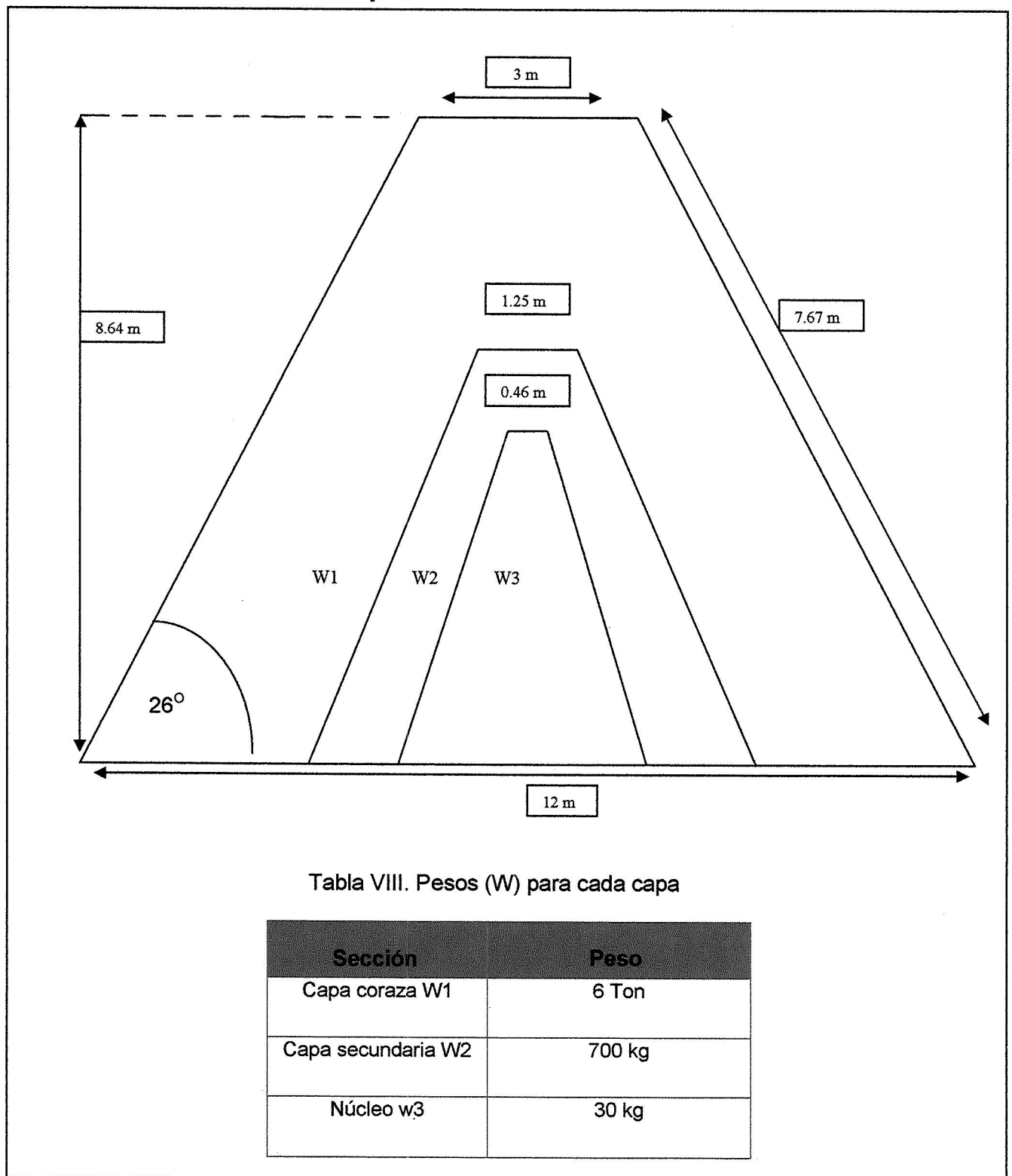


Figura 17. Sección transversal del rompeolas.

Se puede observar que bajo las condiciones de diseño se espera que el porcentaje de daño oscile entre 0 y 5 % mientras que bajo condiciones extremas el daño será del 30 a 40 % para oleaje rompiente de 4 m, mientras que para oleaje de 5 m la estructura sufrirá un daño total.

8. Discusiones

La playa de las Rosas presenta problemas de erosión, la salpicadura del oleaje es suficiente para humedecer el cantil y acelerar el proceso erosivo a través del derrumbe del mismo con el subsecuente transporte del sedimento. Ya que la carretera federal está construida sobre dichos cantiles, se ha intentado proteger anteriormente mediante la construcción de una pared, la cual no cumplió su propósito y prácticamente se ha derrumbado, por lo que es importante plantear otra alternativa de protección.

Para el diseño de la estructura se utilizaron los datos de oleaje reportados por el CDIP a partir de la boya Harvest (figura 4 y 5) encontrando que el oleaje que arriba en esta porción de la Bahía de Todos Santos tiene las siguientes características en aguas profundas:

Para condiciones de tormentas extremas el oleaje arriba con dos direcciones importantes, 285° y 290° . Para la primera dirección, el oleaje presenta un periodo de 12.5 s con altura de ola de 5 m.; mientras que, para la segunda, el oleaje tiene un periodo de 14.3 s y una altura de ola de 5 m. El oleaje que se presenta en condiciones de tormentas de invierno al que se denominó oleaje normal, tiene como altura máxima 1.8 m., período de 11.1 s y un ángulo de 300° .

Estos resultados fueron comparados con información reportada por Bermúdez 1999, por ser significativos para este trabajo, ya que realizó un análisis estadístico del oleaje que cubre un periodo de 8 años en una zona ubicada 2 km. al norte del hotel Las Rosas encontrando que son muy similares.

Con los datos de altura, período y longitud de propagación del oleaje provenientes de la boya, el siguiente paso fue realizar la refracción del oleaje en la zona de estudio para poder transformar los datos de aguas profundas y obtener las características de los mismos en aguas someras, determinando altura, período, dirección de la ola incidente en la costa y la distribución de energía del oleaje sobre ésta. En los diagramas de refracción se puede observar que, para condiciones de

oleaje de invierno (figura 8), existe concentración de energía en la zona de estudio, lo que también es evidenciado por el coeficiente de refracción (k_r) de 1.64. Para estas condiciones, el oleaje tendrá una altura rompiente de 2.88 m. y para casos extremos la altura será de hasta 6.11m. (tabla IV) . Para condiciones extremas, a pesar de que las alturas de ola son mayores, los coeficientes de refracción son iguales o inferiores a 1, por lo que se espera que la ola rompa a una mayor distancia de la costa y la disipación de energía no permita que el oleaje alcance fácilmente a los cantiles.

A pesar de que comúnmente se diseña con $H_{1/3}$, en este caso se utilizó como altura de ola de diseño la que corresponde a condiciones de invierno, es decir, de 2.88 m. y rompe a los 3 m. de profundidad. (tabla V) por dos motivos: reducir costos de construcción y, como se menciona en el párrafo anterior, bajo condiciones de invierno la energía se concentra en la zona de estudio, por lo que el oleaje llega con mayor facilidad a los cantiles.

Otro aspecto importante a considerar en el diseño de la obra es el tránsito marítimo que se tiene por la cercanía del Puerto del Sauzal. En caso de utilizar en el diseño la altura de ola correspondiente a condiciones extremas, la obra tendría que desplantarse más lejos de la costa y a mayor profundidad, lo cual podría representar un riesgo a las embarcaciones.

Por lo antes expuesto, se decidió colocar el rompeolas de manera paralela a la costa a una profundidad de 4 m. (230 m. de la costa), la cual se encuentra en el rango entre 1.0 y 8.0 m. propuesto en la literatura para rompeolas si la zona esta expuesta a oleaje energético (Dally y Pope, 1986).

Aunque existen varias fórmulas para el cálculo del peso de los elementos para cada sección del rompeolas, se trabajó con la fórmula de Hudson (1952), ya que es la más utilizada en el diseño de las obras en México. Esta fórmula considera parámetros como altura de la ola de diseño, coeficiente de estabilidad (K_d) y densidad de los elementos utilizados en la construcción. La estimación de la altura de ola de diseño ya fue discutida, faltando definir el coeficiente de estabilidad que, en este caso, se

consideró para oleaje no rompiente, debido a que se propone que el rompeolas se construya en una profundidad de 4 m. que es mayor a la estimada para el rompimiento del oleaje de diseño (2.88 m.). Respecto a los elementos que conformarán la estructura, se propone utilizar roca Andesita, cuya densidad es de 2.65 ton/m^3 , ya que existe una cantera de este material en Ensenada, conocida como Cerro del Vigía, de la cual se pueden extraer rocas con un peso de hasta 8 toneladas. La gran mayoría de las obras que se han construido en esta bahía han sido con esta roca, pues es fácil adquirirla y sus características permiten que sea utilizada, ya que es resistente a la fractura y a la abrasión del oleaje. (González- Villagran, 1992)

El cálculo de los pesos arrojó elementos de 6 ton en la capa coraza, mientras que la capa secundaria fue de 700 kg y el núcleo de 30 kg, (figura 17) lo que indica que los pesos para el rompeolas se encuentran en el rango que ofrece la cantera del cerro del Vigía.

Es importante recalcar que cuando se construye una obra de protección, gran parte del éxito de la misma radica en que los pesos de los elementos que conformarán la misma, sean respetados ya que de no ser así, se pueden presentar daños en la estructura, principalmente deslizamientos. Si se cumple con las especificaciones del diseño se espera que el daño que pueda sufrir la obra al ser impactada por el oleaje de condiciones normales, oscile entre 0 y 5 %, es decir, que de cada 100 rocas que componen la obra, entre 0 y 5 serán removidas una vez que impacte la ola de diseño. Esto significa que bajo condiciones de tormentas extremas, como las presentadas en la tabla V, con alturas de 7.0 y 7.7 m. el rompeolas presentaría graves daños; sin embargo, se espera que cuando se presenten estas condiciones, la ola reventará a una mayor distancia de la costa y, por ende, del rompeolas significando un daño mínimo para la estructura excepto en aquellos casos cuando las condiciones se conjuguen y se presenten niveles de mar más altos que los normales, en cuyo caso existe la posibilidad que la profundidad

donde se desplanta la estructura aumente a tal grado que el oleaje extremo rompa sobre la misma. Es de esperar que los daños rebasen el 50% y por lo tanto se requerirá de reconstruir la obra. Normalmente en esta región se ha estimado por autores como Plaza- Flores (1979) y Flick (1989) citado en Appendini ,1998), que una combinación de marea alta y storm surge puede generar un aumento en el nivel del mar respecto a marea media de aproximadamente 1.78 m., lo que significa que aún bajo estas condiciones el oleaje extremo rompería antes de alcanzar la estructura, motivo por el cual no se espera rebasar el 50% de daño durante su tiempo de vida útil.

A pesar de que se hicieron los cálculos para que los elementos resistan el embate de las olas, no se descarta la posibilidad de que lleguen a salirse algunos provocando daños estructurales, como el desacomodo de los elementos de la coraza. Por ello, será necesario implementar programas de monitoreo y mantenimiento de la obra para prevenirlos y, en su caso, repararlos oportunamente.

Se recomienda realizar estas actividades antes y después de la época de tormentas. Otro posible daño que debe prevenirse es la socavación en la base de la estructura. Sin embargo, el estudio de Run down nos indica que este es de 2.60 m. y ya que la obra se desplanta a los 4.0 m. el problema será mínimo, además de que la playa en la zona de rompiente está conformada por material consolidado lo que reducirá aún más el posible efecto de socavación que se pudiera presentar en condiciones de marea baja, lo que además prevendrá problemas asociados al hundimiento de la obra.

La pendiente de la estructura, se definió siguiendo la recomendación de García-Flores, (1988) y Chasten, *et al* . (1993) que sugieren basarse en una pendiente de 1:2 ya que pendientes mayores generan deslizamientos y menores aumentan costos.

Cuando se coloca una obra de protección frente a la costa, se puede perturbar el patrón de corrientes litorales, lo que en su momento puede generar un problema si es que se disminuye la cantidad de sedimento aportado corriente abajo. Si este fuera nuestro caso, el efecto no sería tan marcado por dos razones: la costa al sur de Las Rosas se encuentra conformada en su mayoría por cantiles bajos con una playa protectora en su base conformada por cantos rodados y de acuerdo a Cruz-Colín y Curul- Magaña (1997) la cantidad de sedimento transportado por la corriente litoral es mínima. Ambos aspectos pronostican un bajo impacto corriente abajo si es que algo de sedimento queda atrapado frente a la playa de Las Rosas por efecto del rompeolas.

La longitud, orientación y distancia a la costa del rompeolas se obtuvo a partir de los estudios presentados por los autores Dally y Pope 1986. Donde se asume que la obra se desplantará paralela a la costa y la relación entre la longitud de la estructura y la distancia $L_s/X = 1.5$ a 2.0 en la que se colocará debería asegurar la formación de un tómbolo, aunque físicamente es difícil que se forme por las características propias del material que compone la playa. El objetivo que se persigue al pretender mantener la relación entre la distancia y la longitud del rompeolas tal que se genere un tómbolo es permitir que este sedimento, que en esta caso serían los cantos rodados que componen la playa, quede atrapado en la zona de sombra del rompeolas para así mantener una playa protectora que, aunado al efecto disipador del rompeolas, brinde una mayor protección a los cantiles. Bajo este criterio, el rompeolas se debe construir paralelo a la costa, a una distancia de 230 m. de la playa y deberá tener una longitud de 460 m.

La idea original era diseñar la estructura, de tal manera que, por efecto de la misma, se redujera la altura de la ola a tal grado que no tuviese la capacidad de remover el sedimento aportado por el cantil; sin embargo, una vez hecho el estudio de difracción y debido al que el sedimento que conforma el cantil es muy fino, la estructura no permitía reducir la altura lo suficiente como para permitir que el

sedimento permaneciera en la playa, por lo que se optó por diseñar para generar un tómbolo como se mencionó en el párrafo anterior

En este trabajo no se realizaron estudios de transmisión ni reflexión. No obstante, si se desea construir la obra es necesario que se tomen en cuenta debido a la cercanía con el puerto de El Sauzal

La construcción de estructuras de este tipo sirve como protección a la costa, disipando la energía de las olas y funcionando como hábitat ideal para organismos bentónicos e intermareales

8. Conclusiones

Con base a los estudios oceanográficos y las condiciones del lugar del área de estudio se obtuvo que el oleaje que más afecta a la zona, es el de Invierno, el cual presenta las siguientes direcciones predominantes 285° , 290° , 300°

El diseño de la estructura fue para oleaje de condiciones normales para alturas rompiente de 2.88 m. a 3 m. de profundidad con oleaje incidente de 300°

La estructura se desplantará a los 4 m. de profundidad a 230 m. de distancia a la costa, y tendrá una longitud de 460 m.

Este trabajo representa la mejor alternativa de protección para amortiguar la energía del oleaje y proteger al cantil.

9.REFERENCIAS

- Ahumada-Sempoala,M.A.(1993).Corrientes litorales inducidas por oleaje en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura. FCM-UABC 38pp
- Appendinin – Albrechtsen, C. (1995). Manual para el diseño de rompeolas separados de la costa como obras de protección costera. No publicado 36pp.
- Appendi – Albrechtsen ,C. (1998). Plan de manejo de la erosión costera para playas de Rosarito,B.C.,Mexico. Tesis de Maestría. FCM-UABC 123pp.
- Bermúdez Zavala. R.(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. FCM-UABC 72pp
- Chasten,M.,J. Rosati y J. McCormick,(1993). Engineering desing guidance for deteched breackwater as shoreline stabilization structures. U.S. Army Corps of Engineers. Reporte Técnico.CERC-93-19.141pp.
- Cruz- Colín, M. E. (1994). Balance sedimentario de la Bahia de Todos Santos, B.C., México. Tesis de Licenciatura, FCM-UABC 77pp.
- Cruz- Colín, M. E. Y L.A. Cupul – Magaña (1997). Erosión y aporte sedimentario de los cantiles marinos de la Bahía de Todos Santos, B.C. en el periodo de 1970 a 1991. Ciencias Marinas. Vol. 23 (3) : 303-315pp.
- Dally,W.R. y J. Pope (1986). Detached breawaters for shore protection. Reporte Técnico CERC-86-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Doren-Ossio,K.V.,(1991). Cuantificacion del volumen de sedimento depositado frente al rompeolas (lado no protegido) del puerto de Ensenada,B.C. Tesis de Licenciatura, FCM-UABC. Ensenada, B.C.
- García - Flores, M. (1988).Rompeolas sumergidos, estudio experimental. Series del instituto de Ingeniería. N. 511 Instituto de Ingeniería, UNAM.175pp.

González – Villagran, A. (1992). Reevaluación de los estudios utilizados para el diseño del puerto de Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. FCM-UABC 126pp.

Guardado – France, R. (1997). Funcionalidad de las obras de protección costera construidas en la Bahía de Todos Santos, B.C. México. Tesis de Maestría. FCM-UABC 145pp.

Komar, P. (1998). Beach and sediment. Segunda edición. Edit. Pentice Hall. USA. 545pp.

López-Luna, M. (1990). Cuantificación del volumen de sedimento transportado por la corriente litoral en las playas de El Sauzal y Pesquera Zapata, ubicadas en la zona norte de la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Tesis de Licenciatura. FCM-UABC 57pp.

Martínez – Díaz de León, A. Y Pablo Coria (1993). Distribución de probabilidad de la altura del oleaje dentro de la Bahía de Todos Santos, B.C., México. Ciencias Marinas. Vol. 19(2) : 203-218.

Méndez- Arriaga, M. A.. (1982). Determinación del transporte litoral predominante en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de Licenciatura. FCM-UABC 30pp

Plaza – Flores, J. (1978). Cambios en la playa San Miguel debido a un deslizamiento y a la adición de un nuevo material vertido a la línea de costa. Tesis de Licenciatura FCM-UABC 64pp

Pope, J. Y Dean (1986). Development of design criteria for segmented breakwaters. Proceedings, 20th International Conference on Coastal Engineering Taipei, Taiwan, American Society of Civil Engineers. 2144-58.

Ramos- Olvera, R., (1993). Cantiles en la zona de El Sauzal de Rodríguez: perfiles, procesos y problemas. Tesis de Licenciatura, FCM-UABC.

Rosati, J.D. (1990). Functional Design of breakwaters for shore protection: Empirical methods. Reporte Técnico. CERC-90-15, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Torres Navarrete, C. (1991). Transporte litoral en una zona de

la Bahía de Todos Santos, B.C., México durante abril, agosto y octubre de 1995.
Ciencias Marinas Vol. 17(3):59-71

Ulloa- Torres, M. (1989). Refracción lineal del oleaje en el Puerto de Ensenada, B.C.,
Tesis de Licenciatura. FCM-UABC.48pp