



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA  
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PERFIL DE PLAYA BAJO  
CONDICIONES DE OLEAJE EXTREMO EN ROSARITO, BAJA  
CALIFORNIA MÉXICO.**



Trabajo de tesis que para obtener  
el título de Oceanólogo presenta:  
Ricardo Andrés Ortíz Escorza.  
Noviembre 2005.

Para mis Papas, Ing. Alfonso Ortíz Medina y Lila Escorza de Ortíz.

Para Nadia García, Hasta la victoria, siempre!

Para mis hermanos y familia entera.

Be Mindfull.

Allow space to be inspired.

Live a Life of wonderment and openendedness,  
rather than one of mechanical repetition and inevitability.

Be inspirational

## AGRADECIMIENTOS

Más que por compromiso, realmente quiero hacer un reconocimiento público al Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León que durante todo este tiempo siempre me apoyó para terminar este trabajo. Al mismo tiempo quiero agradecer a mis sinodales MC. Rigoberto Guardado France y al MC. José Román Lizarraga, gracias profesor Román por dejarme participar en su equipo de trabajo en playas de Rosarito B.C., por usted, Christian Appendini y Tonatiuh Mendoza hoy finalizo esta etapa.

Agradezco al Ocean. Eduardo Gil Silva, por su apoyo en las salidas al campo y durante el levantamiento de los perfiles batimétricos, y también por tu amistad durante estos años.

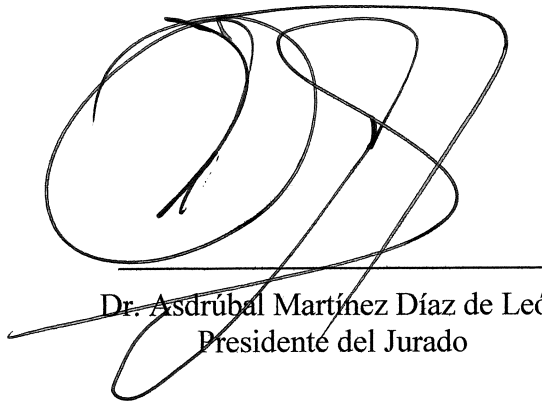
Agradezco al surf que siempre me recuerda que existe un día diferente como cada swell que llega a la costa y lo espero para surfear !!

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PERFIL DE PLAYA BAJO  
CONDICIONES DE OLEAJE EXTREMO EN ROSARITO, BAJA  
CALIFORNIA MÉXICO.**

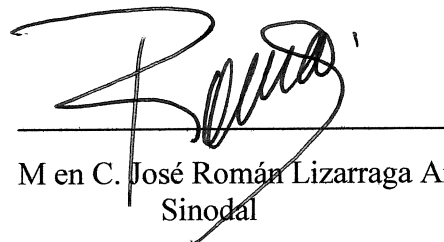
Tesis que para obtener el título de oceanólogo presenta

Ricardo Andrés Ortíz Escorza

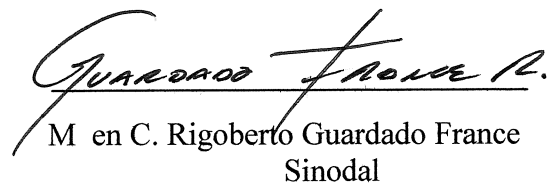
Aprobada por:



Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León  
Presidente del Jurado



M en C. José Román Lizarraga Arciniega  
Sinodal



M en C. Rigoberto Guardado France  
Sinodal

# Índice

<b>1. Resumen</b>	<b>7</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>8</b>
<b>3. Antecedentes</b>	<b>12</b>
3.1. Generales . . . . .	12
3.2. Particulares . . . . .	13
<b>4. Área de Estudio</b>	<b>15</b>
<b>5. Hipótesis</b>	<b>17</b>
<b>6. Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>7. Metodología</b>	<b>18</b>
7.1. Modelo SBEACH . . . . .	18
7.2. Secuencia de simulación . . . . .	22
7.3. Perfiles de playa . . . . .	22
7.4. Datos de oleaje . . . . .	23
7.5. Datos de marea . . . . .	23
7.6. Calibración . . . . .	24
7.7. Verificación . . . . .	24
<b>8. Resultados</b>	<b>25</b>
8.1. Calibración . . . . .	25
8.2. Simulaciones . . . . .	30
8.2.1. Diciembre 1998 . . . . .	30
8.2.2. Enero 1999 . . . . .	38
8.2.3. Febrero 1999 . . . . .	48
8.2.4. Agosto 1999 . . . . .	54
<b>9. Discusiones</b>	<b>58</b>
9.1. Discusiones de las características del transporte por mes. . . . .	58
9.1.1. Diciembre de 1998 . . . . .	58
9.1.2. Enero de 1999 . . . . .	60
9.1.3. Febrero 1999 . . . . .	63
<b>10. Conclusiones</b>	<b>68</b>
<b>11. Bibliografía</b>	<b>69</b>

## Índice de figuras

1. Perfil de playa típico antes, durante y después de una tormenta. (A) representa el perfil típico antes de una tormenta, (B) es el perfil durante la tormenta y (C) representa el perfil post-tormenta. MA, MB y MNT son abreviaciones de Marea Alta, Marea Baja y Nivel de Marea durante la tormenta. . . . . 9
2. En esta figura se ilustra la inundación generada por el oleaje en una playa al sur de la CFE, durante un evento de tormenta extrema. . . . . 11
3. Área de Estudio. 1. Central termoeléctrica Benito Juárez. 2. Perfil de playa frente a condominios Oceanica 3. Muelle Hotel Rosarito Beach . . . . . 15
4. El modelo SBEACH divide el perfil de playa en cuatro zonas dependiendo de las características del transporte en cada zona. 1. Zona atrás del punto de rompiente, II. Zona sobre el punto de rompiente, III. Zona después del punto de rompiente, IV. Zona swash . . . . . 20
5. Esta figura presenta las series de oleaje que se introdujeron al modelo para verificar que el modelo trabajaba correctamente. Las series de tiempo son de altura de oleaje (Hs), periodo de oleaje (Tp), nivel de marea del 2 Noviembre 1991 referido al National Geodetical Vertical Datum (NGVD). . . . . 26
6. Resultado de la simulación del modelo SBEACH utilizando el perfil inicial correspondiente a el 26 de Junio de 1991 (Negro), y el perfil final del 2 de Noviembre 1991 después de una tormenta (Magenta).El perfil calculado por el modelo se muestra en la línea azul. Este ejemplo se utilizó para demostrar que el modelo utilizado trabaja aceptablemente. . . . . 27
7. Series de tiempo utilizados para calibración del modelo en la playa de Rosarito B.C. La altura de oleaje (Hs) cuadro superior, periodo de oleaje (Tp) recuadro central y nivel de marea referida al NMM cuadro inferior. Diciembre 1998 . . . . . 27
8. Resultado de la calibración del modelo se presenta el perfil inicial, azul. Rojo Perfil Medido, Magenta Perfil simulado. A partir de este gráfico podemos decir que el modelo esta calibrado para la playa de Rosarito B.C. . . . . 28

9.	Climatología del oleaje durante el mes de Diciembre de 1998. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros. . . . .	33
10.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 1 de Diciembre 1998. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	34
11.	Perfil inicial del Evento 1 de Diciembre 1998, en negro. Se presenta el perfil resultante de la simulación de 79 horas, en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje. . . . .	35
12.	Primeros 200m resultado de la simulación del Evento 1 de Diciembre En negro el perfil inicial medido, en azul el perfil resultante de la simulación . . . . .	35
13.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 4 del mes de Diciembre 1998. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	36
14.	Perfil inicial correspondiente al evento 4 de Diciembre 1998, en negro. Se presenta el perfil resultante de la simulación de 69 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje . . . . .	37
15.	Primeros 200m del perfil de la playa simulando correspondiente al evento 4 de Diciembre 1998. En negro el perfil inicial medido, en azul el perfil resultante de la simulación . . . . .	37
16.	Climatología del oleaje durante el mes de Enero de 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros. . . . .	41
17.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 1 del mes de Enero 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	42
18.	Perfil inicial correspondiente al evento 1 de Enero 1999, en negro. Se presenta el perfil resultante de la simulación de 90 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje . . . . .	43
19.	Primeros 200 m del perfil inicial en negro, en azul el perfil resultante de la simulación . . . . .	43

20.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 3 del mes de Enero 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	44
21.	Perfil inicial del evento 3 de Enero 1999, en negro, se presenta el perfil resultante de la simulación después de 86 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje. . . . .	45
22.	Primeros 200m del perfil inicial del evento 3 Enero 1999 ,en negro, en azul el perfil resultante de la simulación . . . . .	45
23.	Climatología del oleaje y marea del evento 4 Enero 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	46
24.	Perfil inicial del evento 4 de Enero 1999, en negro, se presenta el perfil resultante de la simulación de 82 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje . . . . .	47
25.	Primeros 200m del perfil inicial en negro, en azul el perfil resultante de la simulación . . . . .	47
26.	Climatología del oleaje del mes de Febrero de 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros.	49
27.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al mes de Febrero 1999 evento 3. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	50
28.	Perfil inicial correspondiente al evento 3 de Ferero 1999, en negro, el perfil resultante de la simulación de 100 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje . . . . .	51
29.	Primeros 200m del evento 3. Perfil inicial en negro, en azul el perfil resultante de la simulación . . . . .	51
30.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al mes de Febrero 1999 evento 2. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	52
31.	Perfil inicial correspondiente al evento 2 de Febrero 1999 en negro, el perfil resultante de la simulación de 39 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje . . . . .	53

32.	Evento 2 Febrero 1999. Primeros 200m del perfil inicial medido, en negro. En azul el perfil resultante de la simulación . . .	53
33.	Climatología del oleaje durante el mes de Agosto de 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros. . . . .	55
34.	Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 1 de Agosto 99. El recuadro superior muestra la altura del oleaje (Hs) en metros. El periodo (Tp) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros . . . . .	56
35.	Perfil inicial del evento 1 de Agosto 1999 en negro, el perfil resultante de la simulación en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje. . . . .	57
36.	Primeros 200m del perfil de Agosto 1999, el modelo simuló el transporte del sedimento de las barra hacia la parte alta del perfil, generando una berma. . . . .	57
37.	La variación del perfil del mes de Diciembre de 1998 siendo el evento 1 el evento más erosivo de la serie. Perfil inicial, negro, el perfil del evento 1 en rojo . . . . .	60
38.	Criterio empírico utilizado por Magnus y Kraus (1989) para observar el movimiento de sedimento comparando la pendiente del oleaje en aguas profundas y el coeficiente de decaimiento del oleaje de Dean (1987). En esta figura se observa como el transporte para el mes de Diciembre es principalmente hacia fuera de la costa. . . . .	61
39.	Se ilustra como el transporte de sedimento originado por el oleaje sobre el perfil de playa de enero transporta sedimento sobre la cara de la playa para formar barras a los 130,169 y 180 metros. . . . .	63
40.	Criterio de distinción entre barra o berma para el mes de enero 98 y durante el evento 3. Se muestra como algunos puntos caen en la parte de generación de barra, sin embargo el transporte principal es fuera de la costa. . . . .	64
41.	El modelo simula aceptablemente el transporte del sedimento fuera de la costa, en Febrero 1999. El oleaje con mayor altura rompe directamente sobre la plataforma erosionándola . . . .	65
42.	El modelo simula dos rompientes, la primera que es la mas alejada de la costa donde el oleaje disipa la mayor cantidad de energía y la segunda más cercana a la costa, el modelo es capaz de permitir la reformación del oleaje . . . . .	66

43.	La variación del set-up en el transcurso del evento, nótese que el modelo simula dos lugares de rompiente y por lo tanto dos lugares donde se genera el set-up . . . . .	67
44.	El transporte de sedimento que se da en este evento es completamente fuera de la costa, generando una erosión sobre la playa . . . . .	67

## Índice de cuadros

1.	Valores numéricos de los diferentes coeficientes utilizados para simular . . . . .	28
2.	Variaciones de la Altura del Oleaje y el Periodo . . . . .	29

## 1. Resumen

Durante un evento de tormenta el transporte de sedimento sobre el perfil de playa es principalmente en dirección perpendicular. Durante una tormenta el volúmen de sedimento se transporta de la parte alta de la playa hacia fuera de la costa para formar barras en la zona de rompiente. La zona mayormente afectada son las construcciones sobre la costa sufriendo inundaciones de las propiedades causando perdidas económicas de importancia para sus residentes. En 1999 las playas de Rosarito B.C. fueron severamente afectadas por eventos de tormenta. Para determinar si la variación del perfil en la playa en Rosarito obedece a cambios estacionales del oleaje y si esta respuesta es mayor durante eventos de tormenta se utilizó el modelo numérico SBEACH como una herramienta capaz de predecir el daño que puede provocar el oleaje a la zona de costa. El modelo fué calibrado para las características de sedimento, pendiente de playa y oleaje que se presenta en Rosarito B.C. El modelo simula el cambio del perfil de playa inducido por el transporte perpendicular de sedimento durante un evento de tormenta a partir de un perfil inicial y reproduce las características de bermas, la generación de barras por transporte perpendicular a la costa, calcula niveles de inundación y altura de oleaje. Se realizó la simulación de ocho perfiles tomados en los meses de Diciembre 1998, Enero 1999, Febrero 1999, para determinar el daño que una tormenta puede ocasionar sobre el perfil. Se realizó tambien una simulación del perfil en Agosto 1999 para determinar la capacidad del modelo para reproducir el cambio del perfil de playa con características de oleaje constructivas. Durante las simulaciones de los meses de invierno se utilizaron eventos de oleaje con alturas de hasta seis metros y periodos mayores de 14 segundos. No se encontró relación alguna entre las variaciones de periodo constante, oleaje variante, o viceversa, así como tampoco variación alguna con ambos factores variando. Sin embargo se encontró que un evento de tormenta muy largo tiene mayor efecto de erosión sobre el perfil que uno con poca duración y muy intenso, se encontró que durante una tormenta el mayor volumen del sedimento es trasportado fuera de la zona de rompiente, para perfiles y en los meses de Enero y Febrero el oleaje inundo la parte alta del perfil erosionando las bermas. Se determinó que para el perfil que se encuentra en Rosarito los cambios del perfil obedecen a los cambios estacionales del oleaje en invierno y verano.

## 2. Introducción

Cerca de dos terceras partes de la población mundial vive dentro de la zona costera (Gómez-Morín, 1981). En la zona costera interactúan factores atmosféricos y oceanográficos como son, las corrientes generadas por el oleaje incidente, las variaciones en el nivel del mar inducido por la marea y la acción del viento, entre otros. En conjunto estos factores crean depósitos de arena llamados playas (Aubrey, 1979).

Las playas pueden considerarse como estructuras flexibles con características recreativas importantes que proveen de protección a la vida y los recursos materiales a lo largo de la costa. Una característica importante de las playas es la forma de su perfil de playa que tiene la función natural de amortiguar el oleaje incidente (Komar 1998). Tanto la forma del perfil de playa, como la redistribución de la arena a lo largo del perfil, responden a procesos costeros que modifican la playa en tiempo y espacio; dentro de estos procesos el oleaje es el más importante.

El perfil de playa presenta características morfológicas distintas dependiendo del tipo de oleaje que incide sobre la playa. El oleaje de mayor altura rompe más lejos de la costa, ampliando la zona de surf poniendo en suspensión el sedimento, generándose un transporte perpendicular a la costa, lo que resulta en transporte de sedimento sobre el perfil de playa. La Figura 1 muestra como durante una tormenta la playa modifica su perfil y como éste perfil se ajusta nuevamente después de la tormenta. El recuadro del medio de la figura 1 muestra con una línea punteada el perfil antes de la tormenta y con una línea continua el perfil resultante, las líneas horizontales segmentadas muestran los límites de la marea alta y la marea baja que es en general el área de la parte húmeda de la playa.

Durante un evento de tormenta la arena que forma las barras es tomada en su mayoría de las dunas. Después de un evento de tormenta el oleaje, por sus características de menor intensidad, regenera el perfil de playa aumentando la extensión de cara de la playa y por lo tanto su berma, (figura 1).

Otro mecanismo que ayuda a reconstruir la playa después de un oleaje de tormenta es el viento. El viento durante mareas bajas transporta la arena de la cara de la playa a la berma y dunas. La disminución del ancho del perfil de playa que ocurre durante un evento de tormenta es importante, debido a que este retroceso representa un riesgo para la infraestructura que se encuentra sobre la franja costera.

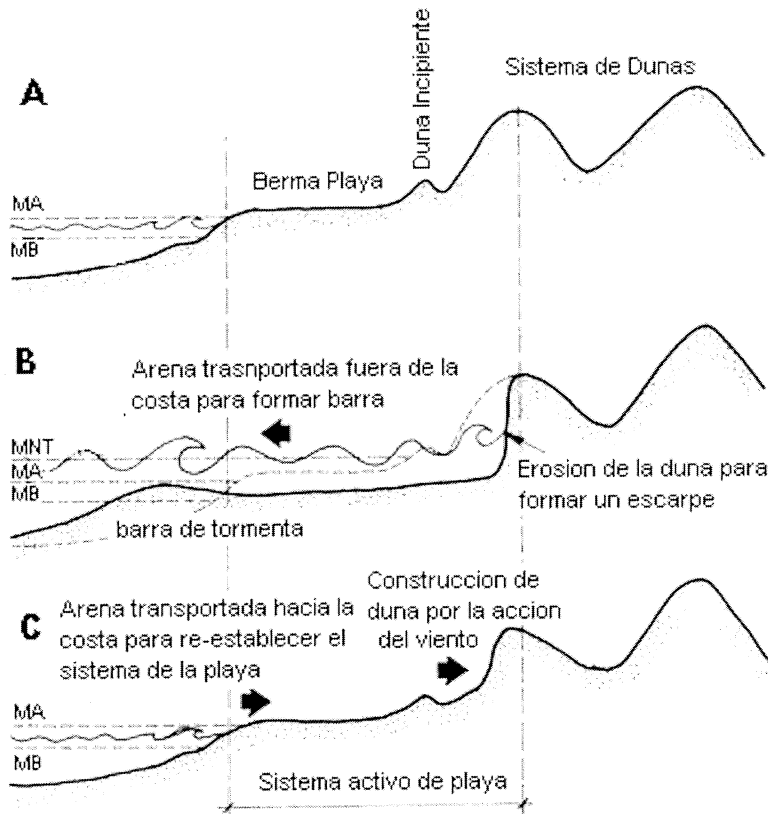


Figura 1: Perfil de playa típico antes, durante y después de una tormenta. (A) representa el perfil típico antes de una tormenta, (B) es el perfil durante la tormenta y (C) representa el perfil post-tormenta. MA, MB y MNT son abreviaciones de Marea Alta, Marea Baja y Nivel de Marea durante la tormenta.

Los eventos de tormenta y los eventos extremos son los que producen los daños más severos a la playa ya que estos eventos erosionan la playa modificando su perfil en escala de horas, dando como resultado una recesión significativa y un daño a las propiedades que se encuentran en la zona costera.

La energía y dirección del oleaje que arriba a una playa en particular determina el grado de devastación que tendrá una tormenta sobre la playa. Existen playas donde la mayor parte del año se recibe oleaje con características intensas, presentando estas playas una morfología diferente en su perfil y en el tamaño del sedimento. Por el contrario, en una playa donde las características del oleaje son principalmente de baja energía y eventualmente

llega oleaje durante una tormenta con características de altura y periodo más altas al promedio anual, a esta tormenta que cambiara la morfología y transportara sedimento sobre el perfil a este evento se le llamará un evento de oleaje extremo.

El conocer como se distribuye el sedimento en forma perpendicular a la costa por efectos de tormenta es importante, ya que de esta manera se puede planear el mejor uso de la playa. Una predicción cuantitativa de la respuesta del perfil de playa a la acción del oleaje es una meta importante en el desarrollo de la protección costera. La capacidad para cuantificar y estimar la erosión de las dunas y la respuesta del perfil a las tormentas es importante para hacer estudios económicos sobre el desarrollo de industrias y asentamientos urbanos en la costa.

Las tormentas invernales que se presentaron en el municipio de Rosarito B.C. en Febrero de 1998 afectaron gravemente las playas tanto en su perfil de playa como en sus construcciones cerca de la costa. En ese año se presentaron alturas de ola de cuatro metros y niveles de marea más altos del promedio anual, además de esto los efectos del fenómeno "Niño de 1998", aumentaron el efecto erosivo de la tormenta en la zona de costa. Debido a la capacidad erosiva del oleaje, observada en ese año, se iniciaron programas para crear una base de datos de perfiles de playa para documentar el impacto del oleaje sobre la playa, que es un gran atractivo en esa zona. Creándose la necesidad de estudiar, en México, como el perfil de playa responde a este fenómeno natural, que modifica la morfología del perfil de playa erosionando de manera drástica y cambiando de lugar el sedimento que aquí se encuentra.

En la figura 2 se muestra una zona al sur de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E) de Rosarito la cual resultó afectada por el oleaje durante los eventos de tormenta ya mencionados. Nótese que el agua llegó hasta las construcciones sobre la costa.

Debido a la importancia que tiene el conocer y predecir la forma del perfil de playa después de una tormenta en este trabajo se simulará la respuesta de un perfil de playa frente a los condominios oceanica, en Rosarito B.C. a eventos de oleaje de tormenta. Para la simulación se utilizará el modelo numérico SBEACH (Storm BEACH Change), desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de estados unidos. (Larson & Kraus,1989)



Figura 2: En esta figura se ilustra la inundación generada por el oleaje en una playa al sur de la CFE, durante un evento de tormenta extrema.

## 3. Antecedentes

### 3.1. Generales

Los primeros estudios de la formación de barras y bermas en la playa, por el oleaje rompiente, fueron hechos por Lehman, (1884) y Shepard (1950). De estos trabajos derivaron diversas investigaciones, como la de Rector (1954) y Seville (1957), que muestran como el oleaje rompiente es la principal causa de la formación de las barras. La importancia del transporte de sedimento como una carga que es movida por medio de las corrientes dentro de la zona de surf fué enfatizada por Dean(1973), cuyos resultados fueron verificados por medio de experimentos en condiciones controladas en un tanque de oleaje.

El límite de transporte efectivo para eventos de tormenta es comúnmente tomando como la profundidad de rompiente  $h_b$ , basándose en la altura de oleaje significante. Durante ciclos erosión/acresión el límite superior del cambio significativo en la altura del perfil coincide con el límite del run-up del oleaje ( Vellinga , 1983 ).

Dean en 1973 desarrolló un modelo de transporte de arena que asumía que la mayor parte del transporte es de manera perpendicular a la costa en forma de una carga de sedimento suspendido, para el cual la velocidad de asentamiento del sedimento emerge como un parámetro importante. El criterio predictivo de barra / berma establecido por Dean esta expresado en términos de la pendiente del oleaje ( $H_o/L_o$ ) y la velocidad de asentamiento de los sedimentos ( $\pi\omega/gT$ ). Dean (1973 ) introduce el parámetro adimensional de caída,  $H/wt$ , en un modelo conceptual de caída de sedimento e indicador de transporte de sedimento de manera perpendicular a la costa.

Exísten diversos criterios para predecir la repuesta que tiene el perfil para formar bermas o barras, estos criterios están en función de la pendiente del oleaje y el tamaño del sedimento. El criterio más utilizado es el criterio de Dean y Dally (1987).

Komar en 1976 estableció que existe un cambio del perfil de playa después de eventos de oleaje extremo. Este cambio despertó la curiosidad por desarrollar ecuaciones matemáticas que relacionen la pendiente de la playa a las características del oleaje. Estas ecuaciones se utilizaron para analizar la dinámica del oleaje rompiente, la generación de corrientes y el estudio de los procesos de transporte de sedimento enfocado en el cambio morfológicos del perfil y la línea de costa.

A lo largo de la historia se han desarrollado diversos modelos numéricos para predecir el cambio del perfil de playa, aunque solo algunos se han utilizado para cuestiones ingenieriles. Los modelos numéricos que suponen el cambio del perfil de playa a partir del oleaje rompiente fueron desarrollados por Kriebel (1982), Dean y Dally (1984), Kriebel y Dean (1985). Actualmente el modelo más exitosamente utilizado es el de Kriebel (1982), Kriebel y Dean (1985) aplicándose a varias costas de los Estados Unidos. Este modelo, basado en ecuaciones empíricas del cambio del perfil de playa fué desarrollado tratando de reproducir las características macroscópicas, como las barras y bermas, usando datos disponibles en la mayoría de las aplicaciones ingenieriles.

El modelo numérico desarrollado por Larson y Kraus (1989), SBEACH, es una herramienta eficiente para evaluar los cambios del perfil de playa durante un evento de tormenta, ya que utiliza series de datos de oleaje, niveles de agua y características generales de la playa.

El modelo SBEACH se desarrolló en las instalaciones del USACE (US Army Corps of Engineers) produciendo cuatro reportes técnicos, el primero presenta el desarrollo numérico del modelo y su fundamentación empírica, el segundo presenta la formulación numérica y experimentos con el modelo, el tercer reporte es el manual del usuario. En este manual se muestran las variables que vienen determinadas y que hay que calibrar para cada caso en particular. El cuarto reporte presenta ejemplos de la aplicación del modelo como herramienta predictiva, de la distribución del sedimento en playas y muros.

### **3.2. Particulares**

El estudio de la distribución del sedimento nos permite conocer la influencia que tienen las corrientes litorales sobre la dinámica de la playa y sus repercusiones sobre estructuras costeras que se construyen en la zona litoral. En 1985 Marmolejo-Lara estudió los patrones de las corrientes superficiales, en Rosarito B.C, utilizando objetos flotantes y el movimiento del sedimento por medio de arena pintada para poder observar la dinámica de depocitación en presencia de construcciones en la costa y al mismo tiempo dar una respuesta al problema de azolve de la Central Termoeléctrica Benito Juárez .

Marmolejo-Lara basó su estudio en los patrones de corrientes litorales y en la capacidad de la playa para poder llegar a su estado de equilibrio ya

que cuando una playa está en equilibrio la arena que se deposite en exceso es más susceptible a que sea removida de este lugar.

En 1995 Appendini-Albrechtsen utilizando el modelo numérico GENESIS estudió el cambio del volumen de arena frente a la Central Termoeléctrica (CT) Benito Juárez en Rosarito B.C. El modelo GENESIS utiliza las diferencias espaciales y temporales en el Transporte a lo Largo de la Costa (TLC).

Appendini-Alberchtein encontró que la dirección del transporte a lo largo de la costa fué hacia el norte en la zona sur de la central termoeléctrica y hacia el sur en la zona norte, con esto el transporte a lo largo de la costa converge hacia la obra de toma de la CT todos los meses. A partir del modelo se encontró que el volumen de sedimento que entra a la central termoeléctrica es de aproximadamente  $21,700 m^3$ .

Lazcano-Venegas en 1997 utilizó el modelo numérico SBEACH para estimar el cambio en el perfil de playa en condiciones de tormenta en playas de Tijuana, los eventos de tormenta son modificadores extremos del perfil de playa, donde el principal factor que produce la erosión es el oleaje incidente. Lazcano-Venegas basó su investigación en tres parámetros que representan la variabilidad en intensidad, duración y periodicidad de la tormenta que influye de manera diferente en la forma del perfil de playa. Un evento de tormenta con una duración promedio tiene una influencia diferente sobre el perfil que un evento con altura de ola máxima o eventos consecutivos en un lapso de 8 días. Utilizando el modelo numérico determinó que el cambio de la forma del perfil de playa depende de la influencia del oleaje. Concluyendo que la playa es más vulnerable a la erosión cuando ocurre una serie de eventos de tormenta continuos, aunque ocurran alturas menores a las observadas en un evento de tormenta con duración de 1 a 2 días (Lazcano-Venegas, 1997).

En el periodo de 1998 a 1999 Mendoza-Ponce estudió las variaciones espacio temporales de los perfiles de playa costeros en Rosarito B.C. con el fin de observar la capacidad recreacional y de protección de la playa. Mendoza-Ponce observó que los procesos depocitacionales en verano producen mayores valores del ancho de playa incrementando de esta manera la capacidad turística, por el contrario en el invierno se producen los eventos de oleaje más extremos produciendo una disminución en el ancho de playa. Además de que en las temporadas invernales pueden presentarse eventos extremos como "El Niño" que se presentó en 1998 en el que se removieron de la playa  $1,272,024 m^3$ /temporada a lo largo del área de estudio. Mendoza-Ponce recomienda un estudio más exhaustivo sobre la distribución del sedimento en la playa.

## 4. Área de Estudio

El área de estudio se encuentra en las playas del municipio de Rosarito B.C., donde se seleccionó una localidad ubicada frente a los condominios oceánica. (Figura 3). Las variaciones de altura de este perfil cuya longitud promedio es de 1000 m se midieron mensualmente entre el periodo de Diciembre de 1998 a Agosto de 1999, . La ubicación geográfica de Playas de Rosarito es de  $32^{\circ} 20'$  y  $32^{\circ} 23'$  de latitud norte y entre los  $117^{\circ} 03'$  y  $117^{\circ} 05'$  longitud oeste, 25 km al sur de la frontera México-EE.UU. Los ríos cercanos son: Baja Malibú, Alseco y Rosarito, los cuales drenan rocas intrusivas volcánicas y sedimentarias marinas (Gastil 1975), pudiendo ser fuentes principales en el aporte de sedimentos, según lo establecido por Elizarras (1986); El sedimento es arena de grano fino.



Figura 3: Área de Estudio. 1. Central termoeléctrica Benito Juárez. 2. Perfil de playa frente a condominios Oceanica 3. Muelle Hotel Rosarito Beach

Rosarito se clasifica geológicamente como una costa de colisión continental caracterizada por ser relativamente recta, montañosa y con la presencia

de cantiles terrazas elevadas y plataformas continentales estrechas (Inman y Nordstrom, 1971); en la zona baja de playas de Rosarito y en los cauces de los arroyos aflora la formación San Diego, compuesta por conglomerados, areniscas y limolitas (Aragón-Arreola, 1994 ).

La pendiente del fondo marino adyacente a Playas de Rosarito es suave ( 1:60 CFE, 1997) hasta los -13 metros. (Appendini Alberchtein, 1998; CFE, 1997 ). Las mareas que se presentan en la zona son de régimen mixto en el cuál se presentan dos mareas altas y dos bajas, presentándose también dos mareas vivas al mes.

El oleaje que llega a Playas de Rosarito presenta patrones de invierno de octubre a marzo cuando el oleaje se genera en el hemisferio norte, producido por los vientos asociados a tormentas del Golfo de Alaska, siendo este oleaje el más energético de la zona. Durante el verano (Abril - Junio ) se presentan oleaje de huracanes en el pacífico sur, que no son tan energéticos. (Appendini Alberchtein, 1998). El oleaje que arriba a esta región presenta dos direcciones de incidencia dominantes, del NE y E con alturas promedio de 1-2m (Marmolejo-Lara, 1985) y periodos de 10 a 14 segundos.

## 5. Hipótesis

La variación de la forma del perfil de playa durante eventos de tormenta en la zona frente a los condominios Océánica en Rosarito B.C. obedece a un mecanismo de transporte perpendicular a la costa inducido por el oleaje mismo.

## 6. Objetivos

- Calibrar un modelo numérico para estudiar el transporte de sedimento en dirección perpendicular en un perfil de playa en Rosarito B.C
- Simular mediante el uso de un modelo numérico la respuesta del perfil de playa ante eventos de oleaje extremo
- Determinar la respuesta del perfil de playa a condiciones de oleaje en las que:
  - i. La altura de oleaje cambie pero su periodo se mantiene casi constante
  - ii. La altura del oleaje se mantiene constante pero su periodo cambie
  - iii. La altura del oleaje cambia y el periodo cambia

## 7. Metodología

En este trabajo se utilizará el modelo SBEACH para simular la respuesta de un perfil de playa en Rosarito B.C. a eventos de oleaje de tormenta. En esta sección se explican las consideraciones físicas y numéricas que se utilizaron en este modelo numérico. También se menciona y describe la manera en que fué adquirida y procesada la información de entrada al modelo, como los perfiles de playa, la información de altura de oleaje, la variación del nivel del mar inducida por la marea y el tamaño promedio del sedimento que forma el área de estudio en la playa de Rosarito B.C.

### 7.1. Modelo SBEACH

El modelo SBEACH fué desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la Armada de Estados Unidos (CERC por sus siglas en Inglés). Con el propósito de simular las principales características del perfil de playa al interactuar con el oleaje de tormenta. El modelo pone particular atención a los macro cambios del perfil tales como la forma general del perfil, barras y bermas, no dando importancia a variaciones de pequeña escala.

Las características más importantes del modelo numérico SBEACH son:

1. Calcula el tiempo que tarda en evolucionar un perfil de playa sujeto a cambios en el nivel de agua y de los parámetros de oleaje incidente ( $H_o$  y  $T_o$ ).
2. Calcula una configuración de equilibrio del perfil de playa sí todos los parámetros de entrada al modelo se mantienen constantes.
3. Simula la formación y movimiento de las características principales del perfil de playa como son las barras y bermas.
4. Reproduce los cambios de acreción y erosión del perfil de playa.
5. El modelo se basa formalmente en la ecuación de conservación de masa.
6. Simula la reformación del oleaje después de la zona de rompiente permitiendo la posibilidad a la formación de múltiples barras sobre el perfil.
7. Permite la entrada de oleaje monocromático y la simulación del perfil con valores fijos de altura y periodo de oleaje, nivel de marea, viento y ángulo de incidencia del oleaje.

El modelo supone que durante un evento de oleaje extremo el transporte de sedimento es principalmente en dirección perpendicular a la costa y que el transporte paralelo no es significativo. El modelo supone también que no hay pérdida de sedimento y no da buenos resultados de simulación del perfil de playa cerca de estructuras costeras.

Los cambios en la forma del perfil de playa son generados principalmente debido a la rompiente del oleaje, que disipa su energía sobre la costa. Debido a esto el transporte perpendicular a la costa está determinado por el oleaje local, el nivel de agua y las propiedades del perfil de playa.

En general, el modelo SBEACH calcula la dirección del transporte perpendicular (movimiento hacia la costa vs. movimiento fuera de la costa) utilizando relaciones empíricas entre la pendiente de la ola y el número de Dean,  $H/W_sT$  donde:

- $H$  : altura de ola en aguas profundas;
- $w_s$  : coeficiente de velocidad de asentamiento del sedimento
- $T$ : Periodo del oleaje

También utiliza relaciones empíricas para obtener la velocidad de migración de la barras, así como su crecimiento temporal hasta alcanzar su volumen de equilibrio según la ecuación.

$$\frac{V_{eq}}{L^2} = 0,028 \left( \frac{H}{W_sT} \right)^{1,32} \left( \frac{H}{L} \right)^{1,05} \quad (1)$$

Donde  $L$  es la longitud de oleaje en aguas profundas, los otros parámetros corresponden a los definidos en el párrafo anterior.

SBEACH simula la distribución de la arena en la playa por la influencia del oleaje. Las fronteras del modelo son: hacia la costa, el límite del run-up y hacia el mar, la profundidad de movimiento activo de sedimento. La distancia entre estos límites se divide en cuatro zonas, cuya clasificación se basa en la forma en que el sedimento es transportado dentro de cada zona. En la Figura 4 se muestra cada una de estas zonas en referencia a un perfil típico de playa.

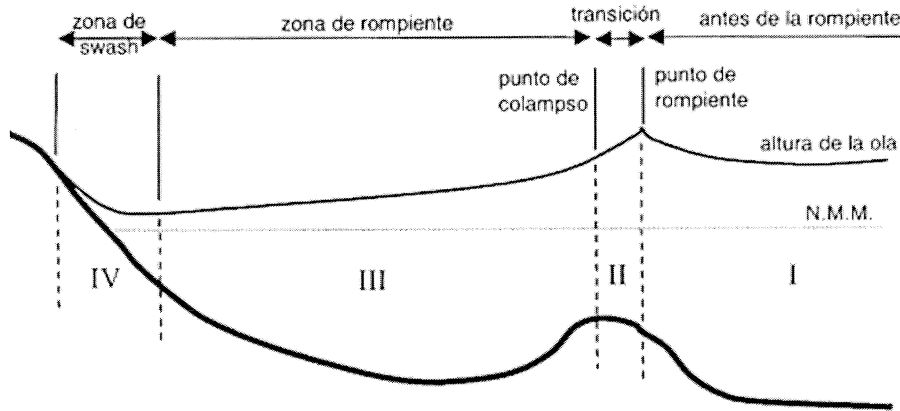


Figura 4: El modelo SBEACH divide el perfil de playa en cuatro zonas dependiendo de las características del transporte en cada zona. 1. Zona atrás del punto de rompiente, II. Zona sobre el punto de rompiente, III. Zona después del punto de rompiente, IV. Zona swash

Zona I. La zona fuera de la costa donde el oleaje de aguas profundas, que aun no rompe, cambia su forma debido al forzamiento con el fondo generando una razón de transporte se describe como

$$q = q_b e^{-\lambda_1(x-x_b)} \quad x_b < x \quad (2)$$

donde  $x$  es la coordenada perpendicular a la costa cuyo origen es el punto de rompiente,  $q_b$  es la razón de transporte en el punto de rompiente y  $\lambda$ , es el coeficiente de decaimiento espacial, para la zona I, dado por

$$\lambda_1 = 0,4 \left( \frac{D}{H_b} \right)^{0,47} \quad (3)$$

Donde  $D$  es el tamaño del sedimento.

Zona II. La razón del transporte en la zona II, zona de rompiente, esta descrito por una relación similar a la zona I pero con un coeficiente de decaimiento más pequeño  $\lambda_2 = 0,21\lambda_1$ . La zona II comprende desde el punto de rompiente, hasta el punto de desparrame, y esta descrita por

$$q = q_p e^{-\lambda_2(x-x_p)} \quad x_p < x < x_b \quad (4)$$

ésta ecuación gobierna la zona de transición 2, desde el punto donde el punto de rompiente hasta el punto de desparrame.

Zona III. Del punto de desparrame hasta el punto de reformación de oleaje, si existe reformación, la zona de swash, ecuación 5 presenta las ecuaciones que gobiernan la transformación del oleaje desde el punto de desparrame hasta el punto de reformación de oleaje o zona de swash (zona de rompiente o zona de surf)

$$q = \left\{ K \left\{ D - D_{eq} + \left( \frac{\epsilon}{K} \right) \left( \frac{d_h}{d_x} \right) \right\} \right\} \quad D > \left[ D_{eq} - \left( \frac{\epsilon}{K} \right) \left( \frac{d_h}{d_x} \right) \right]$$

$$q = 0 \quad D < \left[ D_{eq} - \left( \frac{\epsilon}{K} \right) \left( \frac{d_h}{d_x} \right) \right] \quad (5)$$

para  $x_z < x < x_p$

Zona IV. Del límite de la costa de la zona de surf al límite del runup, ecuación 6, que es la ecuación de transporte en la zona IV

$$q = q_z \left\{ \left[ \frac{x - x_r}{x_z - x_r} \right] \right\} \quad x_r < x < x_z \quad (6)$$

donde:

- $q_x$  = La razón de transporte neto perpendicular a la costa,  $m^3/m - sec$
- $\lambda_{1,2}$  = coeficiente de decaimiento espacial en la zona I y II ,  $1/m$
- $x$  = coordenada perpendicular a la costa,  $m$
- $K$  = coeficiente de la razón del transporte de arena,  $m^4/N$
- $D$  = energía de disipación del oleaje por unidad de volumen de agua,  $N - m/m^3 - sec$
- $D_{eq}$  = energía del equilibrio de disipación del oleaje por unidad de volumen de agua,  $N - m/m^3 - sec$
- $\epsilon$  = coeficiente del transporte relacionado con la pendiente,  $m^2/sec$
- $h$  = profundidad media del agua,  $m$

Los valores de  $b$ ,  $p$ ,  $z$  y  $r$  son cantidades evaluadas en punto de rompiente, punto de desparrame, zona de surf, límite del run-up, respectivamente

El procedimiento del cálculo de distribución de sedimento a todo lo largo del perfil se lleva a cabo por medio de un esquema de solución de diferencias finitas usando las condiciones de corrientes incidentes de oleaje y nivel de agua, actualizando la forma del perfil de playa.

## 7.2. Secuencia de simulación

Los pasos a seguir al momento de simular la respuesta del perfil son:

- El modelo está diseñado para utilizar valores típicos para los coeficientes de transporte  $K, \epsilon, D, f, s$ , sin embargo, éstos se deben modificar para calibrar el modelo a las características específicas de la playa cuya variación del perfil se desee simular, junto con éstos valores el modelo necesita también particularizar valores tales como la temperatura del agua de mar, tamaño de grano y pendiente de la playa.
- Se debe tomar un perfil antes de la tormenta y otro perfil después de la tormenta para así calibrar el modelo con el perfil medido después de la tormenta.
- Se requieren los valores de altura significativa del oleaje y el periodo asociado así como el nivel de marea que afectará al perfil de playa durante la tormenta.

## 7.3. Perfiles de playa

Los perfiles de playa utilizados en este trabajo fueron obtenidos dentro de las actividades del proyecto de investigación *Erosión - Depositación de arena en la playa y fondo marino adyacente de playas de Rosarito 4026*, que se desarrolló dentro del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC.

Desde 1998, se ha creado una base de datos que incluye perfiles de playa mensuales en 20 localidades de las Playas de Rosarito, en este trabajo únicamente se utilizan los perfiles de playa medidos en el periodo de Noviembre 1998 hasta Junio 1999 de un banco de nivel frente a los condominios Oceánica; la Figura 3 muestra la localización geográfica de donde fueron obtenidos dichos perfiles.

Los perfiles de playa fueron obtenidos utilizando nivelación diferencial. Se utilizó un nivel, dos estadales y una cadena siguiendo el método propuesto por Montes de Oca, 1985. Estos perfiles de playa tienen una distancia promedio de 150 metros de longitud, sin embargo, para realizar una mejor simulación de la distribución de sedimento a todo lo largo del perfil, se realizaron perfiles batimétricos atrás de la zona de rompiente. Este sondeo batimétrico se realizó con marea alta el mismo día en que fueron tomados los perfiles de playa, estos perfiles batimétricos tienen la misma dirección que los perfiles de playa así se pueden juntar los datos de los dos perfiles y se obtiene un solo perfil

de 1000 mts en promedio.

Los perfiles batimétricos fueron obtenidos cada mes desde. Noviembre 1998 hasta Abril 1999 y un perfil más en Junio 1999. Las batimetrías se realizaron con la marea más alta del mes para cubrir la mayor área posible en la línea de costa, los datos se corrigieron posteriormente con el NB-MI, y después por medio del surfer ver 7.0 se obtuvieron transectos desde la cota 5m hasta la profundidad -18m con una distancia de 1200m en promedio.

#### 7.4. Datos de oleaje

Los datos de oleaje fueron obtenidos de una boya meteorológica identificada como Harvest platform-0171 con coordenadas  $34^{\circ} 27.5$  norte,  $120^{\circ} 46.8$  oeste; aproximadamente a 9 millas al oeste de Point Arguello, CA; La boya pertenece al *Coastal data information program*, <http://cdip.ucsd.edu>, los datos de oleaje que se obtienen de esta base no han sido deformados por la fricción con el fondo en aguas someras modificando las características de altura y periodo del oleaje de aguas profundas.

Es importante obtener datos de oleaje de mar profundo ya que la base del modelo y el inicio del proceso de transporte de sedimento se da a partir de las características de la pendiente ola (Hs) en aguas profundas.

#### 7.5. Datos de marea

Los datos de marea de cada mes se referenciaron al NMM utilizando predicciones para Rosarito B.C. los niveles del mar se obtuvieron de la red mareográfica del CICESE, <http://oceanografia.cicese.mx/predmar>.

Estos datos de nivel del mar se utilizan como variable de entrada en el modelo, la función de estos niveles es poner los límites del nivel de marea máximo y mínimo dentro del modelo.

Una vez obtenidos los datos meteorológicos se realizarán gráficas en Matlab ver 5.2 para observar series de tiempo de las variables meteorológicas y los datos de marea con el fin de conocer mejor la distribución de los fenómenos de tormenta. Una vez obtenida la información de las variables que necesita el modelo se procede a calibrarlo.

## 7.6. Calibración

Calibrar es el proceso de manipular los coeficientes específicos del modelo, con el fin que estos coeficientes simúlen la mejor respuesta del modelo a la influencia de las variables sobre los procesos erosivos o depositacionales generados por las tormentas. El modelo numérico SBEACH es una copia obtenida del Internet por esto, para asegurar que el modelo esté trabajando de manera correcta se digitalizaron las gráficas de dos perfiles que se encuentran en el manual, *SBEACH: Cross-shore transport under random waves and model validation with supertank and field data. Report No. 4*; Los resultados que se obtengan usando el modelo con los datos digitalizados, se pueden comparar con las gráficas del manual de una manera más objetiva y comprobar que el modelo trabaja correctamente. Una vez comprobado que el modelo trabaja de manera correcta, se realizarón las simulaciones para los perfiles de Rosarito, comparando dos perfiles medidos uno antes y otro después del efecto de la tormenta, de ésta manera se calibrarán los coeficientes de transporte para las características específicas de estos perfiles.

## 7.7. Verificación

Una vez calibrado el modelo, se simuló la respuesta del perfil ante tormentas escogidas por su duración e intensidad, y por último se realizarón corridas usando Periodos de oleaje constantes y alturas de oleaje variable, Periodo de oleaje variable y altura de constantes y altura de oleaje y periodos variables.

La verificación del modelo se realizó con los mismos datos del perfil pero con un intervalo distinto al de calibración. Para su verificación se utilizarón los mismos coeficientes de transporte que para la calibración. La verificación del modelo se realizó comparando el perfil calculado por el modelo bajo las condiciones de tormentas seleccionadas para la calibración, si la erosión calculada por el modelo SBEACH es semejante entre los eventos de tormenta, el SBEACH está verificado y calibrado.

## 8. Resultados

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones de la respuesta del perfil de playa al oleaje de tormenta. En estos resultados se presenta la influencia que tienen diferentes condiciones de altura y periodo de oleaje, así como, el nivel de la marea sobre el perfil de playa.

Para asegurarse que el modelo trabaja correctamente se utilizó uno de los ejemplos que forma parte del reporte técnico #4 de SBEACH. Este ejemplo consiste en la simulación de un perfil de playa para diferentes valores conocidos de oleaje.

Para reproducir la simulación se muestra en el manual se digitalizó la altura del oleaje, el periodo y el nivel de marea de las gráficas que conforman el ejemplo, estos valores se muestran en la figura 5, y se utilizaron como datos de entrada para el modelo, así mismo se utilizaron los parámetros de transporte de sedimento predeterminados por el modelo.

Los perfiles de playa inicial y final utilizados para verificar el modelo fueron obtenidos en una playa ubicada en Ocean City E.U. el 26 de Junio de 1991 (perfil inicial) y el 2 de Noviembre del mismo año (perfil final) unas horas después de haber ocurrido una tormenta. Los resultados de la comparación de la simulación del modelo mostrada en el manual y nuestra simulación se muestra en la figura 6

Como se observa en la figura 5 ésta tormenta duró aproximadamente 4 días mostrando un pico de oleaje máximo de tres metros y elevación máxima de marea de 1.7 metros.

Al usar el modelo con los datos de oleaje de entrada se observa como el perfil calculado por el modelo, figura 6, es aceptable comparado con el perfil resultante que se digitalizó del manual. Con esto se comprueba que el código del SBEACH obtenido de la red trabaja correctamente, por lo que se continuó con la calibración para la Playa de Rosarito.

### 8.1. Calibración

Antes de iniciar con las simulaciones de los casos reales se debe calibrar el modelo numérico para las características particulares de la playa cuyo perfil se quiere simular. Para calibrar el modelo se utilizaron dos perfiles de playa, los cuales serán referidos como perfil inicial y perfil final (figura 8), así como

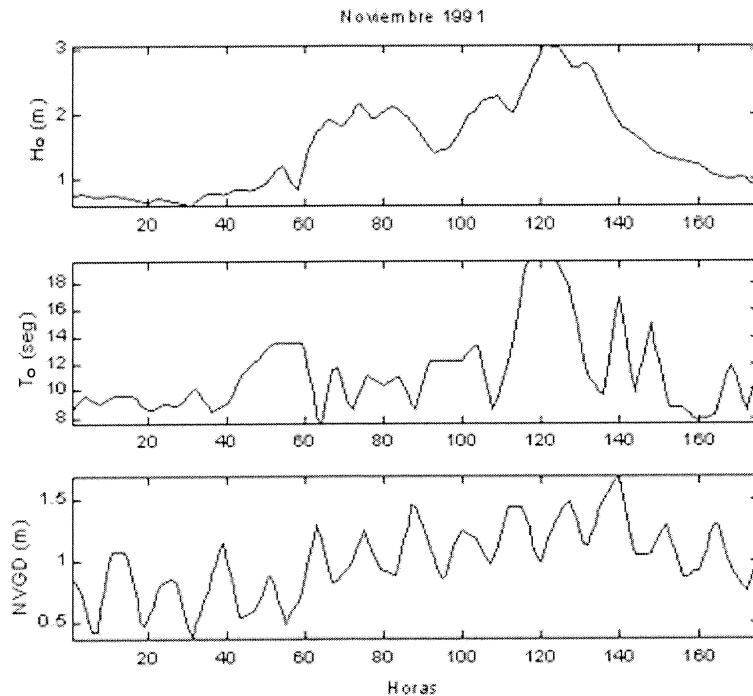


Figura 5: Esta figura presenta las series de oleaje que se introdujeron al modelo para verificar que el modelo trabajaba correctamente. Las series de tiempo son de altura de oleaje ( $H_s$ ), periodo de oleaje ( $T_p$ ), nivel de marea del 2 Noviembre 1991 referido al National Geodetical Vertical Datum (NGVD).

las series de tiempo de altura de oleaje, el periodo de oleaje y marea, (figura 7) que modificaron el perfil inicial para dar como resultado el perfil final.

El perfil inicial corresponde al mes de Noviembre de 1998 y el perfil final al mes de Diciembre de 1998. Entre Noviembre 1998 y Diciembre 1998 se presentaron tormentas con periodos entre 10 y 15 segundos asociados a altura de oleaje de 5.7m, 4.1m y 4.7m

La calibración se inició usando el valor pre-determinado del coeficiente de transporte del modelo,  $K = 1.75 \times 10^{-7}$ . Se observó que con este valor  $K$  se presenta mayor transporte en la cara y berma de la playa, lo cual no se observa en el perfil final. Debido a que valores menores de  $K$  representan un menor transporte de sedimento a lo largo de la cara de la playa se varió  $K$  a valores más pequeños hasta lograr un transporte sobre la cara de la playa y una berma más parecida al perfil final, de Diciembre 1998. De todos los valores utilizados el que permitió una mejor simulación fué el de  $5.01 \times 10^{-7}$ .

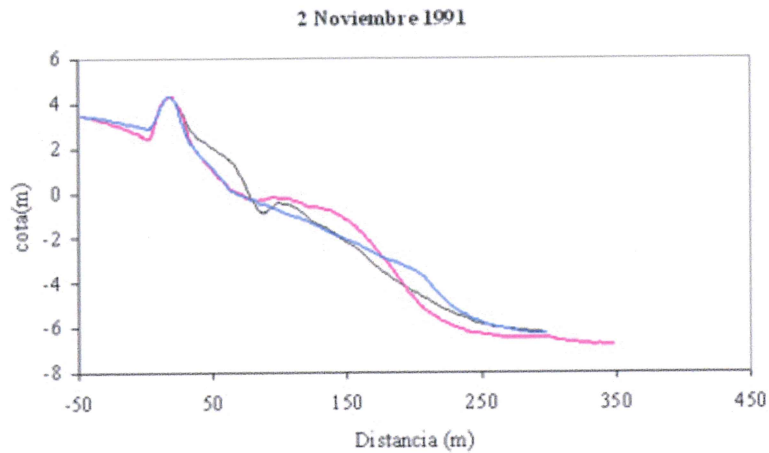


Figura 6: Resultado de la simulación del modelo SBEACH utilizando el perfil inicial correspondiente a el 26 de Junio de 1991 (Negro), y el perfil final del 2 de Noviembre 1991 después de una tormenta (Magenta). El perfil calculado por el modelo se muestra en la línea azul. Este ejemplo se utilizó para demostrar que el modelo utilizado trabaja aceptablemente.

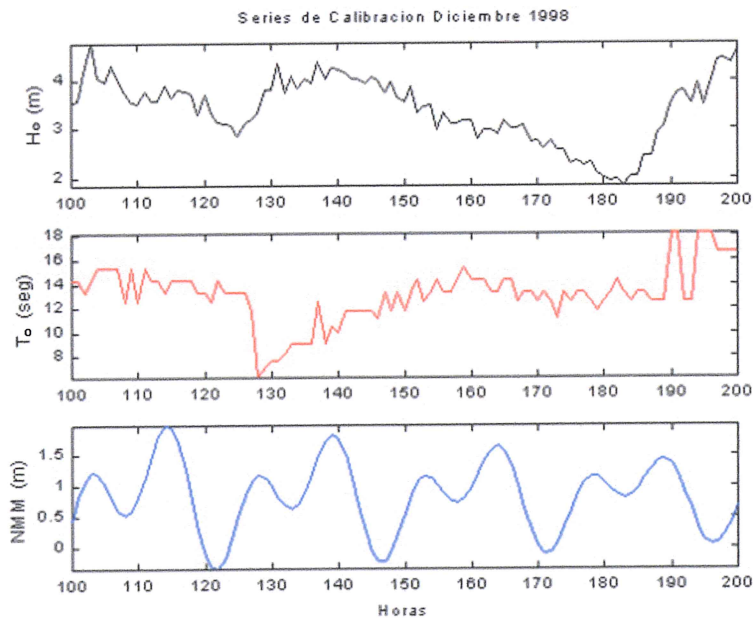


Figura 7: Series de tiempo utilizados para calibración del modelo en la playa de Rosarito B.C. La altura de oleaje ( $H_s$ ) cuadro superior, periodo de oleaje ( $T_p$ ) recuadro central y nivel de marea referida al NMM cuadro inferior. Diciembre 1998

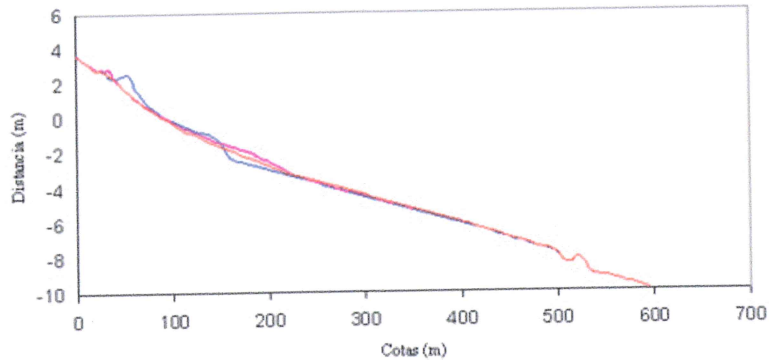


Figura 8: Resultado de la calibración del modelo se presenta el perfil inicial, azul. Rojo Perfil Medido, Magenta Perfil simulado. A partir de este gráfico podemos decir que el modelo esta calibrado para la playa de Rosarito B.C.

Una vez establecido el valor de  $K$  se ajusta el coeficiente de transporte,  $\epsilon$ , el cual se cambió de  $0.002 \text{ m}^2/\text{seg}$  a  $0.005 \text{ m}^2/\text{seg}$  para lograr un perfil más plano.

En las simulaciones es importante definir la longitud de la malla que se utilizará para representar al perfil, la cual se obtiene como el producto entre la longitud espacial  $\delta x$  de cada celda y la longitud del perfil a simular. El tiempo de simulación es el resultado del producto de la unidad del tiempo entre iteración e iteración, en minutos, y el número de iteraciones que se quieren simular. Un tamaño de malla y tiempo de simulación erróneos producen inestabilidad numérica al modelo. Finalmente, se fijó un tiempo de simulación de 5 minutos y una longitud de celda de  $\delta x = 5m$ . El cuadro 1 presenta los valores finales para cada uno de los coeficientes utilizados.

Cuadro 1: Valores numéricos de los diferentes coeficientes utilizados para simular

Variable	Valor
$K$	$5.01 \times 10^{-7}$
$\epsilon$	0.005
EPS	0.398
$\delta x$	5 metros
Tamaño de grano	0.27mm
T	$12^\circ C$

Una vez que el modelo se ha calibrado, se entiende que los valores de transporte son los necesarios para las características de una playa en particular. Por lo que se procedió a realizar las simulaciones. De acuerdo con uno de los objetivos de este trabajo se plantea investigar, o simular, los siguientes casos de oleaje incidente:

- i. Altura constante y periodo variable.
- ii. Altura variable y periodo constante.
- iii. Altura y periodo variables.

Para realizar las simulaciones se seleccionaron los perfiles de playa correspondientes a los meses de Diciembre 1998, Enero, Febrero y Agosto de 1999. Estos perfiles se seleccionaron por presentar diferentes características morfológicas entre ellos, permitiendo de alguna manera investigar también la importancia de la forma del perfil inicial y el efecto que tendrá el oleaje incidente sobre el perfil. El cuadro 2 resume algunos parámetros asociados a los perfiles seleccionados.

Cuadro 2: Variaciones de la Altura del Oleaje y el Periodo

Mes	Oleaje Var. Periodo Cte.	Oleaje Cte. Periodo Var.	OleajeVar. Periodo Var.
Diciembre	Evento Duración 1 79 horas		Evento Duración 4 69horas
Enero	Evento Duración 3 86 horas	Evento Duración 4 82horas	Evento Duración 1 90horas
Febrero	Evento Duración 3 100 horas		Evento Duración 2 39 horas
Agosto	Evento Duración 1 61horas		

A continuación se describen los resultados de las simulaciones, las cuales se distinguen considerando el mes al que corresponde el perfil inicial utilizado

en la simulación. Para la simulación se presenta en forma gráfica la información correspondiente al oleaje de ese mes en particular, los eventos de oleaje considerados para simular la respuesta del perfil de playa y una comparación gráfica entre el perfil inicial y el perfil final para cada uno de los eventos de oleaje considerados.

## 8.2. Simulaciones

### 8.2.1. Diciembre 1998

De este mes se escogieron dos eventos que se asemejan a los ejercicios planteados en los objetivos. La variación de los eventos de acuerdo a las condiciones de oleaje y periodo se muestran en el cuadro 2.

En la figura 9 se presenta la climatología de Diciembre de 1998. El cuadro superior presenta la variación de la altura en aguas profundas ( $H_o$ ) en metros, el cuadro central muestra la variación del periodo ( $T$ ) en segundos y por último la variación de la marea en metros, referida al Nivel Medio del Mar (NMM). En todos los casos el eje del tiempo está dado en horas a partir de la primera hora del mes. Durante este mes se presentó oleaje con alturas mayores a 1.8 metros y menores a 5.7 metros. Los periodos de oleaje variaron entre los 6 y los 22 segundos. La variación de la marea fué mixta (marea diurna y semidiurna) dominando principalmente la semidiurna.

En todas las figuras de oleaje y marea, el eje horizontal representa la duración, en horas, de cada evento escogido específicamente para el caso a evaluar. El número de horas que se presenta en el paréntesis, en figuras como la 10, representa el periodo de horas correspondiente a la gráfica mensual.

De la climatología del oleaje que se presentó en el mes de Diciembre se escogieron dos eventos (cuadro 2), el primer evento duró 79 horas, en el que se presentó oleaje variando y período constante. El segundo evento duró 69 horas y se presentó oleaje variante y periodo variante.

La figura 10 muestra la variación del oleaje que se presentó en el evento 1, el cual tuvo una duración de 79 horas. Se presentó un máximo de oleaje de 4.8 metros y el mínimo de 3.1 metros. En este mismo evento se registró oleaje por debajo de los cuatro metros, mostrando variación en la altura del oleaje, por lo que lo definimos como oleaje variante.

En la figura 9, se presentan dos picos de oleaje de más de seis metros en un periodo de 24 horas. En el evento que se presenta en la figura 10, el periodo presenta un máximo de 16 segundos y mínimo de 10, a las 39 horas del evento. El periodo se mantiene en 14 segundos en promedio y se considera constante. La marea varió de un mínimo de -0.4 metros por debajo del NMM hasta 2 metros, presentándose una marea semidiurna. En algunas horas se presenta marea alta que coincide con datos de altura de oleaje alto, posiblemente durante estos eventos el perfil presentó recesiones sobre la berma o cara.

La figura 11 muestra el perfil inicial de Diciembre que se utilizó para hacer las simulaciones. El cual presentó una berma cuyo escarpe, a los 34 metros, estaba bien definido. La cara de la playa tenía una pendiente suave con una barra a los 200 metros, donde en este punto la pendiente del perfil disminuye hasta los 366 metros donde vuelve a presentar un cambio.

El resultado de la simulación del perfil inicial de Diciembre mostró una distribución del volumen de sedimento sobre el perfil, disminuyendo el volumen de la berma y eliminando la barra que se encuentra a los 200 metros (figura 11). La línea de color marrón, muestra la altura máxima de oleaje que se presentó durante el evento. (figura 10). En el lugar que el oleaje rompe se origina una elevación en la pendiente del nivel medio del agua conocido como "set up", en la figura 11 y en todas las subsecuentes figuras se representa con una línea roja. Durante la simulación se pudo observar como el sedimento es transportado a todo lo largo del perfil. El perfil resultante representado por la línea azul presenta una disminución en el volumen de la berma y no presenta barras. La figura 12 muestra los primeros 200 metros del perfil, durante la simulación esta es la parte más activa de transporte de sedimento.

La climatología del evento 4 se presenta en la figura 13. Este evento tuvo una duración de 69 horas. La altura máxima de oleaje fue de 3.1 metros y la mínima altura de oleaje de 2.1 metros. El periodo tuvo un máximo de 20 segundos y un mínimo de 12 segundos. En este evento el oleaje y el periodo variaron, el periodo varió comenzando con periodos mayores de 17 segundos las primeras horas y después disminuye hasta los 14 segundos. La marea varió de 0.30 metros a 1.5 metros sobre el NMM en este evento no coinciden marea alta con oleaje alto.

En la figura 14 se presentan el perfil inicial, en negro, el perfil final, en azul, así como la altura máxima de oleaje en marrón, que fue de 4.5 metros, el nivel del set-up máximo, en rojo, que se presentó durante el evento.

Se presentó transporte de sedimento a todo lo largo del perfil en dirección principalmente fuera de la costa, se observa que la cantidad del sedimento transportado fué menor que en otros eventos. No se presentó un transporte notable ni en la barra o en la berma. La figura 15 muestra los primeros 200 metros del perfil final en azul.

### Gráficas de Resultado de Diciembre 1998.

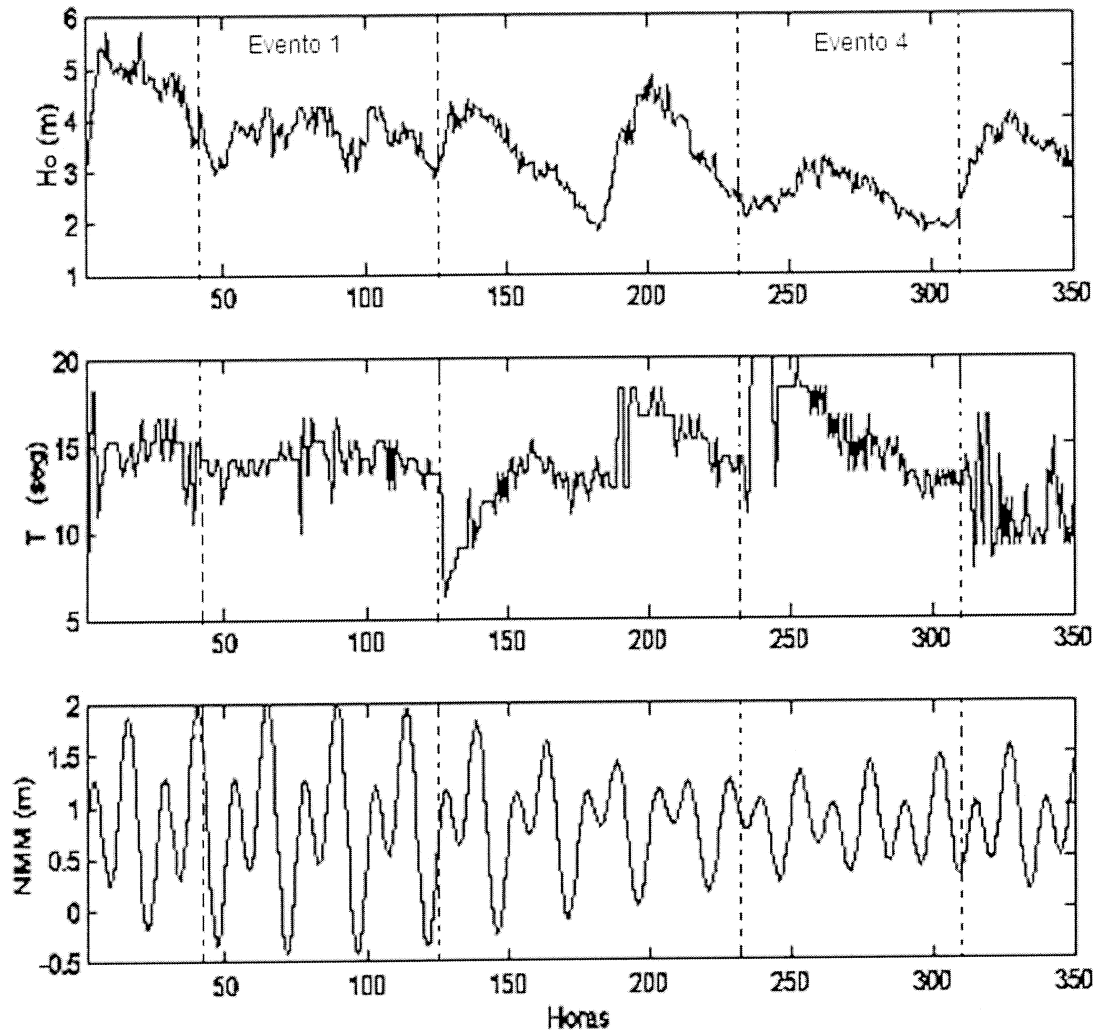


Figura 9: Climatología del oleaje durante el mes de Diciembre de 1998. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros.

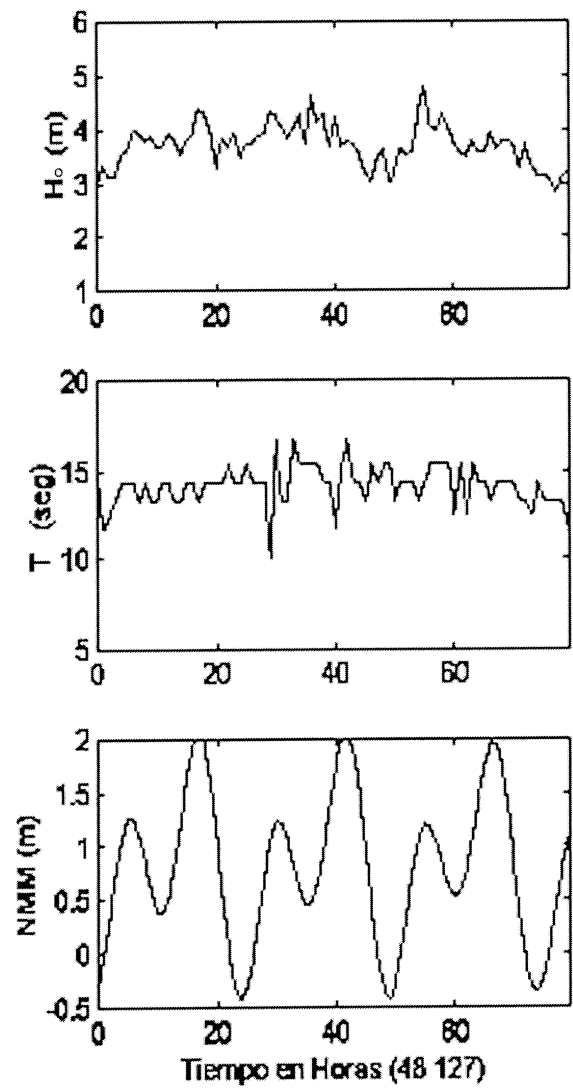


Figura 10: Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 1 de Diciembre 1998. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

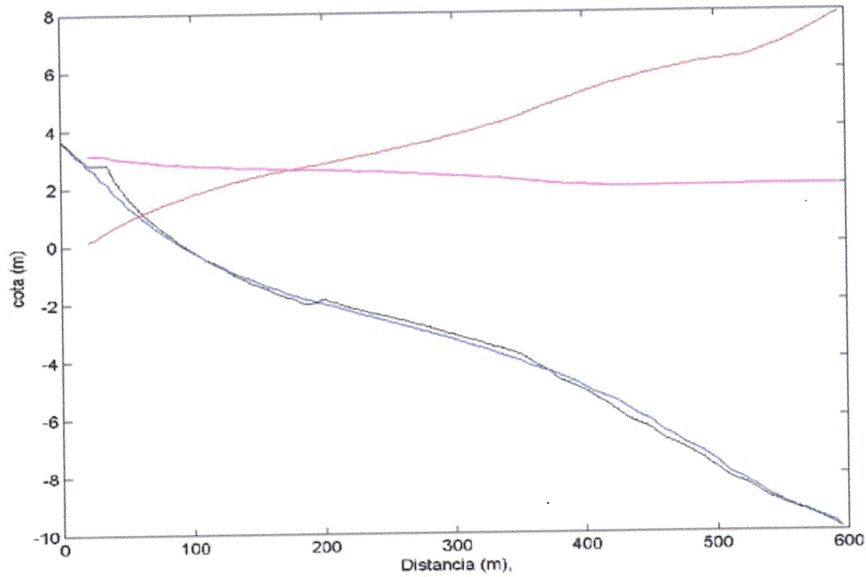


Figura 11: Perfil inicial del Evento 1 de Diciembre 1998, en negro. Se presenta el perfil resultante de la simulación de 79 horas, en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje.

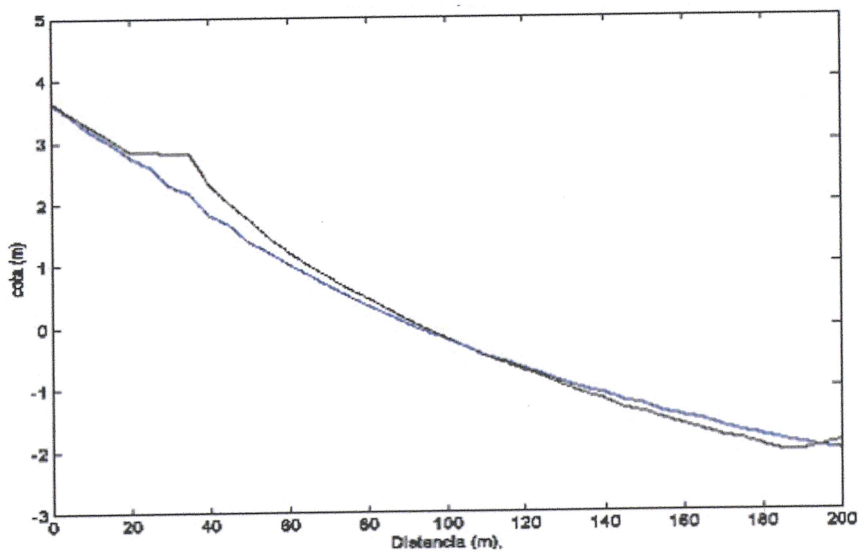


Figura 12: Primeros 200m resultado de la simulación del Evento 1 de Diciembre. En negro el perfil inicial medido, en azul el perfil resultante de la simulación.

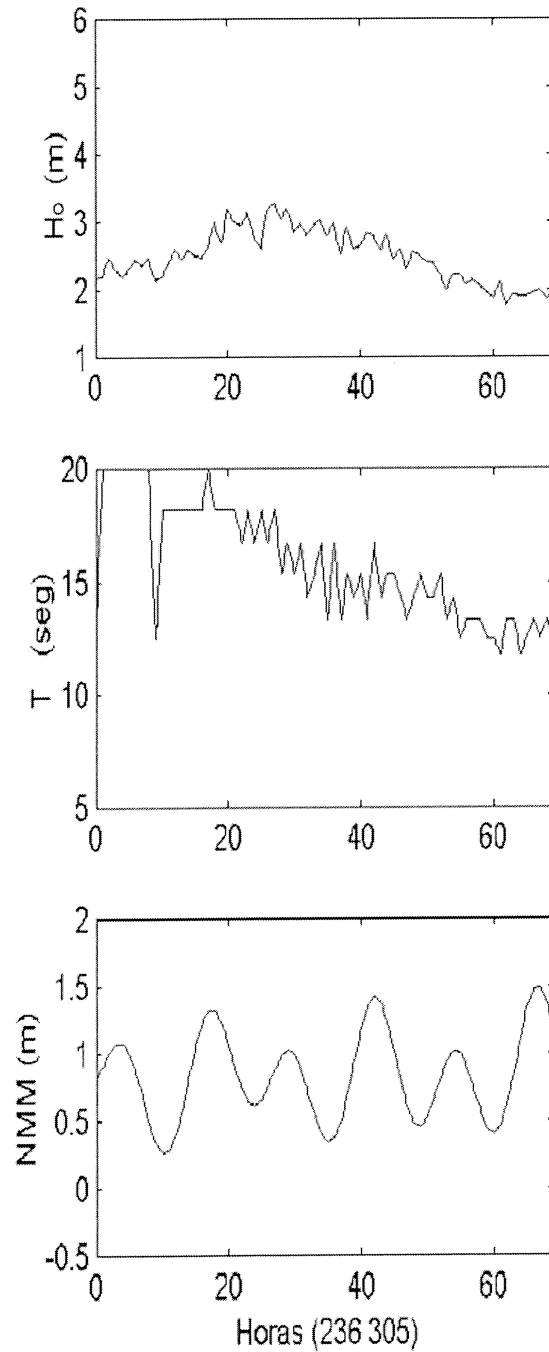


Figura 13: Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 4 del mes de Diciembre 1998. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

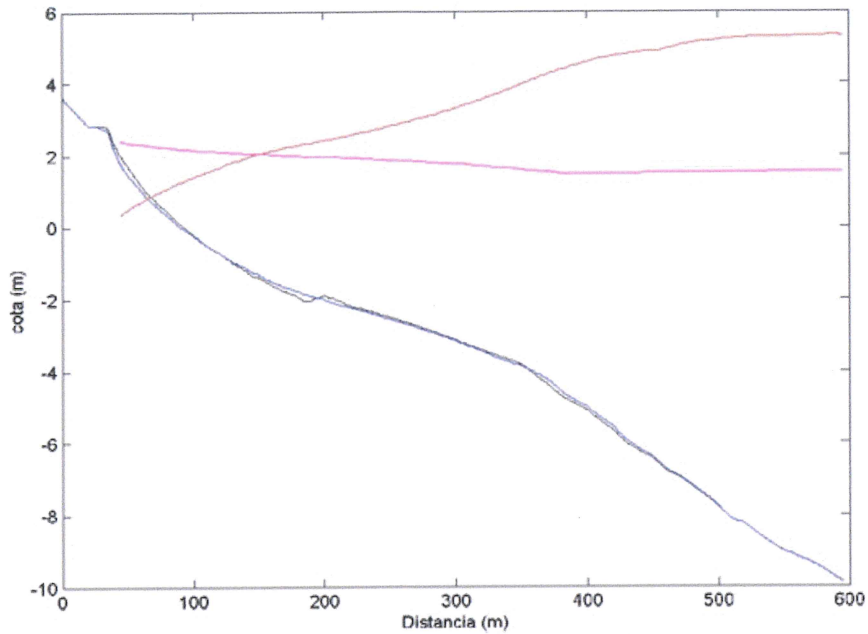


Figura 14: Perfil inicial correspondiente al evento 4 de Diciembre 1998, en negro. Se presenta el perfil resultante de la simulación de 69 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje

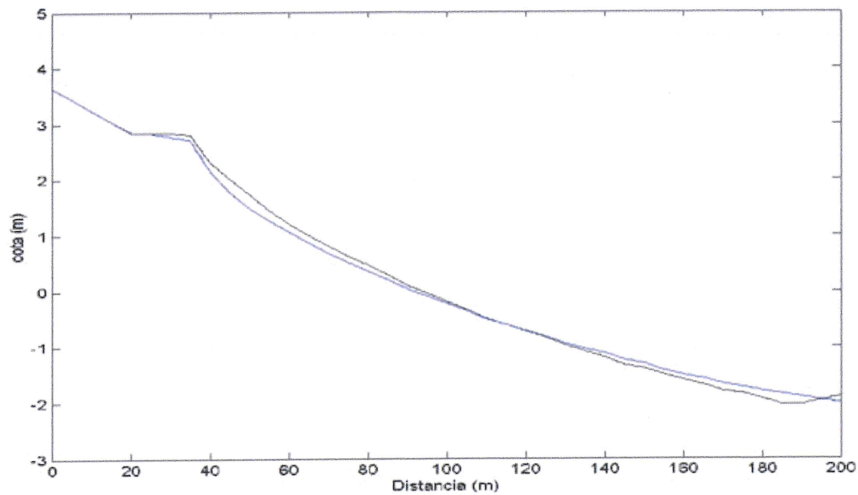


Figura 15: Primeros 200m del perfil de la playa simulando correspondiente al evento 4 de Diciembre 1998. En negro el perfil inicial medido, en azul el perfil resultante de la simulación

### 8.2.2. Enero 1999

En la figura 16 se presenta la climatología del oleaje y la variación del nivel del mar que se presentaron durante el mes de Enero de 1999. El cuadro superior de la gráfica presenta la variación de la altura significativa ( $H_s$ ) en metros, el recuadro central muestra la variación del periodo pico ( $T_p$ ) en segundos y por último la variación de la altura de la marea en metros referida al Nivel Medio del Mar (NMM). En todos los casos el eje temporal está dado en horas a partir de la primera hora del mes.

En Enero se registró oleaje con altura máxima de 6 metros y con altura mínima de 1 metro. El periodo varió entre un máximo de 24 segundos y mínimo de 5.4 segundos. Las variaciones de la marea resultaron mixtas (marea diurna semidiurna), dominando principalmente la semidiurna.

De la climatología del oleaje que se presentó en el mes de Enero se escogieron tres eventos, cuadro 2, el primer evento duró 90 horas, y presentó oleaje variando y período variando. El tercer evento duró 86 horas, y se presentó oleaje variante y período constante. El cuarto evento tuvo una duración de 82 horas presentando características de oleaje constante y período variante.

La figura 17 presenta el evento 1 que presentó oleaje con altura máxima de 2.5 metros y mínima de 1.2 metros al final de la serie, el periodo máximo de las olas fué de 18 segundos, disminuyendo hacia el final del evento con un mínimo de 11 segundos. La marea se presentó semidiurna con máximo de 2 metros sobre el NMM y mínimo de -0.5.

El evento 1 presenta oleaje con una altura pequeña, en comparación con otros eventos de este mes. Esta altura aumenta llegando al máximo en las primeras horas del evento y después comienza a disminuir. Cuando se compara la variación de la altura del oleaje y su periodo se observa un decremento en intensidad. La marea fué semidiurna presentando un mínimo de -0.40 y un máximo de 1.9 metros por debajo del NMM. Las dos primeras mareas más altas coinciden con la parte del evento donde se presenta oleaje más energético.

La figura 18 muestra en negro el perfil inicial de Enero que se utilizó para hacer las simulaciones, y en azul el perfil resultante. La altura máxima de oleaje en color marrón que se presentó fué de 2.5 metros y el nivel máximo del set up que se presentó en el evento, en rojo. El perfil presentó una berma con un escarpe desde el inicio del perfil hasta los 35 metros. La cara de la

playa presentó una inclinación suave con un canal a los 166 metros, desde este punto hasta los 345 metros la pendiente del perfil disminuyó, a una distancia de 345m la pendiente se volvió a incrementar.

Las características de oleaje que se presentan en este evento no tuvieron un efecto sobre la berma de la playa, sin embargo, en la cara de la playa es donde se generó un mayor transporte de sedimento en el perfil, el sedimento fué transportado fuera de la costa rellenando un canal a los 166 metros de la playa. Durante la simulación del evento se observó que existe una barra que se generó a los 129 metros, en el lugar donde rompe el oleaje, removiendo el sedimento y transportándolo fuera de la costa (figura 18 y figura 19)

El Evento 3, (figura 20), presentó un máximo de oleaje de 3 metros, un mínimo de 1.8 metros, el período fué constante, máximo de 18 segundos y mínimo de 13 segundos. El rango de mareas fué de -0.20 metros por debajo del NMM hasta 1.9 metros presentándose marea semidiurna. Las características del oleaje en este evento de acuerdo con tabla 2 son oleaje variante y periodo constante.

En la figura 21 se presenta en negro el perfil inicial, en azul el perfil final y la altura máxima de oleaje de 3.8 metros en color marrón y el nivel del set up máximo que se presentó durante el evento en color rojo.

El perfil inicial muestra una berma a los 35 metros del inicio del perfil, y una barra a los 180 metros. El oleaje en este evento tuvo una influencia en toda la cara de la playa transportando sedimento a todo lo largo del perfil. Al hacer las simulaciones se observó como el oleaje rompiente sobre la barra puso el sedimento en suspensión transportando el sedimento fuera de la costa, la arena de la berma que se encontraba en el perfil inicial fué transportada por el oleaje fuera de la costa acumulándose en la barra.

El Evento 4, (figura 23), tuvo una duración de 82 horas presentando oleaje casi constante con máximo de 3.5 metros y mínimo de 2.8 metros. Este es el único evento de todo el experimento que presentó un oleaje constante (cuadro 2) presentando una variación entre el máximo y el mínimo de 0.70 m. El período se presentó variante, el máximo fué de 18 segundos y el mínimo de 8 segundos. La marea fué semidiurna presentando un rango de marea de -0.3 metros mínimo y 1.6 metros máximo con referencia al NMM. Durante la simulación se presenta un transporte de sedimento sobre el perfil no muy intenso, que es de esperarse por las características de oleaje que se presenta.

En la figura 24 se presenta el perfil inicial en negro, el perfil final en color azul así como la altura máxima de oleaje 6.1 metros en color marrón y el nivel del set up máximo que se presentaron durante el evento 4 en color rojo. El sedimento que se encontraba en la barra del perfil a los 180 metros fué transportado fuera de la costa y la berma que se presentó en el perfil presentó poco transporte.

El oleaje transporta sedimento fuera de la costa, erosionando la cara de la playa, también se observó como el sedimento que existe en la barra del perfil fue transportado fuera de la costa; el transporte de arena es hasta los 600 metros presentando un mayor transporte de sedimento que el evento anterior en la cota de los -5 metros.

## Gráficas de Resultados de Enero 1999

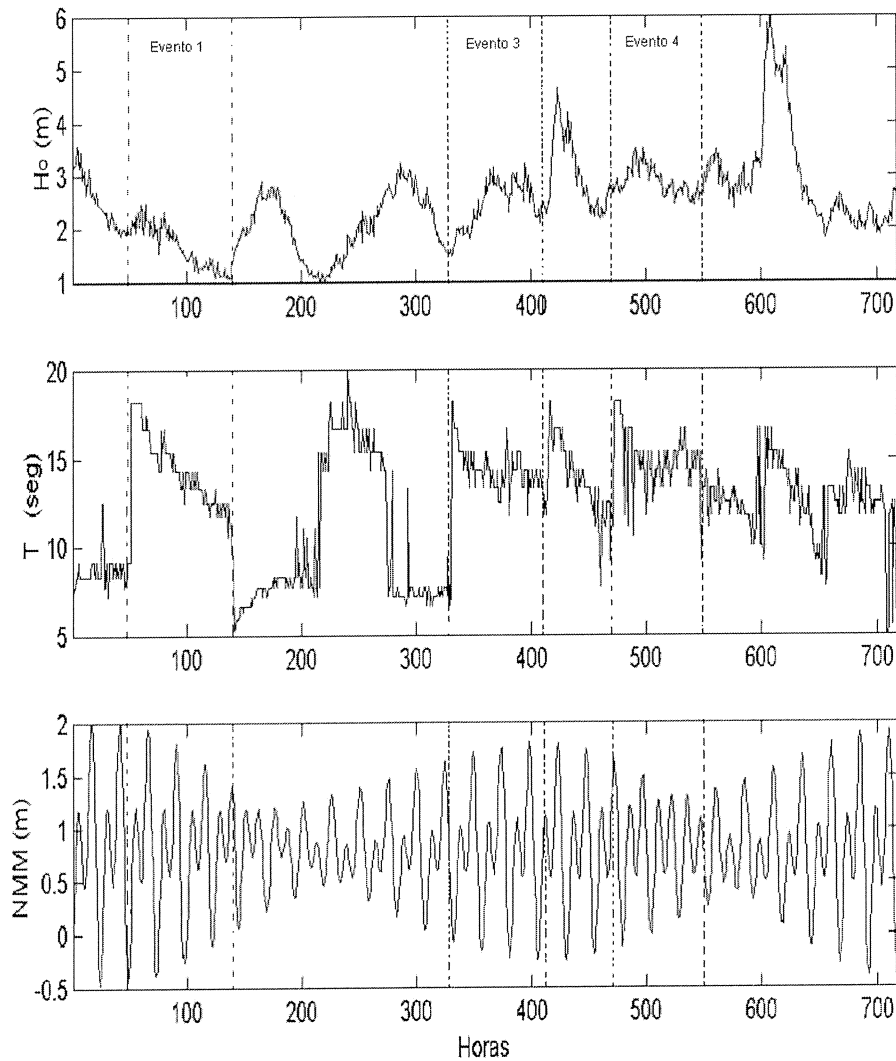


Figura 16: Climatología del oleaje durante el mes de Enero de 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros.

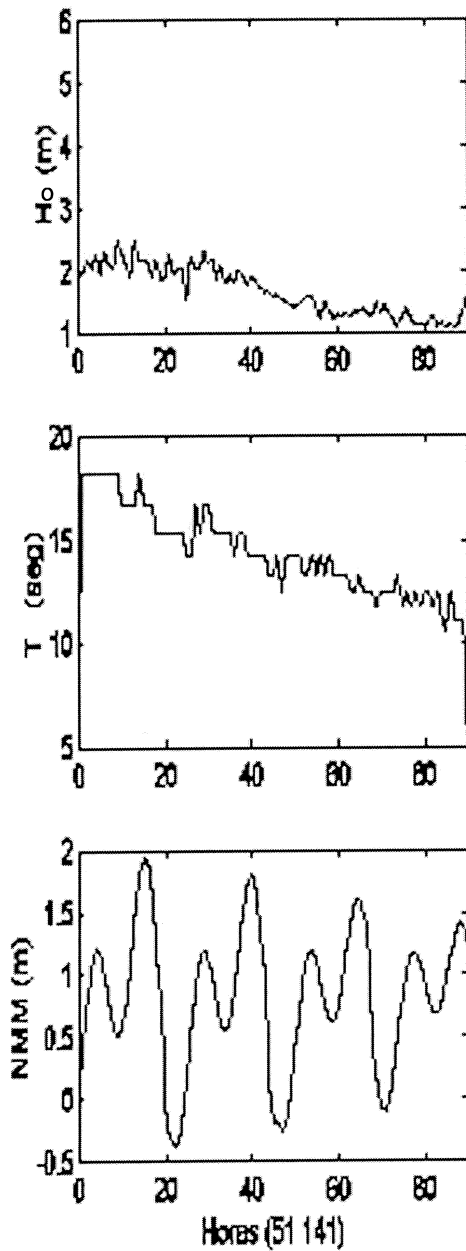


Figura 17: Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 1 del mes de Enero 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

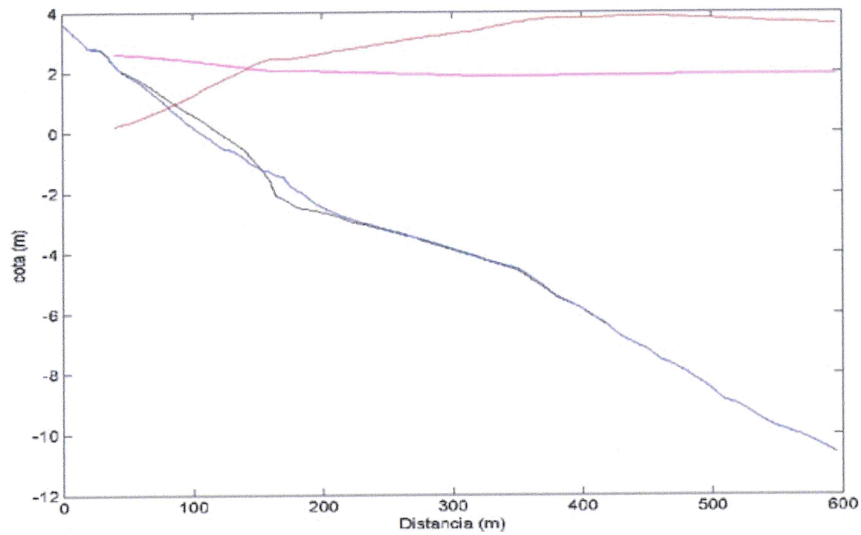


Figura 18: Perfil inicial correspondiente al evento 1 de Enero 1999, en negro. Se presenta el perfil resultante de la simulación de 90 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje

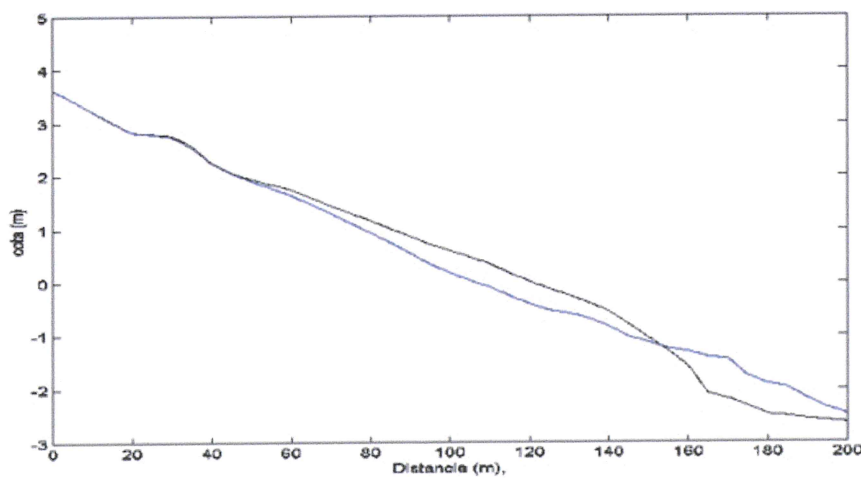


Figura 19: Primeros 200 m del perfil inicial en negro, en azul el perfil resultante de la simulación

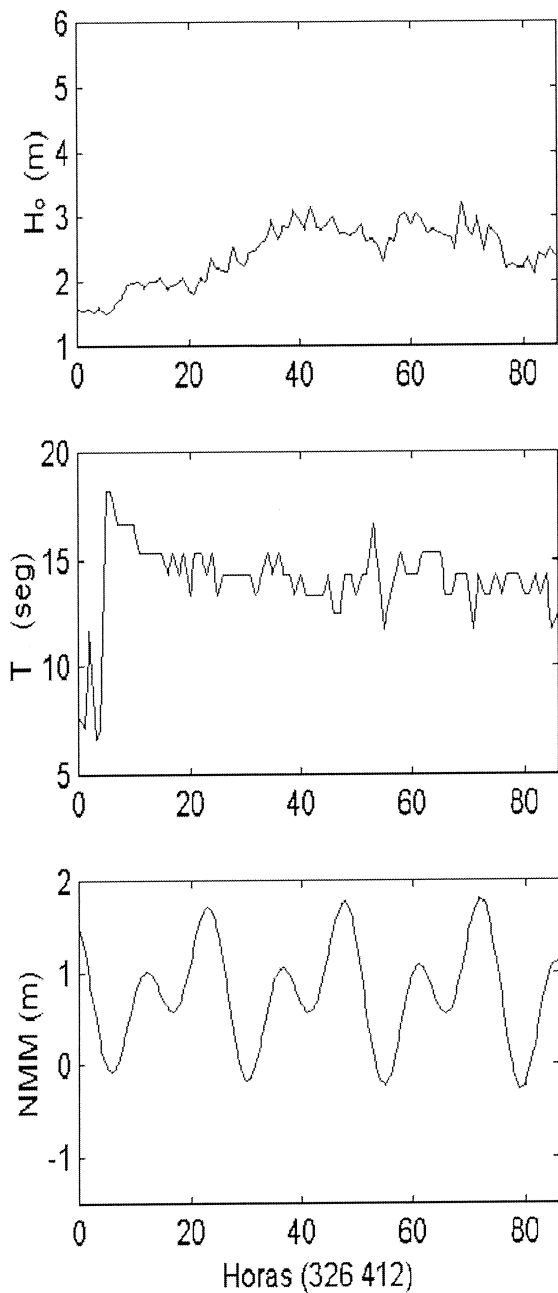


Figura 20: Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 3 del mes de Enero 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

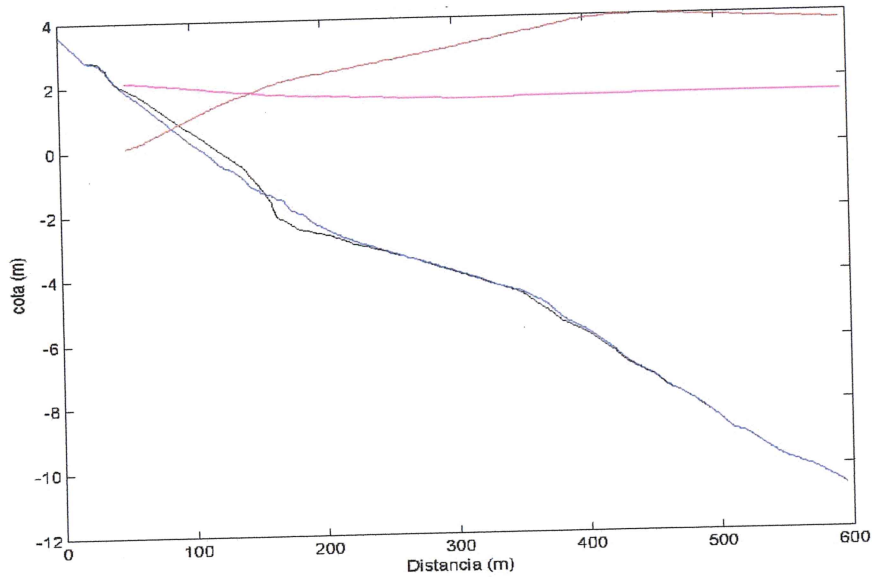


Figura 21: Perfil inicial del evento 3 de Enero 1999, en negro, se presenta el perfil resultante de la simulación después de 86 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje.

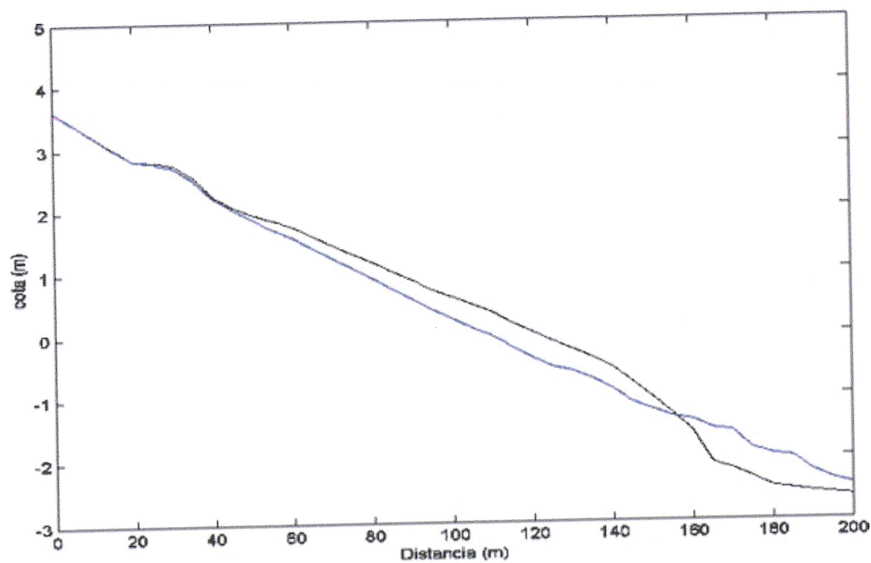


Figura 22: Primeros 200m del perfil inicial del evento 3 Enero 1999 ,en negro, en azul el perfil resultante de la simulación

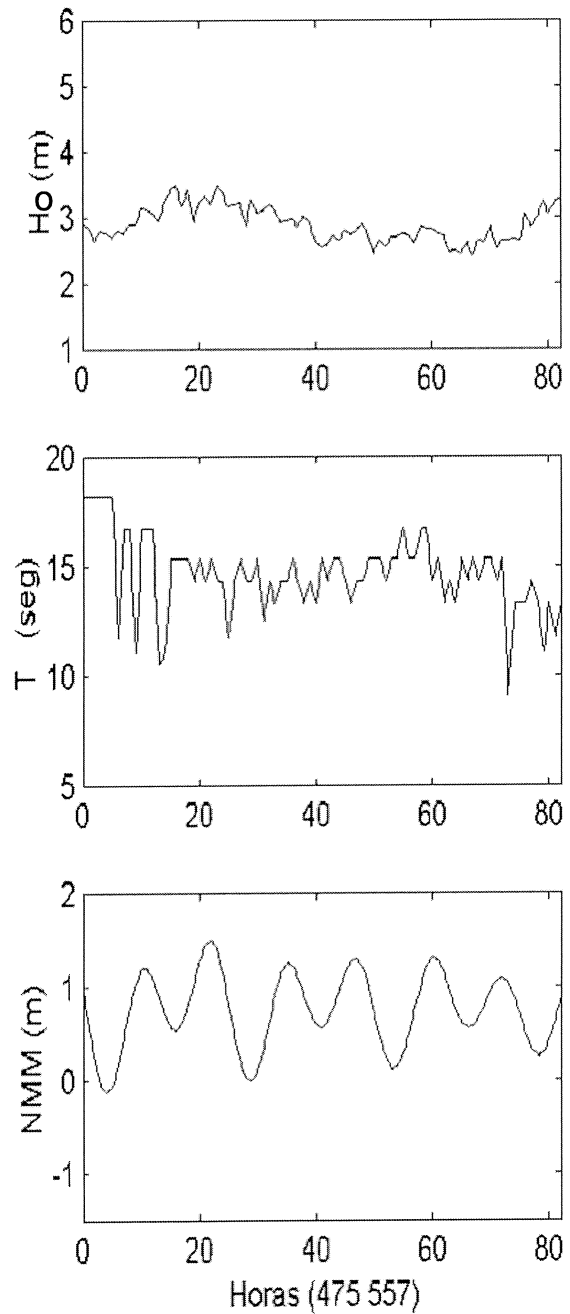


Figura 23: Climatología del oleaje y marea del evento 4 Enero 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

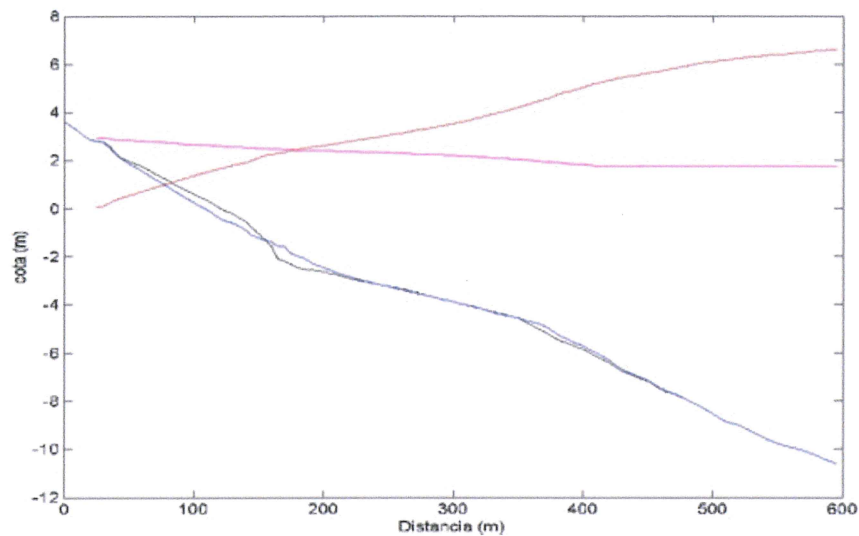


Figura 24: Perfil inicial del evento 4 de Enero 1999, en negro, se presenta el perfil resultante de la simulación de 82 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje

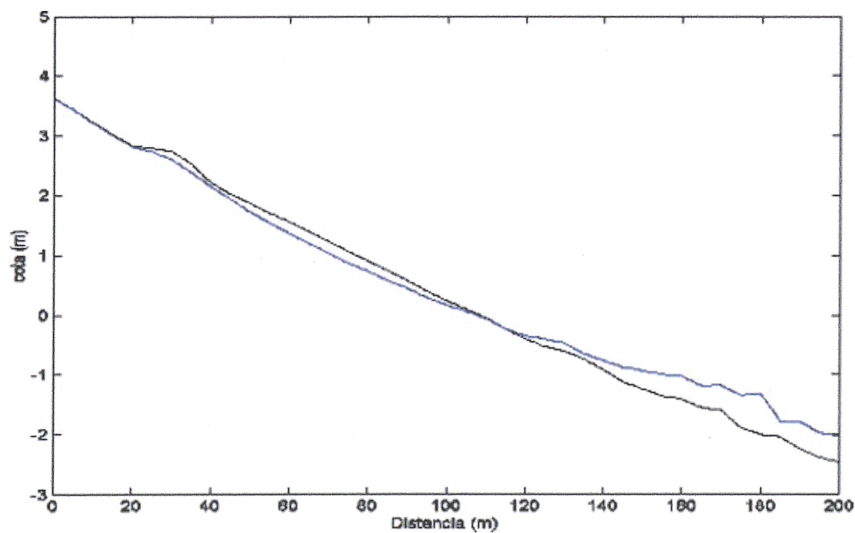


Figura 25: Primeros 200m del perfil inicial en negro, en azul el perfil resultante de la simulación

### 8.2.3. Febrero 1999

En la figura 26 se presenta la climatología del oleaje y la variación del nivel del mar que se presentó a lo largo del mes de Febrero de 1999. El cuadro superior muestra la gráfica de la variación de la altura significativa ( $H_s$ ) en metros, el recuadro central muestra la variación del periodo pico ( $T_p$ ) en segundos y por último la variación de la marea en metros referida al Nivel medio del mar (NMM). En todos los casos el eje temporal está dado en horas a partir de la primera hora del mes. En Febrero se observa un máximo de oleaje de 5 metros y un oleaje con altura mínima de 0.8 metros. El periodo mínimo fué de 7.3 segundos y el máximo de 19 segundos, las variaciones de la marea son mixtas (marea diurna semidiurna) dominando principalmente la semidiurna. Se escogieron dos eventos de acuerdo a los objetivos planteados, el primer evento duró 100 horas, el segundo evento duró 39 horas, (cuadro 2).

La figura 28 presenta el perfil inicial del mes de Febrero que se usó para las simulaciones. El perfil de la playa del mes de Febrero presentaba a los 29 metros una berma. La cara de la playa presentaba un pendiente suave con una barra a los 181 metros, desde los 214m hasta los 358m la pendiente del perfil se vuelve casi cero, desde los 358 metros hasta el final del perfil la pendiente cambió presentado mayor pendiente que la pendiente de la cara de la playa.

La figura 30 presenta el evento 1, con duración de 39 horas. Este evento presenta un máximo de 5.4 metros a las 20 horas de la serie y un mínimo de 2.8 metros al inicio; el periodo fué regular variando entre los 15 y 14 segundos. En este evento se observa como, la altura del oleaje comienza con un valor mínimo y va aumentando hasta 4.5 alrededor de la hora 18 y comenzar a descender. El periodo se mantiene sin variación entre los 14 y 15 segundos. La marea presentó un rango de variación de 0.6 metros a 1.3 metros sobre el NMM.

La figura 31 presenta los resultados de la simulación del perfil inicial, en negro, el perfil final, en azul, el máximo de oleaje durante este segundo evento 4.5 metros, en marrón y la línea roja representa el máximo nivel del set-up.

Existe transporte en la cara de la playa, principalmente sobre la berma que disminuyó su volumen y el perfil resultante fué suavizado, se erosionaron las barras que se encontraban en el perfil y el sedimento de la plataforma es transportando fuera de la zona de rompiente.

## Gráficas de Resultados de Febrero 1999

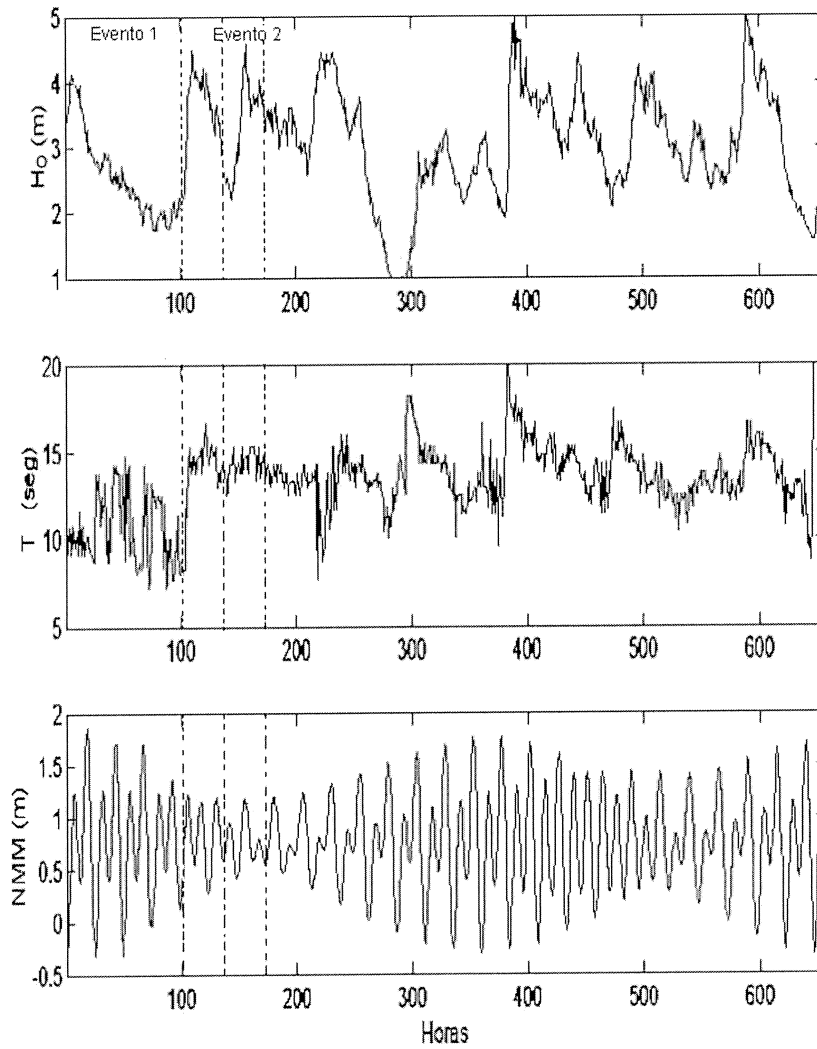


Figura 26: Climatología del oleaje del mes de Febrero de 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros.

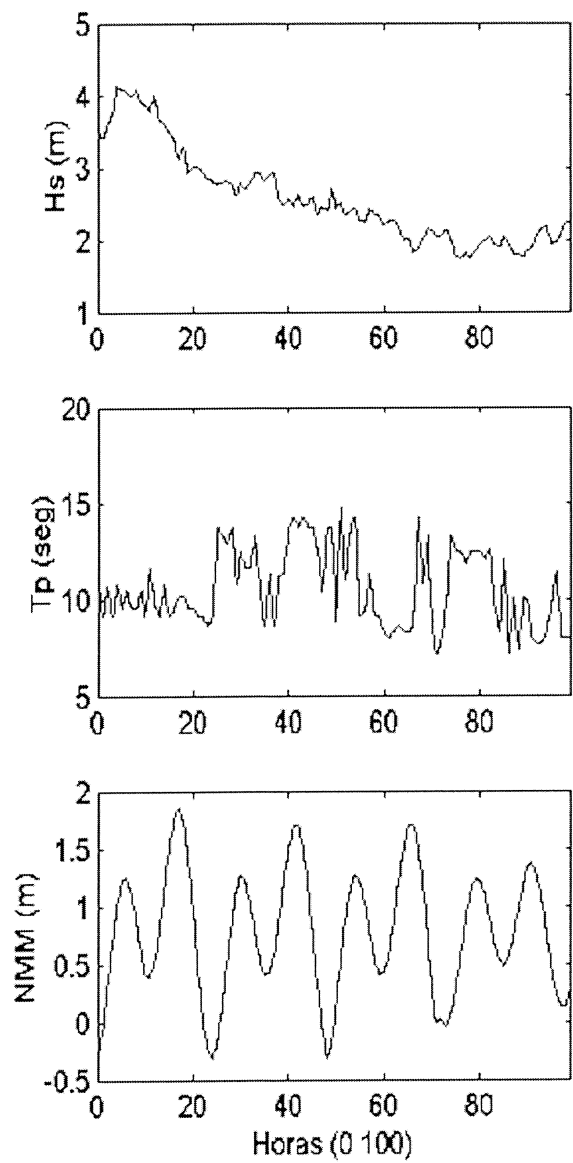


Figura 27: Climatología del oleaje y marea correspondiente al mes de Febrero 1999 evento 3. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

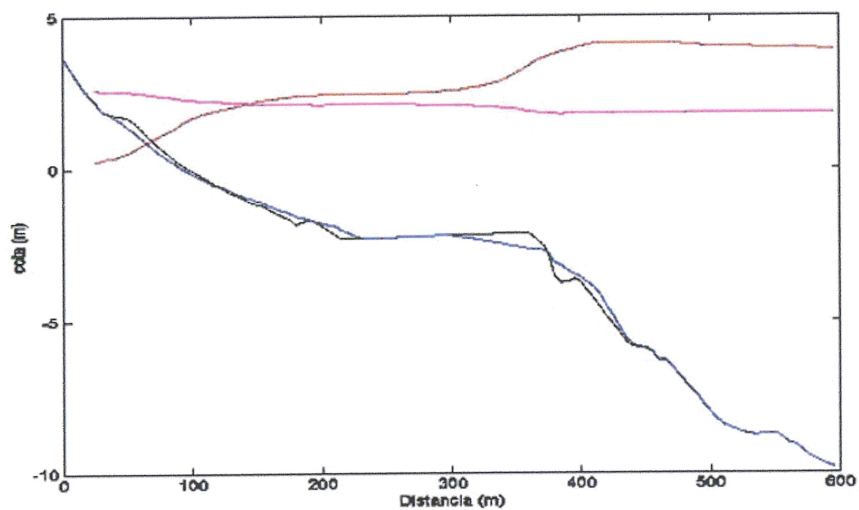


Figura 28: Perfil inicial correspondiente al evento 3 de Ferero 1999, en negro, el perfil resultante de la simulación de 100 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje

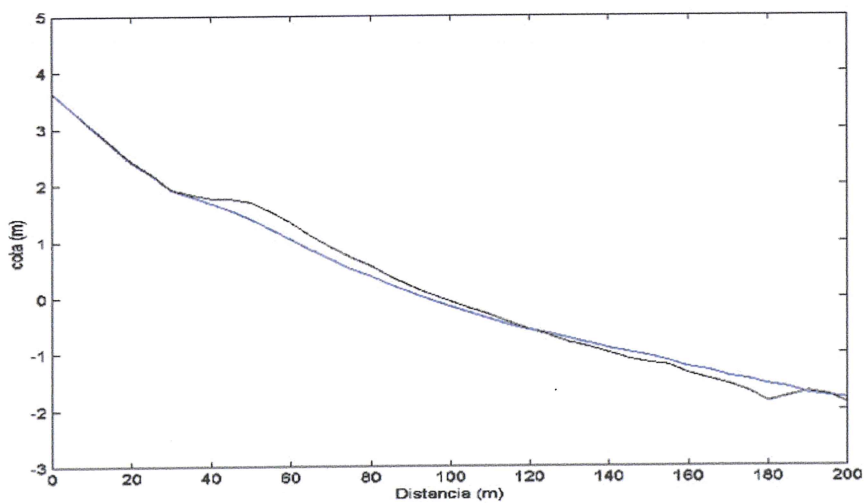


Figura 29: Primeros 200m del evento 3. Perfil inicial en negro, en azul el perfil resultante de la simulación

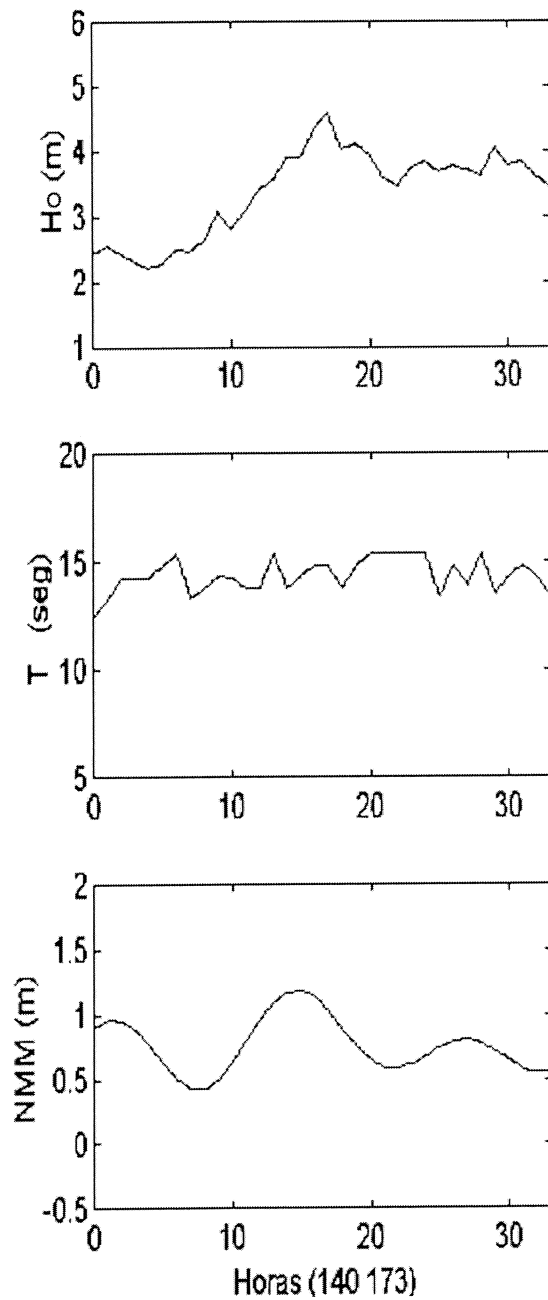


Figura 30: Climatología del oleaje y marea correspondiente al mes de Febrero 1999 evento 2. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

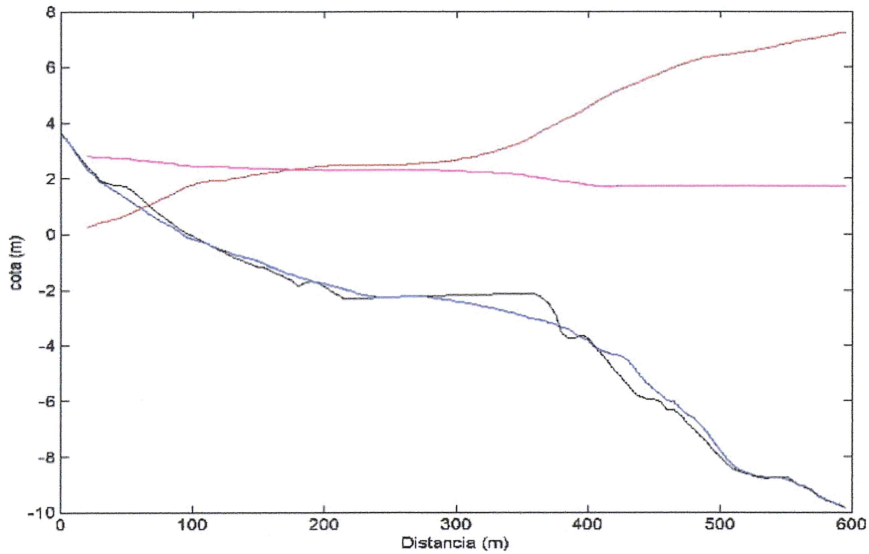


Figura 31: Perfil inicial correspondiente al evento 2 de Febrero 1999 en negro, el perfil resultante de la simulación de 39 horas en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje

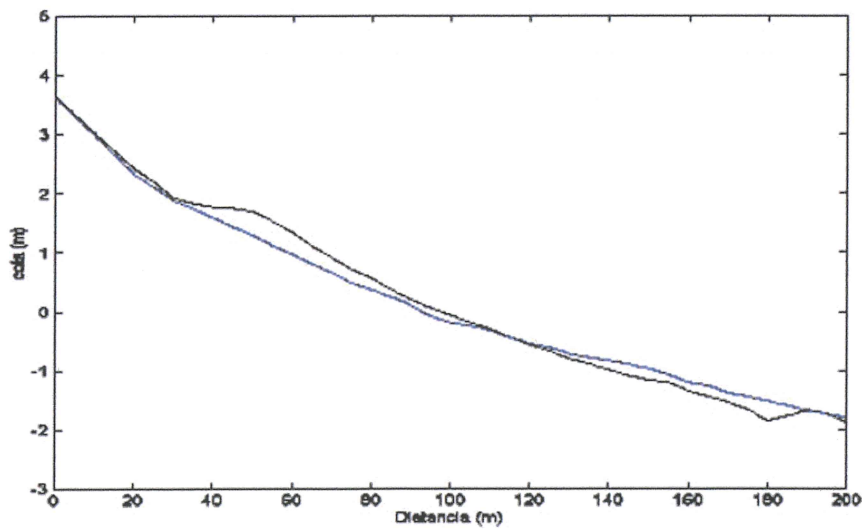


Figura 32: Evento 2 Febrero 1999. Primeros 200m del perfil inicial medido, en negro. En azul el perfil resultante de la simulación

#### 8.2.4. Agosto 1999

La simulación del evento en el mes de Agosto se realizó para comprobar si el modelo funcionaba con características de oleaje constructivo. Se escogió un evento que presenta alturas menores a los 2 metros y periodos cortos por debajo de los 5 segundos (figura 34). La variación de la altura del oleaje es de 0.95 m presentandose a las 45 horas con 1.20 metros y el máximo 2.15 a la hora 90. Por otro lado el período varía entre los rangos de 6 y 8 segundos el máximo. Las variaciones en el rango de marea que para este caso es semidiurna va de -0.5 hasta 2 metros.

El resultado del perfil de playa de Agosto después de hacer la simulación fué la generación de una barra arenosa en la parte de la cara de la playa con una pendiente del perfil suave y con una barra a los 400 metros figura 35.

## Gráficas de Resultados de Agosto 1999

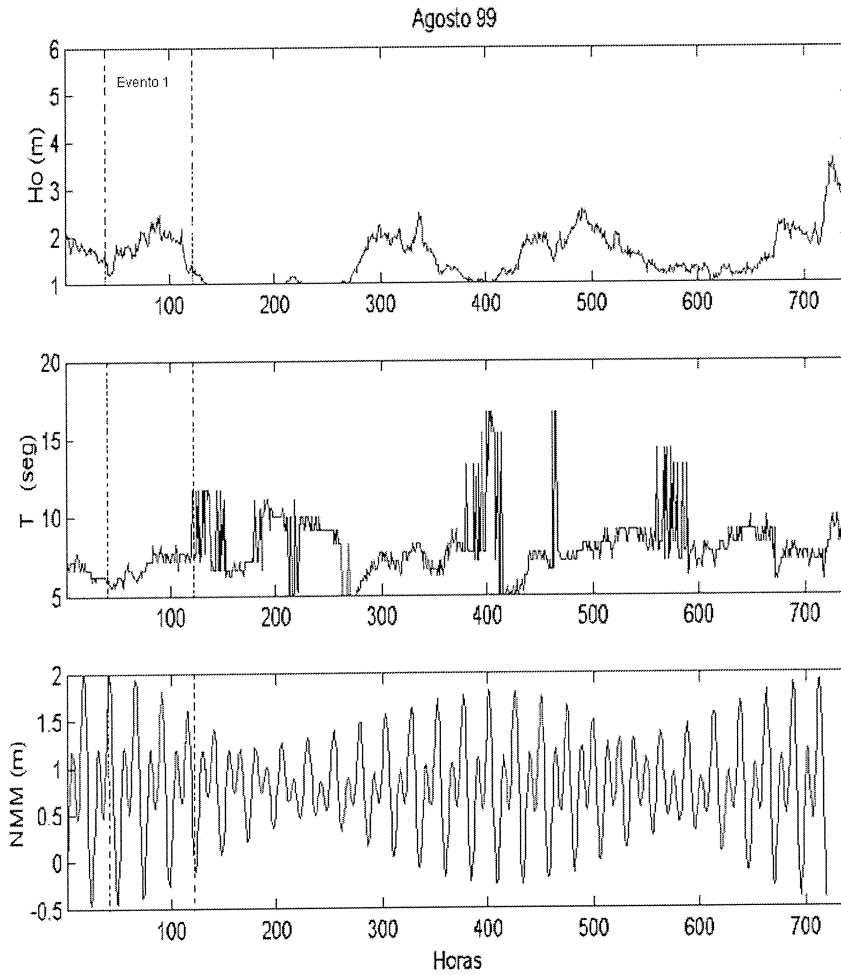


Figura 33: Climatología del oleaje durante el mes de Agosto de 1999. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros.

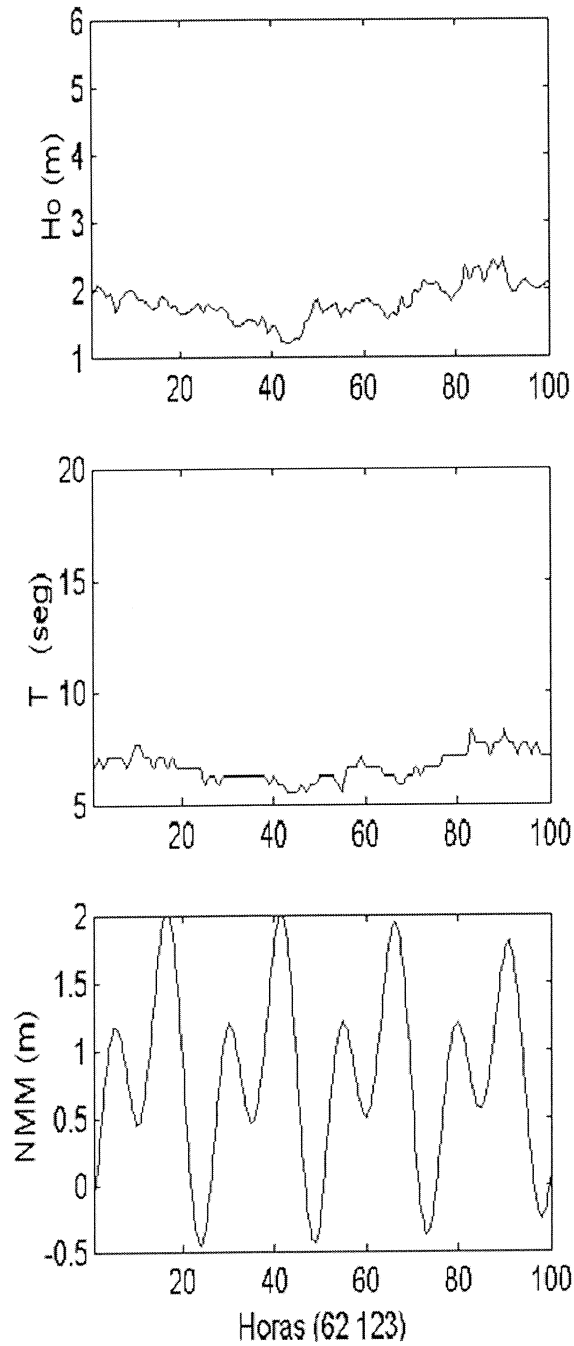


Figura 34: Climatología del oleaje y marea correspondiente al evento 1 de Agosto 99. El recuadro superior muestra la altura del oleaje ( $H_s$ ) en metros. El periodo ( $T_p$ ) en segundos y la marea con referencia al NMM en metros

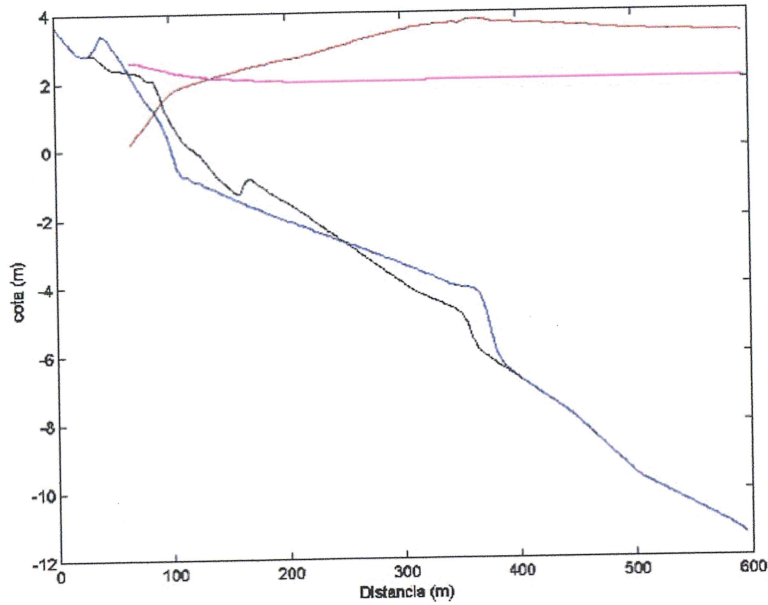


Figura 35: Perfil inicial del evento 1 de Agosto 1999 en negro, el perfil resultante de la simulación en color azul. En rojo nivel máximo de inundación durante el evento y marrón nivel máximo de altura de oleaje.

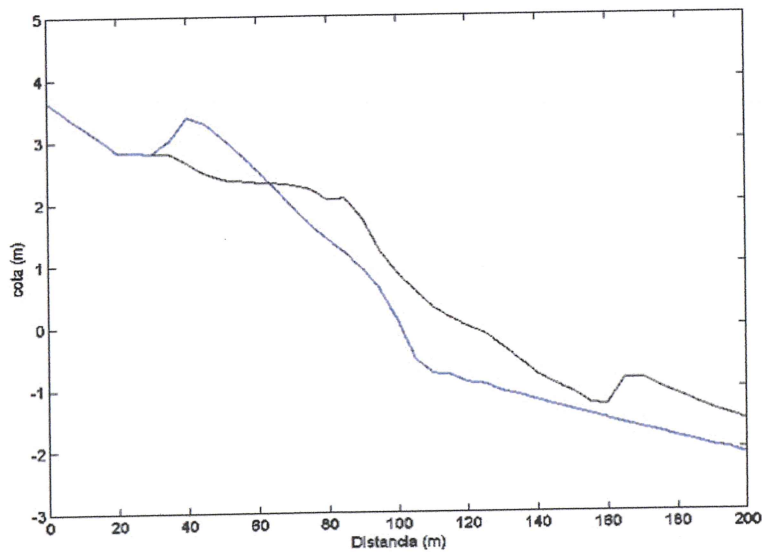


Figura 36: Primeros 200m del perfil de Agosto 1999, el modelo simuló el transporte del sedimento de las barra hacia la parte alta del perfil, generando una berma.

## **9. Discuciones**

El transporte de arena en dirección hacia la costa o fuera de la costa obedece a cambios estacionales en las condiciones del oleaje. En invierno, el oleaje de tormenta transportará arena de la parte alta de la playa hacia la zona de rompiente, depositando el sedimento en las barras formadas detrás de la zona de rompiente, produciendo una erosión del perfil de la playa, dando como resultado un incremento de la pendiente del perfil de playa. Por el contrario, el sedimento que se depositó sobre la barra durante el invierno será regresado por el oleaje de verano, que es menos energético. El sedimento será distribuido hacia la costa para formar bermas produciendo playas con perfiles de menor pendiente

El modelo SBEACH reprodujo aceptablemente el efecto que tiene el oleaje sobre el perfil de playa. También reprodujo el transporte de sedimento sobre la cara de la playa y la formación de barras. Durante las simulaciones se observó que la parte más dinámica del perfil es, desde la parte alta de la cara de la playa hasta la zona de rompiente, de acuerdo con lo observado por Stauble & Cialone en 1994. El modelo fue capaz de reproducir la erosión de las bermas, el movimiento de la barra y la acumulación de sedimento en la zona de surf para crear barras. El modelo también reprodujo la variación de la posición de la rompiente durante el evento de tormenta, así como el nivel máximo de inundación debido al oleaje.

Al comparar los resultados obtenidos utilizando este modelo en el perfil de playa de las costas de Rosarito, con los resultados que se presentan en el reporte técnico No. 4 del SBEACH, se estableció que el modelo trabaja adecuadamente y está calibrado para las playas de Rosarito B.C, mostrando la capacidad del modelo para reproducir las principales variaciones morfológicas.

### **9.1. Discuciones de las características del transporte por mes.**

#### **9.1.1. Diciembre de 1998**

En Diciembre 1998, utilizando las condiciones de oleaje introducidas al modelo se observó una respuesta similar para los cuatro eventos, los perfiles simulados presentan una mayor pendiente después del paso de una tormenta sobre el perfil. Komar en 1976 establece que la relación que existe entre la distribución de las características del tamaño del sedimento sobre el perfil y

la relación de pendiente del oleaje en aguas profundas ( $H_o/L_o$ ) afecta directamente a las características morfológicas del perfil como son, el volúmen y la posición de la berma y la barra dando como resultado la formación de perfiles con menor/mayor pendiente. Durante las simulaciones del mes de Diciembre de 1998 se formaron dos rompientes en los cuatro eventos. La rompiente más cercana a la playa se generó entre los 180-200 metros, esta rompiente puso en suspensión el sedimento que se encontraba sobre la barra que estaba a 180 metros sobre el perfil.

Durante un evento de tormenta el oleaje rompe sobre el perfil de playa poniendo en suspensión el sedimento. En una tormenta la dirección del transporte de sedimento es principalmente perpendicular a la costa. La razón de transporte perpendicular a la costa y el desarrollo de perfiles con barras o bermas está relacionado directamente con el volúmen neto del transporte en dirección fuera de la costa o hacia la costa.

El criterio para predecir el volúmen neto de transporte, que resulta en la formación de barras o bermas sobre el perfil de playa, es  $(H_o/L_o) = [(H_o/wT)]^3$  esta es la relación de la pendiente de oleaje y el coeficiente de decaimiento utilizado por Magnus y Kraus 1989. Durante un evento de tormenta la dirección típica del sedimento es fuera de la costa por lo que la barra recibirá una contribución neta de transporte del sedimento, ésto se observó en el evento 1 de Diciembre donde el transporte del sedimento fué principalmente en dirección fuera de la costa, Figura 37. En todo el mes de Diciembre se observó que el sedimento que existe en la berma de la playa fué transportado fuera de la costa debido al transporte generado por el oleaje incidente de la tormenta.

De los criterios utilizados para determinar la dirección del transporte fuera de la costa o dentro de la costa y formar barras o bermas el criterio que se utiliza en este trabajo para comparar los resultados obtenidos por el modelo es el de Magnus & Kraus 1989, ya que éste criterio utiliza la altura del oleaje en aguas profundas y el periodo comparándolos con un coeficiente de decaimiento que utiliza el tamaño del sedimento promedio en el perfil.

Utilizando el criterio de pendiente de oleaje en aguas profundas ( $H_o/L_o$ ) contra el coeficiente de decaimiento ( $H_o/wT$ ) utilizado por Magnus y Kraus 1989 se observó que las características del oleaje del mes de Diciembre son erosivas y los resultados del transporte de sedimento fuera de la costa que simula el modelo son aceptables al compararlos con el criterio de Magnus y Kraus.

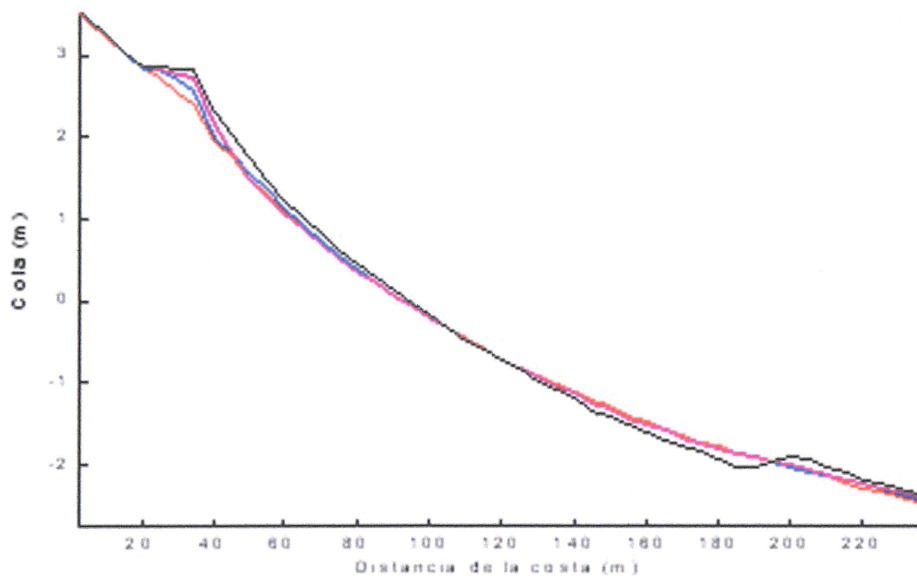


Figura 37: La variación del perfil del mes de Diciembre de 1998 siendo el evento 1 el evento más erosivo de la serie. Perfil inicial, negro, el perfil del evento 1 en rojo

En la Figura 38 se muestra como la dirección del transporte dominante es hacia fuera de la costa. El oleaje durante el mes de Diciembre de 1998 presentó características energéticas, si observamos sus periodos que fueron siempre mayores a 13 segundos y con alturas mayores de 3 metros.

### 9.1.2. Enero de 1999

En Enero 1999 se simularon cuatro eventos, de los cuales el tercero fué el más energético, presentando alturas de oleaje de 3.1 metros, (Figura 24 y 25). Con estos datos de oleaje el modelo simuló un transporte de sedimento hasta los 600 metros fuera de la costa. Durante la simulación el modelo reprodujo la formación de tres barras la primera a los 130 metros, la segunda 170 metros y la tercera a los 180 metros. La formación de estas barras son el resultado del transporte del sedimento fuera de la costa, ocasionado por el oleaje que disipa su energía sobre el perfil y el cambio en el nivel de marea.

El cambio de la distribución del sedimento sobre el perfil de playa para formar barras va a estar influenciado por la intensidad con que el oleaje disipe su energía sobre el perfil de playa y la capacidad que tenga el perfil

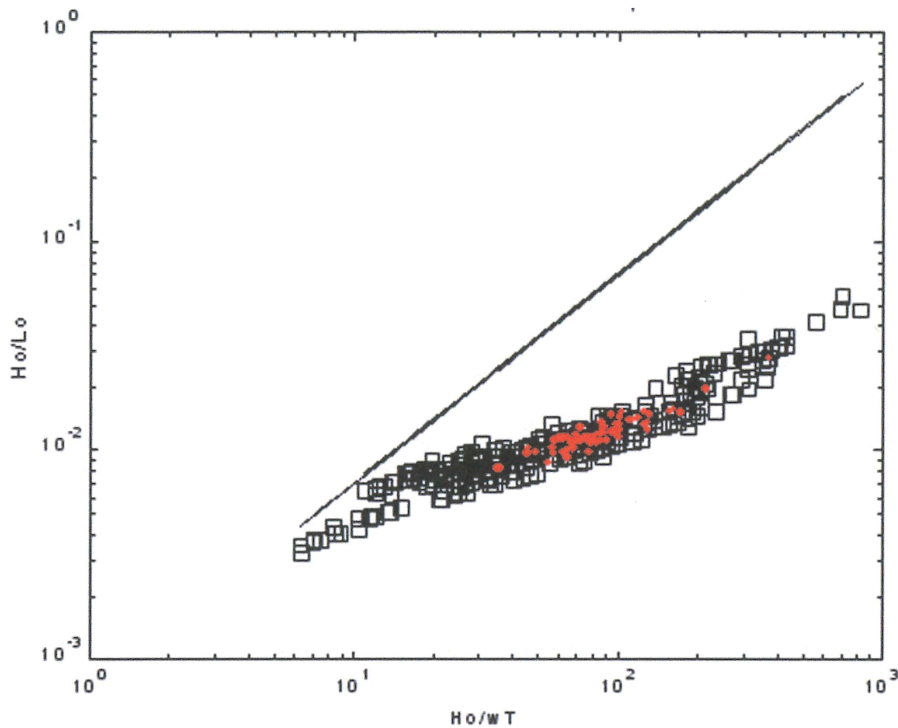


Figura 38: Criterio empírico utilizado por Magnus y Kraus (1989) para observar el movimiento de sedimento comparando la pendiente del oleaje en aguas profundas y el coeficiente de decaimiento del oleaje de Dean (1987). En esta figura se observa como el transporte para el mes de Diciembre es principalmente hacia fuera de la costa.

para responder al oleaje incidente, actuando el perfil como un amortiguador, transportando el sedimento que se encuentra en la parte alta del perfil hasta la zona de rompiente donde se establecerá formando barras. En el caso del perfil de Enero 1999 el perfil contaba con una berma y una cara de playa suficientemente ancha para aportar sedimento a las barras. Como se observa en el perfil de Enero (figura 23) el material necesario para alimentar la formación de las barras es tomado principalmente de la cara de la playa lo que genera una erosión en la cara de la playa.

Como se observa en las simulaciones, la condición para que el oleaje rompa está en función de la pendiente local de la playa y la pendiente del oleaje (Weggel 1972, Singamsetti & Wind 1980). Conforme el oleaje va rompiendo, la disipación de la energía del oleaje sobre el perfil se incrementa fuertemente produciendo la energía necesaria para poner en suspensión el sedimento y transportarlo.

El mayor volúmen de transporte de sedimento de manera perpendicular a la playa podría estar localizado cerca del punto de rompiente donde ocurrirá la máxima disipación del oleaje (Larson & Kraus 1989). El modelo muestra como más allá de este punto en dirección hacia el mar la razón del transporte decrece permitiendo la depositación de sedimento y la formación de barras, conforme la barra va creciendo el oleaje rompe más afuera de la costa y el punto de rompiente se traslada mas atrás de la zona de rompiente haciendo que la barra emigre fuera de la costa. Esta es una de las razones de la precencia de las barras a los 130m a los 160m y a los 180m además la variación de la altura de la marea, que en este mes fueron mareas vivas lo que provoca el movimiento del punto de rompiente.

En general, el límite de transporte efectivo para eventos de tormentas es comúnmente tomando como la profundidad de rompiente  $H_b$  basado en la altura de oleaje significativa (Vellinga, 1983).

El modelo SBEACH simula, en los eventos de Enero, que la pendiente de la cara del perfil aumentá debido a la erosión ocasionada durante la tormenta. De acuerdo con las relaciones empíricas establecidas por Dean en 1973, ( $H_o/wT$ ), quien relacionó la altura de oleaje en aguas profundas, un parámetro adimensional del sedimento y el periodo del oleaje, concluye que la pendiente de la cara del perfil va a ser mayor al incrementarse la intensidad del oleaje y su pendiente. Durante el evento 3 de Enero, que fué el más erosivo de este mes , las características del oleaje que se introdujeron al modelo fueron de oleaje variante incrementando al final de la serie y de periodos casi constantes de 15 segundos, así de acuerdo a los parámetros de Dean y los resultados del modelo se podría predecir el movimiento de un gran volúmen de sedimento que erosionaria al perfil.

Cuando se utiliza el criterio de Larson y Magnus (1989) para corroborar la dirección del sedimento, se observa que el transporte es principalmente fuera de la costa. La Figura 39 muestra resultados similares a los encontrados por el modelo.

Junto con el oleaje, el nivel del agua es otro factor que ayuda a transportar sedimento. Durante eventos de oleaje extremo el nivel del mar aumenta debido al apilamiento del agua sobre la costa a este fenómeno se le conoce como "storm surge", este aumento en el nivel del mar permite que el oleaje tenga mayor efecto sobre la parte alta del perfil de playa.

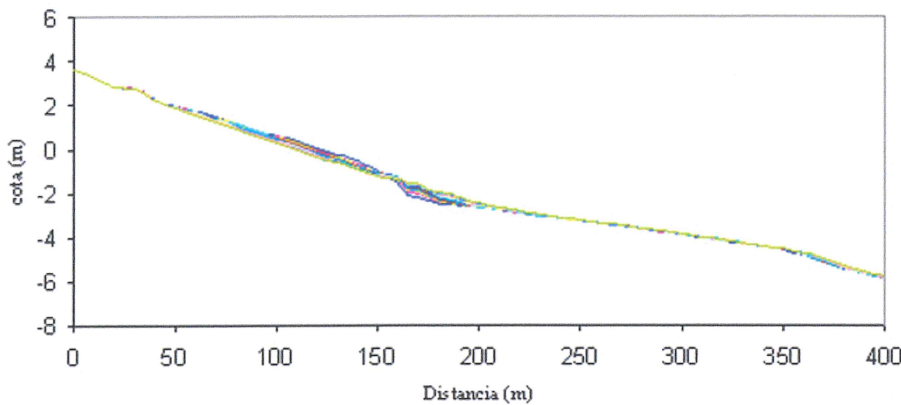


Figura 39: Se ilustra como el transporte de sedimento originado por el oleaje sobre el perfil de playa de enero transporta sedimento sobre la cara de la playa para formar barras a los 130,169 y 180 metros.

### 9.1.3. Febrero 1999

En Febrero se simularon con el modelo SBEACH dos eventos de tormenta que se escogieron por sus características de periodo y oleaje. El modelo simuló un mayor volumen de transporte sobre el perfil con una tormenta de mayor duración que una con mayor intensidad. Eventos muy intensos pero con poca duración permiten al perfil responder de mejor manera amortiguando el efecto de la tormenta sobre la playa que eventos no tan intensos pero con mayor duración, cuyos resultados son más erosivos, este efecto de la tormenta sobre el perfil lo mencionó Lazcano-Venegas en 1997, al utilizar este modelo en las playas de Tijuana.

Al utilizar el criterio de Magnus y Kraus (1989) para calcular la dirección de volumen del transporte de sedimento sobre el perfil, se observó una distribución del sedimento en dirección hacia la costa o fuera de la costa, (figura 40). Sin embargo, el mayor volumen de transporte es en dirección fuera de la costa. Este criterio de Magnus y Kraus, (1989) no toma en cuenta la presencia de barras multiples sobre el perfil, como este particular perfil de Febrero que presenta dos barras, de las cuales la que se encuentra a 370 metros de la costa refiere más a un escarpe, con un cambio abrupto en su pendiente, provocando una rompiente de oleaje muy energética que pone en suspensión el sedimento.

Al simular con el modelo la entrada de la tormenta, y el cambio del perfil con el avance del tiempo, el oleaje con altura de ola más pequeña comenzó a transportar el sedimento de la parte alta de la playa, de la berma específi-

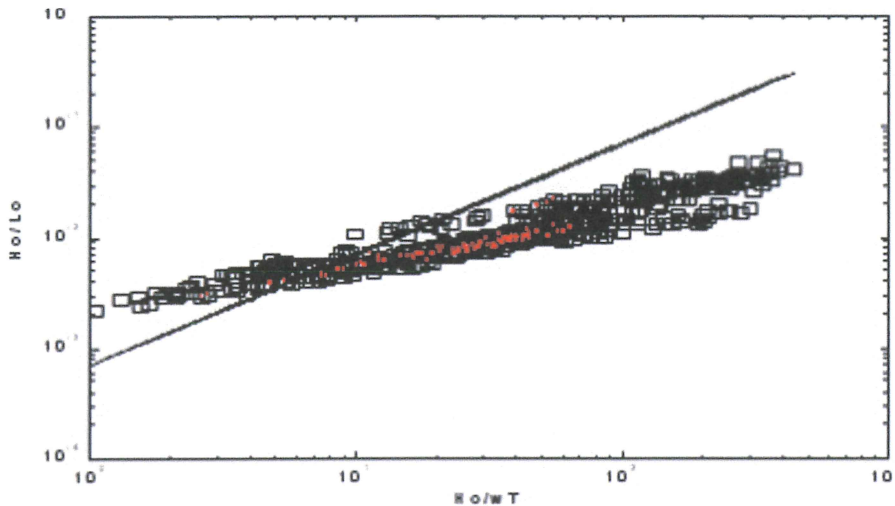


Figura 40: Criterio de distinción entre barra o berma para el mes de enero 98 y durante el evento 3. Se muestra como algunos puntos caen en la parte de generación de barra, sin embargo el transporte principal es fuera de la costa.

camente. Tiempo después debido al cambio de marea y la llegada de oleaje con mayor altura, se genera otra rompiente más alejada de la costa aproximadamente a los 400 metros esta rompiente lleva el sedimento atrás de la rompiente en dirección fuera del mar. Cuando el oleaje se acerca al punto de rompiente y disipa su energía genera un movimiento turbulento que pone el sedimento en suspensión, este sedimento puede ser transportado hacia la costa o fuera de la costa, debido al campo de velocidades que se genera por la disipación del oleaje.

Para los perfiles modelados en este experimento la dirección del sedimento fué principalmente fuera de la costa, erosionando la parte alta del perfil y llevando sedimento más atrás de la zona de rompiente. La tasa de transporte fuera de la rompiente obedece a un decaimiento exponencial que permite al modelo simular el transporte del sedimento fuera de la costa en la zona de rompiente. Este decaimiento exponencial esta dado por un parámetro adimensional que esta correlacionado con el tamaño del sedimento. El sedimento sobre el perfil responde a los cambios en la altura del oleaje. Cuando se presenta oleaje de mayor altura pone en suspensión más arena permitiendo que los granos atrapados se dispersen fuera de la costa, con un decaimiento exponencial más gradual permitiendo el asentamiento atrás de la zona del punto de rompiente.

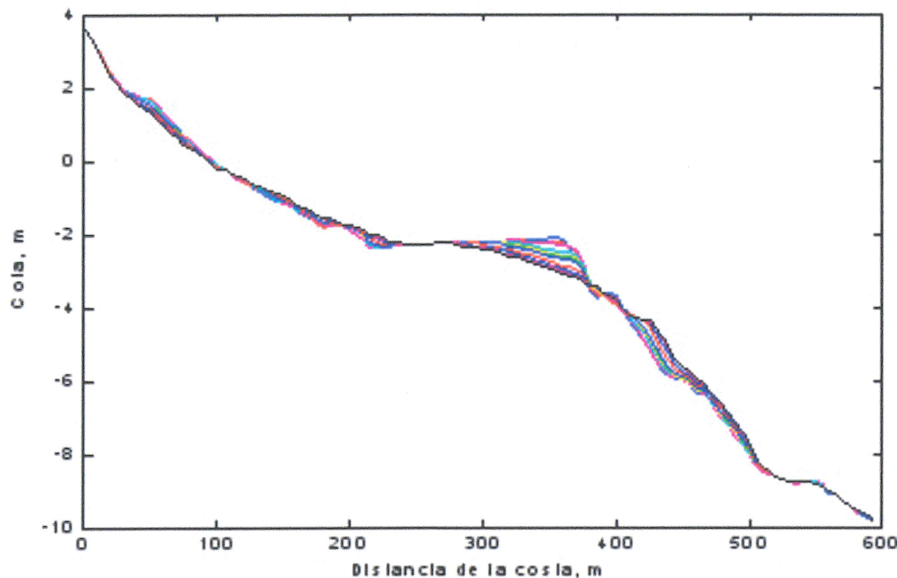


Figura 41: El modelo simula aceptablemente el transporte del sedimento fuera de la costa, en Febrero 1999. El oleaje con mayor altura rompe directamente sobre la plataforma erosionándola.

El mes de Febrero presenta las alturas de oleaje mayores en todo el experimento (5.3 metros) además de coincidir con marea alta, (figura 43). Cuando el oleaje disipa su energía sobre la playa se produce una elevación por encima del nivel de agua en el mar, esta elevación es conocida como set-up. El set-up tiene relación directa con la altura del oleaje ya que como lo describen Guza & Thornton (1981), a mayor altura de oleaje el incremento en la altura del agua debido al set-up será mayor; así durante eventos de oleaje extremo el incremento en el nivel medio de agua debido al set-up es un factor importante. En mediciones de campo se puede observar como un incremento de 1 metro en el nivel agua debido al set-up se refleja con intrusiones de agua en tierra de hasta 10 metros. El modelo reproduce las características del set-up de 0.80 m el máximo en el punto de rompiente y en la playa tiene una intrusión de más de 10 metros, el set-up es un factor importante que afecta el run-up sobre la playa ya ambos están directamente relacionados.

El modelo numérico SBEACH no solamente calcula resultados sobre el cambio del perfil y el movimiento del transporte de sedimento en forma perpendicular a la costa, además proporciona información importante para determinar los daños que pudiese producir por inundamiento una tormenta. Cuando el aporte de sedimento de la parte alta del perfil es mínimo y todo

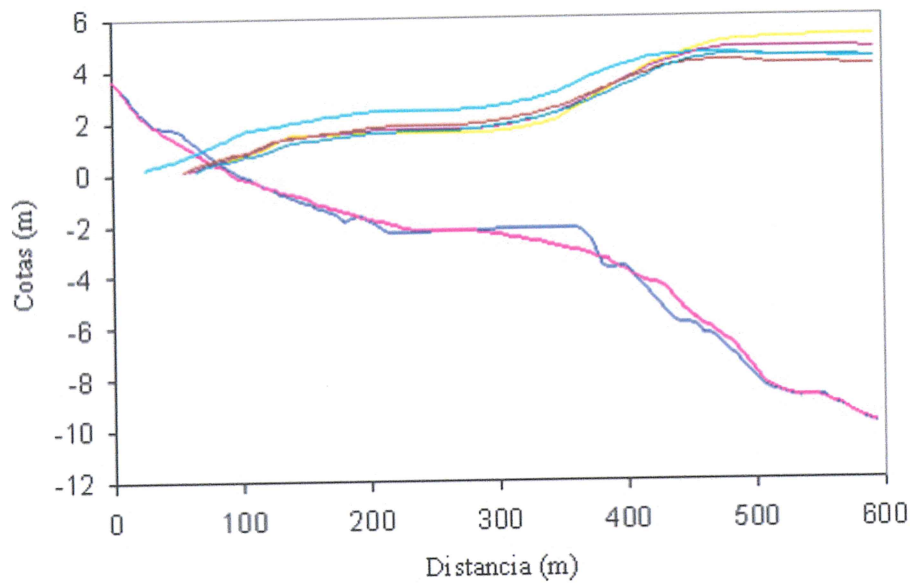


Figura 42: El modelo simula dos rompientes, la primera que es la mas alejada de la costa donde el oleaje disipa la mayor cantidad de energía y la segunda más cercana a la costa, el modelo es capaz de permitir la reformación del oleaje

el sedimento se transporta fuera de la costa, el daño del oleaje sobre la costa causado inundacion es conciderable, en la figura 43 se muestra la variación del set-up durante el evento de tormenta y es importante notar la elevacion de este set-up sobre el perfil.

El criterio de comparación de Magnus y Kraus (1989) ayuda a corroborar los resultados obtenidos mostrando el movimiento del sedimento será fuera de la costa para este evento en febrero (figura 44).

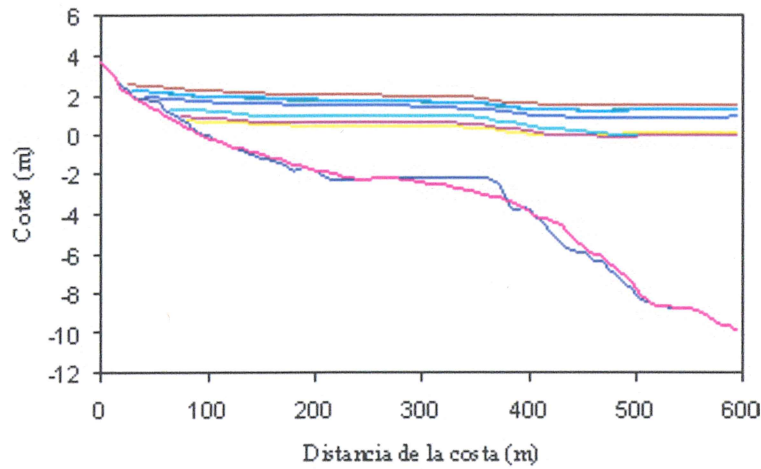


Figura 43: La variación del set-up en el transcurso del evento, nótese que el modelo simula dos lugares de rompiente y por lo tanto dos lugares donde se genera el set-up

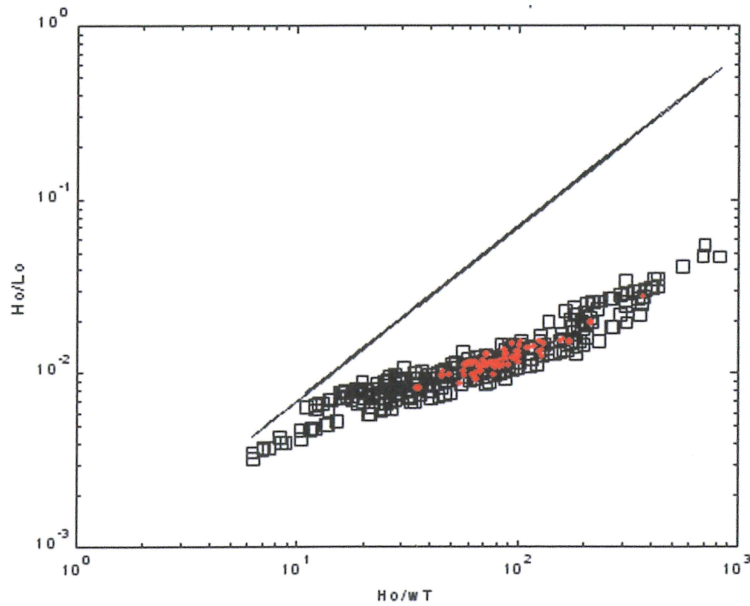


Figura 44: El transporte de sedimento que se da en este evento es completamente fuera de la costa, generando una erosión sobre la playa

## 10. Conclusiones

- A. El modelo SBEACH es capaz de reproducir adecuadamente el transporte perpendicular a la costa, así como la formación de las barras debido a la rompiente del oleaje.
- B. Se encontró que el modelo simula de mejor manera el transporte en la cara de la playa y la zona de surf.
- C. En este trabajo los resultados muestran que se logró calibrar con éxito el modelo de transporte de sedimento SBEACH, mostrando que para las playas de Rosarito B.C el perfil de playa responde a los cambios estacionales del oleaje. Durante el verano la parte alta del perfil recibe aporte de sedimento de las barras y durante el invierno, el volumen de sedimento que se encuentra en el perfil es transportado de la berma a la zona de rompiente para formar barras.
- D. Los cambios que ocurren en la forma del perfil de la playa están relacionados a las características del oleaje incidente. Habiéndose encontrado que el transporte de sedimento en la playa en dirección perpendicular a la costa o hacia la costa está relacionado directamente con la energía del oleaje y su pendiente,
- E. Utilizando el criterio de Larson & Kraus 1989,  $(\frac{H_o}{L_o} = M\{\frac{H_o}{wT}\}^3)$  para la predicción del transporte perpendicular a la costa, relacionando la pendiente de la ola y el coeficiente de decaimiento del oleaje, se observó que cuando el lado izquierdo en la ecuación es mayor al derecho el transporte es en dirección fuera de la costa resultando una erosión del perfil de playa y viceversa.
- F. La generación y migración de las barras en el perfil de playa está directamente relacionada con la altura y periodo del oleaje.
- G. El contar con un modelo como el SBEACH para reproducir o simular la respuesta del perfil de playa a eventos de oleaje de tormenta resulta muy valioso en la prevención de daños a la infraestructura costera.
- H. No se encontró relación alguna entre las variaciones de periodo constante, oleaje variante, o viceversa. Se encontró que un evento de tormenta largo tiene mayor efecto de erosión sobre el perfil que uno con poca duración y muy intenso, se encontró que durante una tormenta el mayor volumen de sedimento es transportado fuera de la zona de rompiente.

## 11. Bibliografía

- 1. Appendini-Albbrechtsen Christian Mário (1995). *Aplicación de un modelo numérico para la estimación de volúmenes de azolve en la central termoeléctrica de Rosarito Baja California México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas.
- 2. Appendini-Albbrechtsen Christian Mário. (1998). *Plan de manejo de la erosión costera para playas de Rosarito Baja California México*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas.
- 3. Aubrey D.G. (1979). *Seasonal patterns of onshore /offshore sediment movement*. Journal of Geophysical Research. 84(10):6347-6354.
- 4. *Coastal Engineering Manual*. (1998) Part III U. S. Army corps of Engineers 480 pp.
- 5. Dally W.R., and Dean R.G. (1984) *Suspended Sediment Transport and Beach Profile evolution*. Journal of Geophysical Research, Vol 90 No. C6 pp 11917-11927.
- 6. Dean, R.G. and Dally, W.R. (1984). *Applications of equilibrium beach profile Concepts*. Coastal Engineering abstracts, American Society of Civil Engineers, pp 140-141.
- 7. Donald K. Stauble y Mary A. Cialone.(1994) *Sediment dynamics and profile interactions: Duck 94*. Coastal Engineering (4)1,121-134.
- 8. Guza D. y Thornton F, (1981) *Superduck beach sediment sample experiments: Beach profile change and foreshore sediment dynamics*. Technical Report CERC-93-4, U.S Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Ms., 31 pp
- 9. Kraus N.C. y Larson M. (1993) *Simulation of January 4 1992 Storm Erosion at Ocean City Maryland*. Shore and Beach (61)1, 123-147.
- 10. Kriebel D.L. (1982) *Beach and Dune Response to Hurricanes*, unpublished M.S. Thesis, University of Delaware, Newark, DE.
- 11. Kriebel D.L. and Dean R.G. (1985) *Numerical Simulation of Time Dependent Beach and Dune Erosion*. Coastal Engineering, Vol 9, pp 221-245.

- 12. Kriebel D.L. and Dean R.G. (1985) *Estimates of Erosion and Mitigation Requirements under Various Scenarios of Sea Level Rise and Storm Frequency for Ocean City, Maryland*. Preliminary Report, Coastal and oceanographic Department, University of Florida, Gainesville, FL.
- 13. Komar Paul D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall 2da. edición . 544 pp.
- 14. Lehman, F.W.P. (1884). *Das Küstengebiet Hinterpommerns, Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, Band XIX*.
- 15. Larson M y Kraus N.C. (1989a ). *SBEACH Numerical Model for simulating Storm- Induced Beach Change*. Report 1: Empirical foundation and Model Development, Technical Report CERC 89-9, US Army Engineer Waterways Experiment station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss, 256 pp.
- 16. Larson M, Kraus N.C.y Byrnes, M.R. (1990). *SBEACH Numerical Model for simulating Storm-Induced Beach Change*. Report 2: Numerical Formulation and Model test, Technical Report CERC 89-9, US Army corps of Engineer Waterways Experiment station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg Miss, 270 pp.
- 17. Lazcano-Venegas, H. (1997) Variación del perfil de playa bajo condiciones de tormenta en Playas de Tijuana B.C., México. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas.
- 18. Marmolejo-Lara Mário (1985). *Control de azolvamiento en una obra de toma de agua Marina*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas. Ensenada Baja California.
- 19. Mendoza-Ponce Ernesto Tonatiuh. (1999). *Variación espacio temporal del perfil de playa en Rosarito Baja California*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Facultad de Ciencias Marinas.
- 20. Montes de Oca M. (1989). *Topografía*. Edit. Alfaomega 4ta edición México D.F 343 pp.
- 21. Rector, R.L. (1954) *Laboratory Study of equilibrium Profiles of beaches*. Technical memorandum No. 41, Beach erosion Board, Coastal

Engineering Research Center, US Army Engineering Waterways Experiment station, Vicksburg, MS.

- 22. Rosati J. D., Wise R. A. Larson M (1993). *SBEACH Numerical Model for simulating Storm-Induced Beach Change*. Report 3: User's manual, Instruction Report CERC-93-2. US Army Engineer Waterways Experiment station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Miss, 150 pp.
- 23. Shepard, F.P. (1950), *Longshore Bars and Longshore Troughs*. Technical memorandum No. 15, Beach erosion Board, Coastal engineering Research Center, US Army Corps of Engineer Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.
- 24. Singamsetti, S.R, and Wind, H.G. (1980), *Breaking waves: Characteristics of Shoaling and breaking periodic waves Normally incident to plane beaches of constant slope*. Delft Hydraulics Laboratory, Report M 1371, Delft The Netherlands.
- 25. Seville, T.(1957) *Scale effects in two dimensional Beach Studies*, Transactions from the 7th General Meeting of the international Association of Hydraulic Research, Vol 1 pp A3-1-A3-10
- 26. Vellinga, P. (1983) *Predictive Computational model for beach and dune erosion during storm surges*, Proceedings of Coastal Structures '83, American Society of civil Engineers, pp 806-819.
- 27. Weggel, R.J. (1972) *Maximun Breaker height* Journal of the waterways, Harbors and coastal Engineering Division, American Society of civil Engineers, Vol 98, No 1 pp 529-547.