



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS

**CAMBIOS ESPACIO-TEMPORALES DE PLAYA EN PLAYAS DE ROSARITO,
BAJA CALIFORNIA, MEXICO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

presenta

José Román Lizárraga Arciniega

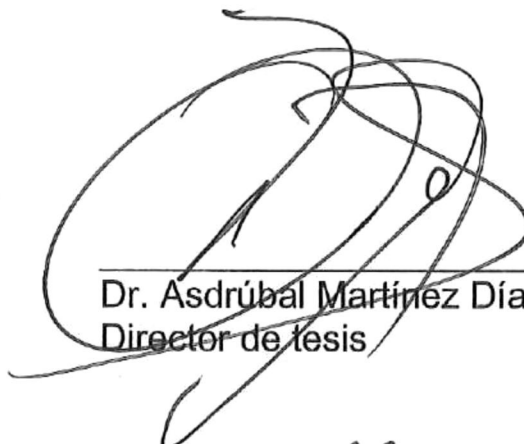
Ensenada, Baja California, México

Noviembre 2005

TESIS

CAMBIO ESPACIO-TEMPORALES DE PLAYA EN PLAYAS
DE ROSARITO, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

aprobada por:



Dr. Asdrúbal Martínez Díaz de León
Director de tesis



Dr. Affonso Da Silveira Mascarenhas



Dr. Carlos Rodolfo Torres Navarrete



Dr. Josué Álvarez Borrego



Dr. Roberto Millán Núñez

INDICE

Resumen.....	v
Abstract.....	vii
Dedicatoria.....	viii
Agradecimientos.....	x
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xvii
1.- Introducción.....	1
2.- Objetivos.....	7
2.1 Objetivos específicos.....	7
2.2 Hipótesis de trabajo.....	7
3.- Antecedentes.....	8
4.- Área de estudio.....	17
4.1 Geología-geomorfología.....	17
4.2 Oceanografía.....	22
4.3 Clima.....	25
5.- Metodología.....	26
5.1 Base de datos.....	26
5.1.1 Oleaje.....	26
5.1.2 Perfiles de playa.....	28
5.2 Cambios de corto plazo.....	33
5.3 Cambios de mediano plazo.....	34
5.4 Cambios de largo plazo.....	35
6.- Resultados y Discusiones.....	39
6.1.- Cambios de playa en el corto plazo.....	39
6.1.1 Identificación de eventos extremos en perfiles de playa.....	41
6.1.2 Identificación de evento extremo de oleaje de tormenta.....	42
6.1.3 Respuesta de la playa a evento de tormenta.....	50
6.1.3.1 Periodo del 28/octubre/1997 al 28/diciembre/1997.....	50
6.1.3.2 Periodo del 28/diciembre/1997 al 27/enero/1998.....	52

6.1.3.3 Periodo del 28/enero/1998 al 27/febrero/1998.....	60
6.1.4 Conclusiones.....	72
6.2.- Cambios de playa a mediano plazo.....	74
6.2.1 Segmento de playa norte.....	75
6.2.1.1 Oscilación periódica anual.....	80
6.2.1.1.1 Estacionalidad del oleaje.....	83
6.2.1.1.2 Condiciones de invierno.....	85
6.2.1.1.3 Condiciones de verano.....	88
6.2.1.1.4 Ciclo de playa invertido.....	91
6.2.1.1.5 Oscilaciones de mayor periodo.....	98
6.2.1.2 Conclusiones.....	100
6.2.2 Segmento de playa intermedio norte.....	101
6.2.2.1 Oscilación periódica anual.....	102
6.2.2.2 Oscilación periódica de 36 meses (3 años).....	106
6.2.2.2.1 Efectos evento ENSO.....	115
6.2.2.3 Conclusiones.....	117
6.2.3 Segmento de playa intermedio sur.....	119
6.2.3.1 Oscilación periódica anual.....	119
6.2.3.2 Oscilación periódica de 36 meses (3 años).....	124
6.2.3.3 Conclusiones.....	126
6.2.4 Segmento de playa sur.....	127
6.2.4.1 Oscilación periódica anual y de 36 meses.....	127
6.2.4.2 Conclusiones.....	130
6.3.- Cambios de largo plazo.....	131
6.3.1. Conclusiones.....	141
7. Conclusiones generales.....	142
8. Literatura citada.....	145

RESUMEN

Se obtuvieron datos mensuales de volumen de arena en la playa subaérea y ancho de playa desde octubre 1995 a diciembre 2003, características del oleaje desde junio 1994 a febrero 2001 y dos fotografías aérea y una imagen satelital para identificar y cuantificar los cambios de playa en escalas temporales de corto (días), mediano (meses) y largo plazo (decenas de años) así como los factores que los inducen. El cambio de corto plazo o episódico más significativo se presentó en el mes de febrero de 1998 cuando se observó el mínimo volumen de arena y ancho de playa a lo largo de 11 km de playa bajo estudio con tasa de pérdida de volumen de arena de $3.2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{día}$ y un retroceso del ancho de playa $1.4 \text{ m}/\text{día}$. Se verificó por vez primera que los cambios de playa de corto plazo en Rosarito están controlados por la acción de tormentas invernales; durante estas tormentas, la combinación de marea alta con olas de mayor altura ocasionaron sobre-elevaciones excepcionales del nivel del mar que inundaron la costa y provocaron la destrucción de infraestructura costera. El número de Dean resultó ser un indicador apropiado en la predicción de la erosión o acreción de la playa subaérea en la zona de estudio. La severidad de las tormentas invernales está asociada a la ocurrencia de eventos ENSO. Los cambios de mediano plazo se analizaron como episodios cíclicos o recurrentes usando la técnica de análisis espectral. Para estimar la contribución de cada modo de oscilación al cambio de volumen de arena se empleó la técnica de ajuste por cuadrados mínimos. Las oscilaciones más sobresalientes corresponden al ciclo anual – erosión en invierno y acreción en verano – y a la oscilación de 36 meses que se registró por primera vez para las playas de Rosarito. La mayor contribución al movimiento de arena en la playa subaérea se debe al ciclo anual con un volumen hasta de $80 \text{ m}^3/\text{m}$ y ayuda a explicar hasta el 64% de la variabilidad del volumen y está controlada por la estacionalidad del oleaje. En contraste, la oscilación de 36 meses contribuye al movimiento de arena con sólo $40 \text{ m}^3/\text{m}$ y explica un máximo de 50% de la varianza total. Como una contribución de suma importancia de este trabajo es la identificación de un ciclo anual de playa invertido, esto es, erosión en verano y acreción en invierno. Este ciclo está controlado por variaciones locales en la

morfología costera y en el ángulo local de rompiente con respecto a la costa. El ciclo de 36 meses que también se identifica por primera vez, está controlado por los siguiente factores: a) la variación interanual en el patrón de olas y en particular, entre los inviernos combinados con eventos ENSO como el de 1998 y b) la existencia de "puntos calientes" los cuales son puntos de convergencia de energía del oleaje y erosión intensa de la playa. Los cambios de largo plazo, entre 13 y 15 años, muestran un patrón alternante de avance y retroceso en la posición de la línea de playa (PLP) y contrario en las playas al norte y al sur del rompeolas de la CFE. En el periodo de 1972 a 2002 la tasa de retroceso promedio de la PLP en las playas al sur del rompeolas fue 0.76 m/año, mientras que en las playas ubicadas más allá de 1500 m al sur del rompeolas el avance promedio de la PLP fue de 0.88 m/año. Los principales forzantes de estos cambios están relacionados con el mayor suministro de arena por los arroyos Guaguatay y Rosarito a partir de la época húmeda que se inició en 1972 y aumentó su interacción con las estructuras costeras de la CFE, incluyendo la "barrera dinámica" que produce el flujo del agua de enfriamiento de la planta. Es probable que los eventos ENSO de 1982 y 1998 hayan influido en la PLP de 1985 y 2003 que fueron las fechas de adquisición de las fotografías aéreas e imagen satelital. Se considera que la información que aquí se analizó permitió que por primera vez se identificaran y explicaran algunos procesos erosionales y acrecionales en las playas de Rosarito.

ABSTRACT

Beach attributes in Rosarito, Baja California, were studied from the analysis of 1861 beach profiles, acquired monthly between October 1995 and December 2003, two aerial photographs and one satellite image, acquired in 1972, 1985 and 2002 respectively. In the analysis, three time scales were considered: short (of the order of days), medium (of the order of months), and long term (of the order of decades). Our results show that most significant short term change of the subaerial beach was observed in February 1998 when minimum sand volume and beach width occurred simultaneously along 11 km of beach, when the rate of lost sand was $3.2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{day}$ and the beach width retreated at a rate of $1.4 \text{ m}/\text{day}$. It was found for the first time that large beach changes in the short term in Rosarito are controlled by the arrival of severe winter storms. During these storms the combination of high tide and high wave heights induce exceptional high water levels which in turn produce coastal flooding and destruction of urban infrastructure. Dean's number resulted to be an adequate indicator to predict beach erosion or accretion. Winter storm severity is associated with the occurrence of ENSO events. Medium time scale of beach changes were studied as a function of their period of recurrence using the spectral analysis technique where least square fitting technique was used to estimate the contribution of each mode of oscillation of sand movement. The most relevant modes of oscillation were the annual cycle – erosion in winter and accretion in summer – and the 36 month cycle, identified for the first time for Rosarito beaches. The larger contribution of sand movement in the subaerial beach was produced by the annual cycle, with up to $80 \text{ m}^3/\text{m}$ and accounting for the 64% of the total variance and controlled by seasonal wave patterns. In contrast, the 36 month mode of oscillation contributed to the movement of sand with only $40 \text{ m}^3/\text{m}$ and accounted with 50% of the total variance. A very important contribution of this work is the identification of an inverse seasonal cycle, that is, beach erosion in summer and beach accretion in winter. This inverse cycle is controlled by local changes in the coastal morphology and the angle of wave breaking with respect to shore. The occurrence of a 36 month mode of oscillation

is explained in terms of a) interannual variability in the wave patterns, particularly during winters in which ENSO events are present, as the one in 1998; b) the occurrence of hot spots, which are coastal points where wave energy converge and beach erosion is increased. Long term beach changes, 13 to 15 years, show an alternating pattern of shore advance or retreat as indicated by the analysis of the shoreline position (PLP) along the beaches on either side of the CFE's breakwater. From 1972 to 2002 the average rate of shoreline retreat along the beaches just south of the breakwater was 0.76 m/year, while beaches 1500 m farther south shoreline advance was 0.88 m/year. Forcing factors of shoreline changes are related to greater supply of sand by the rivers Guaguatay and Rosarito since 1972 when a wet period (greater precipitation) began and interacted with CFE's coastal structures, including a "dynamic barrier" produced by the cooling water out take. It is possible that ENSO events in 1982 and 1998 have influenced the shoreline position (PLP) in 1985 y 2002 when aerial photographs and satellite image analyzed here were acquired. It is considered that all the information analyzed and discussed here allowed for the first time to explain some erosional and accretional processes occurring along the beaches of Rosarito.

DEDICATORIA

Para ti Antonieta

que ante todas mis flaquezas y debilidades siempre has estado pronta a subsanar con tu incansable ayuda, tu paciencia, tu comprensión y sobre todo, con tu alegría y amor. Tu participación en el éxito de este negocio es indudable. Gracias por eso..... y mucho más.

Para ustedes

Román III

Isai

Claira y Romancito

Adriana e Ivana

por el ánimo de crecer, solventar retos con entereza y hacerme partícipe de esos grandes logros, esto es inapreciable.

Don Román y Doña Lydia

que adelante están.

Pedro, Uvaldina, Martha, Irma

por estar siempre atentos.

Dr. Santos y Laurita

por dejarnos ser parte de ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero hacer saber mi más profundo agradecimiento a *mi Universidad*, la Universidad Autónoma de Baja California que hasta hoy, me ha concedido oportunidad tras oportunidad para sentirme realizado y multiplicar este sentimiento en los jóvenes estudiantes.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su confianza en otorgarme una beca para buscar este logro..... gracias.

A la Dirección de Operación y Departamento de Oceanografía de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en particular al Oceanólogo Mario Marmolejo por su colaboración para compartir datos de perfiles de playa y de oleaje en Rosarito.

Agradezco a mi director de tesis, Señor Doctor Asdrúbal Martínez Díaz de León que con su gran conocimiento, y disposición y habilidad para transmitirlo, hizo posible la realización de este trabajo. De la misma manera a los Señores Doctores Affonso Da Silva Mascarenhas, Carlos Torres Navarrete, Roberto Millán Nuñez y Josué Alvarez Borrego, por sus enseñanzas, sus acertadas observaciones y comentarios durante el desarrollo de esta investigación y la elaboración del escrito.

Mi gratitud a Alfredo Chee, Roberto Pérez, Victor Gendrop, Luis Galindo, a quienes debo, entre una infinidad de cosas, los gratísimos momentos en el jardín del "insen" (con minúsculas), el comentario oportuno y la profunda amistad con la que me han dispensado a lo largo de mi vida.

Muchas gracias a los colegas Adán Mejía, Oscar Delgado y Alejandro Cabello por sus comentarios y apoyo; Eduardo Gil, Rafael Blanco, Rogelio Cano que junto con estudiantes como Chrisitan, Jorge, los dos Diegos, Tonatiuh y Erick (hoy exitosos profesionistas) entre otros, participaron en la obtención de la información de campo para este trabajo.

A quien consciente o inconcientemente me ayudaron a completar este trabajo, mi gratitud y un abrazo fraterno.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Nomenclatura y características principales de un perfil de playa. Se ilustran rasgos del perfil de verano e invierno.
- Figura 2. Area de estudio y características morfológicas generales en Playas de Rosarito
- Figura 3. Litología del NW de Baja California en la que se observa la reducción gradual hacia el norte del depósito de suelo litoral Q.
- Figura 4. Topografía submarina con profundidades en brazas y posibles celdas litorales en la región de estudio.
- Figura 5. Diagrama de flujo del procesamiento que se realizó a los datos de oleaje obtenidos en Rosarito (tomado de Oropeza-Rosales, 1998).
- Figura 6. Localización de los puntos de control de las bases de datos de la CFE y de la UABC. Los que inician con S o N indican que son al sur o al norte del rompeolas y corresponden a la base de datos de la CFE. Los que inician con las letras BN corresponden a la base de datos de la UABC.
- Figura 7. Método de nivelación diferencial simple (o de perfil) y conceptualización del ancho de playa, volumen de arena contenido por arriba del nivel de referencia y elevación o altura del perfil de playa.
- Figura 8. Proceso acrecional episódico ocasionado por deslizamientos de cantiles costeros (tomado de <http://pubs.usgs.gov/>)
- Figura 9. Erosión episódica producida por olas de tormenta. La reducción de arena sobre la playa facilita una mayor incursión de las olas hacia tierra provocando daños a la infraestructura (tomado de www.fema.gov/).
- Figura 10a. Ocurrencia de valores mínimos del volumen de arena (línea llena) y ancho de playa (línea punteada) durante el periodo total de mediciones en las playas hacia el norte del rompeolas de la CFE. Aunque las diferencias en volumen son significativas al 95% sólo para algunos inviernos, la coincidencia de erosión máxima en el total de puntos de control durante el invierno de 1998 permite definirlo como el evento episódico a estudiar.
- Figura 10b. Ocurrencia de valores mínimos del volumen de arena (línea llena) y ancho de playa (línea punteada) durante el periodo total de mediciones en las playas hacia el sur del rompeolas de la CFE. La diferencia en volumen entre los diferentes inviernos es significativa al 95% sólo para algunos inviernos, sin embargo la coincidencia de erosión máxima en el total de

puntos de control durante el invierno de 1998 permite definirlo como el evento episódico a estudiar.

Figura 11.- Potencia relativa de las olas durante los meses de septiembre a febrero del periodo de 1994-1995 a 1998-1999 frente a las instalaciones de la CFE, Rosarito.

Figura 12. Comparación de la potencia relativa de las olas ($m^2 s$) inter-inviernos en Rosarito. Las condiciones energéticas del oleaje que se presentaron entre los inviernos de 1995-1996 y 1998-1999 son similares al 95% de confianza, las diferencias entre los demás inviernos son significativas.

Figura 13. Intensidad acumulada mensual de tormentas en Rosarito durante el periodo de 1994 a 1999 conforme al criterio de Davis y Dolan (1992).

Figura 14.- Cambio de volumen de arena en cada uno de los perfiles de playa en Rosarito ocurrido entre el 28 de octubre de 1997 y el 28 de diciembre de 1997 en el que predomina la erosión de la playa subaérea a lo largo de la zona de estudio.

Figura 15. Cambio en el ancho de playa en cada uno de los perfiles de playa en Rosarito ocurrido entre el 28 de octubre de 1997 y el 28 de diciembre de 1997. En la mayoría de los perfiles predomina la disminución del ancho.

Figura 16. Altura de olas en Rosarito durante el periodo del 1 de octubre al 31 de diciembre de 1997. No se registra ninguna tormenta excepcional en este periodo pero si varios eventos con aturas de ola menores de 3 metros que en conjunto pueden ocasionar una erosión importante de la playa subaérea.

Figura 17. Cambio de volumen de arena en los perfiles de playa durante el mes de enero de 1998.

Figura 18. Cambio del ancho de playa en los perfiles de playa durante el mes de enero de 1998.

Figura 19. Combinación de altura de las olas con condiciones de mareas para el periodo de 28 diciembre de 1997 al 27 de enero de 1998 cuyos efectos se describen en el texto para las playas de Rosarito.

Figura 20. El valor del número de Dean por arriba del valor crítico ($V.C. = 3.2$) indica un proceso continuado de erosión de la playa a partir del 10 de enero de 1998.

Figura 21. Cambio de volumen del 28 de enero al 26 de febrero de 1998 en todos los perfiles de playa.

- Figura 22. Cambio del ancho de playa del 28 de enero al 26 de febrero de 1998 en todos los perfiles de playa.
- Figura 23. Aumentos de ancho de playa asociados a la contribución de arena proveniente de la posplaya observados en los perfiles BN04 (a) y S14 (b) entre el 26 de enero (línea continua) y el 27 de febrero de 1998 (línea punto línea).
- Figura 24. Oleaje extremo en Rosarito y marea asociada del 28 de enero al 28 de febrero de 1998.
- Figura 25. Elevación estimada del nivel del mar bajo condiciones extremas de oleaje en Rosarito durante el mes de febrero de 1998.
- Figura 26.- Efecto de oleaje de tormenta en febrero de 1998 en la costa de Rosarito: (a) inundación de infraestructura costera adyacente y (b) destrucción de residencias ubicadas sobre la playa misma.
- Figura 27.- El alto nivel energético de las tormentas de febrero de 1998 dieron lugar: (a) al descubrimiento de desechos de la industria energética y (b) la remoción total de la arena de la playa descubriendo el lecho rocoso en playas cercanas al BN03, hacia el norte del rompeolas.
- Figura 28.- Variabilidad del número de Dean durante el periodo del 28 de enero al 27 de febrero de 1998. Conforme al valor crítico (3.2) propuesto por Larson y Kraus (1989), todos los valores de N_0 exceden este valor, indicando una alta probabilidad de erosión de la playa.
- Figura 29.- Cambio acumulado de volumen de arena (a) y ancho de playa (b) con respecto al 28 de octubre de 1997.
- Figura 30. Los cambios de volumen entre octubre-diciembre con respecto a octubre febrero así como las diferencias entre octubre-enero y octubre-febrero indican cambios significativamente diferentes al 95%. Los cambios no significativos corresponden a los que se observan entre octubre-diciembre y octubre-enero.
- Figura 31. Definición de segmentos de playa y los puntos de control que los componen a lo largo de la zona de estudio. Para facilitar su ubicación, sólo se etiquetan algunos puntos de control.
- Figura 32. Serie temporal (a) y espectro (b) del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento norte de Rosarito. En el espectro de volumen de cada punto de control se indica el intervalo de confianza al 95%.

- Figura 33. Ajuste por cuadrados mínimos de la componente anual (línea quebrada) y el cambio del volumen de arena sin tendencia lineal (línea llena) para el punto de control BN01.
- Figura 34. Registro de altura de olas frente a las instalaciones de la CFE en Rosarito para el periodo de junio 1994 a enero 1999. Los vacíos de datos inhabilitan el uso de la técnica de análisis espectral.
- Figura 35. Registros de olas desde octubre 1996 a diciembre 2003 frente a Punta Concepción, California, EUA. La correspondencia de olas altas y olas bajas en los periodos invernales y de verano respectivamente aunque también se observan diferencias estacionales e interanuales.
- Figura 36. Espectro de olas del registro de siete años frente a Punta Concepción, EUA. Se indica el intervalo de confianza al 95%.
- Figura 37. Frecuencia de ocurrencia (%) de alturas de ola durante los inviernos de 1995 a 1998 frente a Rosarito. En estas temporadas, cerca del 23% del total del registro de olas presentan una $H_s \geq 2.5$ m.
- Figura 38. El valor de $N_0 > 4$ durante los inviernos indica la alta probabilidad de erosión de la playa subaérea y formación de barras en la zona de rompiente. Durante la primavera, la formación de barras en la zona de rompiente es menos favorecida ya que N_0 es mayor que el valor crítico (3.2) pero menor de 4.
- Figura 39.- Frecuencia de ocurrencia de alturas de ola durante los veranos de 1994 a 1998 frente a Rosarito. En estas temporadas, el 98.9% del registro total de las olas tiene $H_s < 2.5$ m y sólo el 1 % corresponde a olas de mayor altura.
- Figura 40. Durante los veranos, el valor de $N_0 < 3.2$ indica la probabilidad de acreción de la playa subaérea y la probable desaparición de las barras de arena en la zona de rompiente. Durante los otoños, se favorece la probable erosión de la playa subaérea ya que N_0 es mayor que el valor crítico (3.2) y por tanto se favorece también la formación de barras en la zona de rompiente.
- Figura 41. Series temporales de volumen de arena con desfase en el ciclo de erosión/acreción. El ciclo "normal" de erosión en invierno y acreción en verano está representado por la serie del punto de control BN04 (línea punteada), mientras que el BN02 (línea continua) representa el ciclo "invertido" de erosión en verano y acreción en invierno.
- Figura 42.- Morfología arqueada de la línea de playa en la que la playa frente al punto de control BN02 (triángulo) encara hacia el noroeste. Hacia el

extremo derecho de la fotografía se encuentra la saliente rocosa que queda expuesta en marea baja.

Figura 43.-Cambios en la dirección de viaje de las olas frente al Oasis (punto de control BN02).

Figura 44. Esquema del ángulo de arribo de las olas respecto de la perpendicular a la línea de playa. Nótese que el oleaje proveniente del NW con respecto a la perpendicular a la playa corresponde a oleaje proveniente del SW con respecto al norte geográfico.

Figura 45. Esquema de la dirección de transporte de arena paralelo a la playa inducido por el arribo de oleaje del SW, respecto de la norma a la playa durante el verano.

Figura 46. Esquema de la dirección de transporte de arena paralelo a la playa inducido por el oleaje del NW, respecto de la normal a la playa durante el invierno.

Figura 47. Morfología arqueada de la línea de playa en Baja del Mar. La playa sobre la que se marca el punto de control BN03 (punto negro) encara hacia el NW mientras que la playa al norte del mismo encara hacia el SW.

Figura 48. Composición del material playero en el punto de control BN03 durante (a) el invierno, en el que la pendiente de la cara de playa es mayor y (b) el verano en el que la arena ha cubierto el depósito de canto presentando una pendiente más suave.

Figura 49. Serie temporal (a) y espectro (b) del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento intermedio norte de Rosarito. En el espectro del volumen para cada punto de control se indica el intervalo de confianza al 95%.

Figura 50. Ajuste por cuadrados mínimos del ciclo anual del cambio de volumen de arena en el punto de control N01.

Figura 51. Ajuste por cuadrados mínimos del ciclo de 36 meses del cambio de volumen para el punto de control N07.

Figura 52. Rigurosidad de los inviernos 1995 a 2002 en términos de número de tormentas (a) y duración (b) conforme a Seymour et al., 1984.

Figura 53. Comparación de Hs entre el invierno de 1997 (línea continua) y el de 1998 (línea punteada). La rigurosidad del segundo es evidente, particularmente a lo largo del mes de febrero.

- Figura 54.- Reducción del volumen de arena en la playa subaérea en los inviernos de 1996 y 1998.
- Figura 55. Concentración de energía del oleaje que generan "puntos calientes" en las cercanías de la CFE en invierno y otoño (a y d). Durante primavera y verano el punto caliente se localiza hacia el sur del rompeolas de la CFE frente a Punta La Paloma (b-c).
- Figura 56a Serie temporal del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento intermedio sur de Rosarito
- Figura 56b.- Análisis espectral del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento intermedio sur de Rosarito. En cada espectro se indica el intervalo de confianza al 95%.
- Figura 57.- Ajuste por cuadrados mínimos del ciclo anual del volumen de arena para el punto de control S04.
- Figura 58.- Ajuste por cuadrados mínimos de la oscilación de 36 meses del volumen de arena para el punto de control S04.
- Figura 59.- Series temporales (a) y espectros (b) del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento sur de Rosarito. En cada espectro se indica el intervalo de confianza al 95%.
- Figura 60.- Tasas de cambio de la PLP a lo largo de la playa de Rosarito estimadas a partir del análisis de dos fotografías aéreas de los años 1972 y 1985 y una imagen satelital del año 2002.
- Figura 61.- Promedio mensual de la precipitación para el periodo de 1948 a 2002 en la localidad de la Presa Abelardo Rodríguez, Tijuana, B.C.
- Figura 62.- Anomalía de la precipitación invernal (noviembre-abril) en los inviernos 1948/1949 a 2002/2003 en la localidad de la Presa Abelardo Rodríguez, Tijuana, B.C.
- Figura 63.- Características de las playas cercanas a las estructuras de la CFE y en particular en la desembocadura del canal de desfogue.
- Figura 64.- Tasa de cambio de la PLP estimado de la serie temporal de perfiles de playa.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Características de las fotografías aéreas e imagen satelital para el análisis de cambio de playa en el largo plazo.
- Tabla 2. Alturas máximas anuales de las olas en Rosarito.
- Tabla 3.- Tormentas excepcionales resultantes del análisis de series parciales y su duración durante el periodo 1994-1999 en Rosarito, B. C.
- Tabla 4. Eventos excepcionales del mes de febrero de 1998
- Tabla 5.- Tasas de cambio de volumen y ancho de playa para los perfiles de playa exclusivamente de la base de datos de la UABC (10) con intervalo de muestreo de 15 días.
- Tabla 6. Características de la oscilación anual del volumen de arena para los puntos de control del segmento norte de Rosarito.
- Tabla 7. Características de la oscilación de 36 meses del volumen de arena para los puntos de control del segmento norte de Rosarito.
- Tabla 8.- Caracterización del ciclo anual del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio norte con su respectivo intervalo de confianza al 95%.
- Tabla 9. Caracterización del ciclo de 36 meses del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio norte con su respectivo intervalo de confianza la 95%
- Tabla 10.- Pérdida de volumen promedio posterior al invierno de 1998. El valor negativo indica una ganancia de arena
- Tabla 11.- Caracterización del ciclo anual en el cambio de volumen de arena para los perfiles de playa del segmento intermedio sur.
- Tabla 12.- Caracterización del ciclo de 36 meses (3 años) del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio sur.
- Tabla 13.- Caracterización del ciclo anual del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio sur.
- Tabla 14.- Caracterización del ciclo alrededor de 36 meses del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento sur.

1.- INTRODUCCIÓN.

La pérdida de territorio costero y los asiduos problemas de erosión del litoral son una constante preocupación para la mayoría de los países ribereños (Clark, 1996). El 70% de la costas mundiales han retrocedido hacia el continente, mientras que menos del 10% han avanzado hacia el mar (Bird, 1987). Actualmente, la intensa y variada demanda de uso de la zona costera hace necesario ahondar en el conocimiento sobre el comportamiento de esta angosta franja litoral, y en particular las playas, de manera que se puedan maximizar beneficios y minimizar riesgos en su uso como recurso natural.

La playa es un depósito de sedimentos no consolidados de dimensiones variables compuesto por minerales y fragmentos de roca cuyo tamaño varía de 0.5 mm a 30 cm. Los límites de la playa son un tanto imprecisos y comprenden desde donde existe un cambio abrupto en la pendiente de la playa, como puede ser la transición de playa a dunas, de playa a cantil o incluso de la playa a una estructura costera paralela a la playa, hasta la parte un poco antes del rompimiento de las olas. Sin embargo, algunos autores consideran que para efectos de ingeniería, el límite marino de la playa está mejor definido en términos de la profundidad en la que deja de existir el movimiento activo del sedimento inducido por las olas. La longitud de la playa puede ser desde algunos metros, como son las playas de bolsillo, hasta decenas de kilómetros. En la figura 1 se señala la nomenclatura más común de un perfil de playa típico.

Existen innumerables estudios que explican como se forma y transforma una playa, sin embargo, la gran complejidad del ambiente costero ocasiona que la respuesta de un segmento determinado de playa a los procesos geológicos y físicos sea diferente de un lugar a otro. La acción individual o combinada de los factores que actúan sobre la playa, como son el embate de las olas, el suministro de arena, el esfuerzo del viento, la posición del nivel del mar y la intervención del

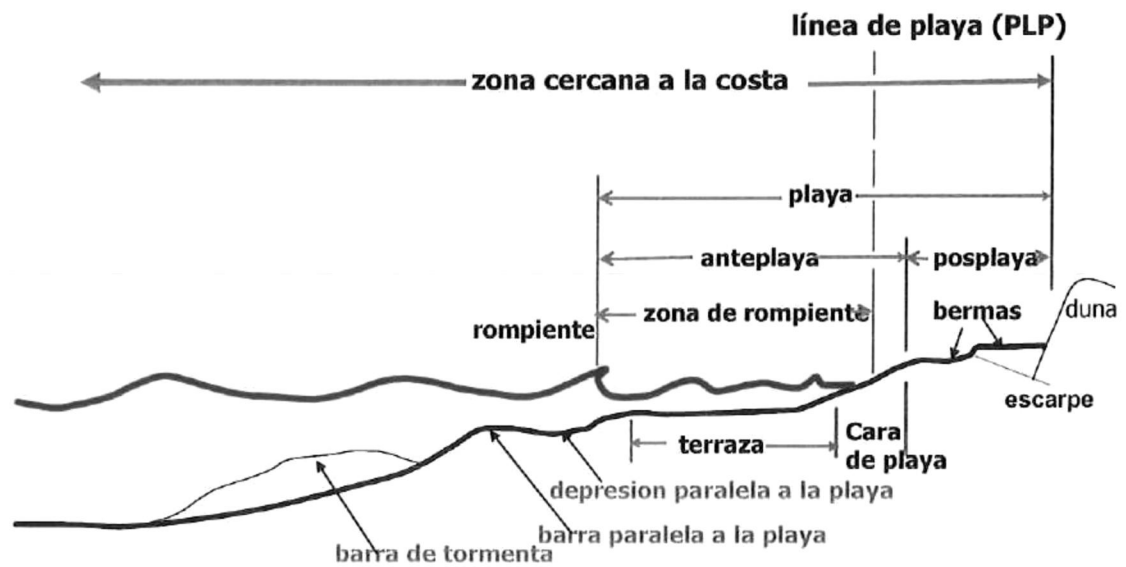


Figura 1. Nomenclatura y características principales de un perfil de playa. Se ilustran rasgos del perfil de verano e invierno

hombre, entre otros, pueden dar como resultado cambios periódicos o aperiódicos en un amplio rango de escalas espaciales y temporales.

Entender la naturaleza de estos cambios espaciales y temporales es de gran importancia para el desarrollo de infraestructura costera, ya que permitiría la identificación de zonas de relativa estabilidad que sean adecuadas para un uso determinado, definir zonas de mayor o menor riesgo, o el establecimiento de franjas de resguardo para evitar y/o disminuir la destrucción de infraestructura urbana o industrial de diversa índole.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el entendimiento de los cambios que se suceden en la playa es esencial para el diseño exitoso de estructuras costeras (rompeolas, espigones, revestimientos, gabiones, etc.), para predecir el efecto de las tormentas sobre la playa y predecir la evolución de la introducción de arena a la playa, así como los flujos de arena sobre la playa y/o estructuras.

Como rasgo morfológico, la playa tiene una doble función: a) brinda espacio para la recreación y esparcimiento de la sociedad en general y b) actúa como un amortiguador sobre el que las olas al romper disipan su energía. De aquí que, el reconocimiento de patrones de cambios de la playa es de particular interés para aquellas regiones en las que la playa es un recurso central para el desarrollo de la comunidad. Por ejemplo: en 1998 las playas de California, E.U.A., generaron ingresos directos por 14 mil millones de dólares. Cuando se consideran también los beneficios indirectos asociados, entonces esta suma se eleva hasta 73 mil millones de dólares, que ingresan a la economía nacional (<http://userwww.sfsu.edu>, 2000). Para el estado de Florida, el turismo que arribó a sus centros de playa durante 1995 generaron ingresos al estado por 15 mil millones de dólares (<http://www.pepps.fsu.edu/FSOC/> 1996).

En México se ha señalado que la actividad turística es de gran importancia para el desarrollo económico del país. En el 2002 el turismo que visitó el país generó alrededor de 8,858 millones de dólares; sin embargo, este monto se reduce a solo 2,200 millones de dólares si solamente se considera los ingresos generados por el turismo que atendió a los centros de playa (Secretaría de Turismo, 2002a). La diferencia en la generación de ingresos se hace más notoria cuando se considera que el estado de California sólo tiene alrededor de 1,600 kilómetros de costa mientras que la longitud de las costas México suman un poco más de 11,000 kilómetros. Bajo estas condiciones, se puede advertir que la explotación de las playas y las de sus actividades asociadas pueden ser mejoradas sustancialmente y así incrementar su contribución a la economía nacional.

Conocer el estado natural y la naturaleza de los cambios que comúnmente ocurren en las playas es fundamental para facilitar el manejo planificado de la playa y su explotación como un recurso con vocación recreativa por excelencia.

Entre los principales centros con reconocido potencial de desarrollo costero en México se encuentran, Cancún Quintana Roo, Acapulco Guerrero, Puerto Vallarta Jalisco, Los Cabos Baja California Sur y la franja costera entre Tijuana y Ensenada, en el noroeste de Baja California (Secretaría de Turismo, 2002b). Este último es de gran importancia debido a su rápida expansión de asentamientos humanos orientados a diversas actividades económicas.

En este corredor Tijuana-Ensenada, el municipio de Playas de Rosarito (en adelante Rosarito), se desarrollan algunas actividades asociadas a la industria energética (PEMEX y CFE), sin embargo, la industria del turismo que demanda el uso de las playas arenosas de este municipio juega un papel sobresaliente para el desarrollo económico y social del mismo, ya que cerca del 65% de la población económicamente activa está dedicada a este ramo (EURA, 1992).

A partir de los 1970, la rápida construcción y expansión de asentamientos urbano-residenciales, urbano-turísticos y urbano-industriales sobre los márgenes de los cantiles en la posplaya y en las partes bajas arenosas, han inducido cambios importantes en la geometría de la playa, que en combinación con eventos de tormenta extremos (p.e. El Niño 97-98) han ocasionado, inclusive, la desaparición de la playa, y en consecuencia, severos daños a la infraestructura adyacente (Mendoza-Ponce, 1999; Lizárraga-Arciniega et al, 1998). La construcción en 1936 de la presa Abelardo L. Rodríguez en la cuenca del río Tijuana, veinte kilómetros al norte de Rosarito, ha influido aparentemente de manera importante en los patrones de ingreso y redistribución de sedimentos al sistema litoral (USACE, 1991). De la misma manera, la construcción de un gran número de muros costeros, así como la construcción del rompeolas y del espigón de la obra de toma de agua para enfriamiento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) directamente sobre la playa, han modificado la localización e intensidad de los procesos erosivos/depositacionales en segmentos de playa adyacentes a estas estructuras. El entendimiento de la dinámica de los cambios

de playa y los factores que los inducen en la zona de Rosarito es prácticamente inexistente, porque no existe información de buena calidad ni de largo plazo.

Es importante señalar que cuando se estudian los cambios morfológicos de la playa es necesario considerar el amplio rango de escalas espaciales y temporales en los que ocurren. El levantamiento sistemático de perfiles de playa provee de una herramienta que permite analizar, identificar y explicar los patrones de cambio de playa en escalas cuya detectabilidad depende directamente del lapso de tiempo y distribución espacial del registro de perfiles. Los atributos morfológicos de la playa que pueden describir adecuadamente la evolución espacial y temporal de la playa son el volumen de arena, el ancho de playa y la altura del perfil (Aubrey, 1979; Eliot y Clarke, 1982; Massenlink y Pattiaratchi, 2001).

Las estimaciones en los cambios de playa a partir de perfiles de playa pueden depender de la frecuencia y cobertura espacial con que se registran. Mientras la longitud temporal del registro de cualquier variable no sea la adecuada, mayores serán las limitaciones para estimar cambios de playa; todavía más, algunos autores señalan que no es válida ninguna estimación que vaya más allá del periodo que comprendan las mediciones (Eliot y Clarke, 1989). En las playas de Rosarito, se ha logrado construir, en conocimiento del autor, la serie temporal más larga de perfiles de playa en México, aunque sólo comprende 6.6 años ininterrumpidos. Esta condición representa limitaciones para identificar cambios en escalas de largo plazo, en particular los cambios en la posición de la línea de playa, pero proporciona elementos para estimar patrones de corto plazo y explorar los cambios de mediano plazo en términos de estacionalidad anual e interanual.

De lo anterior se desprende que, si bien, la escala temporal o espacial a considerar depende del objetivo e interés de estudio, la identificación y caracterización de los patrones de cambio de la playa requiere de la ejecución de

programas permanentes de medición de variables morfológicas, oceanográficas, meteorológicas y de cualquier variable que module los cambios de playa. Este requerimiento es particularmente válido en aquellas comunidades donde las playas juegan un papel importante en el desarrollo económico y social. Por ello, en este trabajo se plantean los siguientes objetivos.

2.- OBJETIVOS.

Identificar los cambios de playa y los factores que los modulan caracterizando las escalas espacio-temporales representadas, así como estimar la contribución de cada componente en el comportamiento de la playa en Rosarito, Baja California.

2.1. - Objetivos específicos.

Identificar y cuantificar los cambios de corto plazo o episódicos, de mediano plazo o periódicos (anuales- interanuales) y de largo plazo.

Identificar patrones de cambio en los niveles energéticos del oleaje que pudieran estar asociados a los cambios de playa observados.

Estimar la interrelación de los cambios de corto plazo con los cambios de mediano plazo.

2.2.- Hipótesis de trabajo.

Los cambios de playa de corto, mediano y largo plazo están controlados principalmente por los patrones de transporte de arena inducidos por las olas.

Los cambios episódicos ocasionan los mayores y más rápidos cambios en la morfología de la playa.

Los cambios de corto plazo contribuyen modificando la temporalidad de los cambios de mediano plazo.

3.- ANTECEDENTES.

El estudio de los cambios morfológicos de una playa se aproxima comúnmente de dos maneras. Por un lado, cuantificando los cambios en la forma y geometría de la playa y por otro lado, cuantificando las variaciones que ocurren en la posición de la línea de playa. En el primer caso, se cuantifican los cambios horizontales y verticales en los rasgos morfológicos –erosionales y/o depositacionales- de la playa como son las bermas, barras y depresiones paralelas, pendiente de playa, etc. En el segundo caso, sólo se consideran los desplazamientos horizontales, en sentido perpendicular a la costa, de la intersección entre el mar y el continente; esta intersección se conoce como línea de playa.

Una de las formas más precisas para observar los cambios horizontales y verticales es mediante el registro sistemático de perfiles de playa. Son pocas las localidades alrededor del mundo que cuentan con este tipo de registros por lapsos largos de tiempo. Por ello, los mapas cartográficos y fotografías aéreas son la herramienta más utilizada para detectar los cambios de la línea de playa a largo plazo (Anders y Byrnes, 1991). La relativa facilidad para medir perfiles de playa con periodicidad semanal, mensual, bimensual, etc., los ha convertido en la herramienta más utilizada para el estudio de los cambios a corto plazo y, cuando los registros son de larga duración (decadales o mayores), permiten elaborar estimaciones de los cambios con mayor certidumbre (Eliot y Clarke, 1989). En este trabajo se hará uso de estas herramientas.

Uno de los patrones de cambio en perfiles de playa más documentados es el cambio estacional (Sheppard, 1950 a, b; Nordstrom e Inman, 1975; Winant et al., 1975; Abele, 1977; Aubrey, 1979 entre otros). Este patrón fue identificado desde 1950 por Sheppard (1950a) mediante la medición repetida de perfiles de playa en los que observó que el nivel de arena de la playa es más alto en verano que en invierno. Este estudio dio origen al hoy ampliamente reconocido modelo

de perfil de playa estacional: invierno versus verano. En el perfil de invierno o de tormenta (nominación debida a que en invierno son frecuentes las olas altas generadas por tormentas), la playa es angosta con baja pendiente y la presencia de una o varias barras y depresiones paralelas a la costa. En el perfil de verano o de "swell" (estación caracterizada por oleaje de baja altura), la playa es más ancha con mayor pendiente en la cara de la playa y la presencia de una o varias bermas (Komar, 1998). Debido a que el perfil de invierno generalmente presenta una o más barras paralelas a la playa y el perfil de verano siempre presenta una o más bermas, se ha sugerido también que al primero se le denomine como perfil con barra y al segundo perfil con berma (Komar, 1998).

El incremento en la longitud temporal de los registros de perfiles y características de la playa, han permitido la aplicación de otras técnicas de análisis para detectar y verificar otras periodicidades diferentes a las estacionales o del ciclo anual (Larson y Kraus, 1994; Bittencourt et al, 1997). Aubrey (1979) utilizó el análisis de componente principal y técnicas espectrales en una serie mensual de cinco años de perfiles de playa y obtuvo que la primera componente principal corresponde al transporte perpendicular de arena y por consiguiente al cambio cíclico anual de perfil de barra a perfil con berma. Eliot y Clarke (1982) analizaron una serie quincenal de cinco años del volumen de arena contenido en la playa y señalan que a pesar de que se observa el cambio de perfil de barra a perfil con berma, la periodicidad de este cambio no es únicamente anual sino también bienal, por lo que concluyen que estos cambios responden a procesos que predominan en las bajas frecuencias, como es la fluctuación del transporte litoral paralelo a la playa.

Lacey y Peck (1998) efectuaron levantamientos de perfiles de playa por 33 años en ocho localidades a lo largo de la playa generando así la serie temporal mas larga reportada del volumen de arena contenido en la playa con respecto al nivel medio de marea baja. Empleando la técnica de análisis espectral obtuvieron picos espectrales con periodos de 0.6, 1, 1.5, 3, 5 y hasta de 15 años. Los autores

señalan que los periodos menores de 1 año que se observan en todas las localidades son atribuibles al transporte de arena en dirección perpendicular a la playa (en ambas direcciones) asociado con las variaciones estacionales en la frecuencia e intensidad de tormentas. Los ciclos de playa entre 1.5 y 5 años que observaron en solo cuatro perfiles de playa están asociados a fluctuaciones en el transporte de arena paralelo a la playa como lo señala también Clarke y Eliot (1988). Los periodos entre 9 y 15 años sólo ocurrieron en tres de ocho perfiles y en sólo uno de ellos, se observa la ocurrencia de un ciclo de diez años encontrado previamente por Boothroyd et al., (1986); los autores asociaron estos ciclos a fluctuaciones en el suministro de sedimentos, al nivel del mar y al clima de viento y oleaje.

Short et al., (2000) encontraron varias clases de oscilaciones espaciales y temporales en los perfiles de playa en una playa de bolsillo. Con 23 años de mediciones del volumen de arena en la playa, derivado de los perfiles de playa, observaron ciclos interanuales, de 2 a 3 años y de 4 a 6 años. Los autores concluyeron que ocurren cambios de playa rápidos y sustanciales asociados a los cambios en las condiciones de las olas que arriban. Adicionalmente, observaron un proceso de rotación de la playa, esto es, mientras que los perfiles de la playa en un extremo de la playa muestran erosión, en el otro extremo predomina la acreción y viceversa. Este cambio rotacional está asociado a los cambios en la potencia de la olas a lo largo de la playa y estos a su vez, a la ocurrencia de cambios climáticos de gran escala como la Oscilación del Sur (SOI + = El Niño; SOI - = La Niña).

Eliot y Clarke (1989) apuntan que para estimar la respuesta de la playa a procesos de corto, mediano y largo plazo no sólo es importante la longitud temporal de la serie, sino también, el procedimiento de análisis. Los autores analizaron 20 años de datos mensuales del volumen de arena y del ancho de playa en grupos de cinco y diez años utilizando la técnica de cuadrados mínimos. Como resultado del análisis concluyeron que los patrones de cambio basados en

los registros de bloques de cinco años, estaban sustancialmente afectados por las fluctuaciones de corto plazo mientras que con bloques de datos con longitud de 10 años, los efectos de los cambios de corto plazo se suprimieron; aun así, la confiabilidad de estos patrones como predictores del cambio futuro es cuestionable.

Por otra parte, también es necesario remover los efectos de procesos atmosféricos y oceanográficos como son las anomalías climáticas ENSO, con periodos de 2 a 6 años (Philander, 1983; Seymour, et al, 1984; Dessler y Wallace, 1987) para reconocer con claridad los patrones de cambio seculares o de largo plazo. Es evidente que ello requiere de la construcción de series de los atributos de playa de muy larga duración.

Como se puede desprender de los párrafos anteriores, las olas y sus patrones de cambios son un factor de principal importancia. De hecho, se ha reconocido que el oleaje es el factor que contribuye con la mayor cantidad de energía modificadora al sistema de playa (USACERC, 1984). Siendo así, es esencial identificar las relaciones entre este forzante, como son la altura, el periodo y la dirección con que arriban a la playa, y los procesos que induce, como son las corrientes litorales, el transporte de arena en dirección paralela y en dirección perpendicular a la playa y la sobre-elevación del mar (set up) con los patrones de cambio de la playa.

El cambio estacional en la geometría del perfil de playa muestra el ciclo estacional de corte-relleno (erosión/depositación) y representa el transporte de arena en sentido perpendicular a la playa y el intercambio de arena desde la berma hacia la barra paralela a la playa y viceversa. Este cambio en la geometría del perfil se presenta en escalas temporales del orden de días e inclusive algunas horas, particularmente bajo la influencia de tormentas. El mecanismo de transferencia de arena perpendicular a la playa en uno u otro sentido, está determinado por la pendiente de la ola $S_0 (= H_0/L_0)$ donde H_0 es la altura y L_0 es la

longitud de la ola) en aguas profundas (Bascom, 1964). Trabajos posteriores a 1964 demostraron que además de la pendiente de la ola también el tamaño de grano juega un papel importante en el transporte de arena perpendicular a la playa (Dean 1973; Larson y Kraus, 1989).

Dean (1973) presentó un modelo en el que el tamaño de grano y el periodo de la ola ($L_o = (g/2\pi)T^2$) determinan la formación o no de la barra paralela a la playa. Este modelo considera la velocidad de asentamiento de la partícula estando sujeta a la acción de las velocidades orbitales de la ola. Si la velocidad de asentamiento de las partículas es menor que el periodo de la ola, entonces las partículas estarán sujetas principalmente a las velocidades orbitales bajo la cresta de la ola, esto es, en dirección hacia la playa. Por el contrario, si la velocidad de asentamiento de las partículas es mayor que el periodo de la ola, entonces, las partículas estarán sujetas a las velocidades orbitales bajo el valle de la ola y por tanto en dirección hacia el mar. El índice o criterio discriminante es la relación H_s/W_sT , donde H_s es la altura de la ola, W_s es la velocidad de asentamiento de la partícula de sedimento y T es el periodo de la ola, esta relación se conoce comúnmente como el número de Dean (N_D) y discrimina adecuadamente entre un tipo de perfil de invierno y uno de verano.

La reducción del volumen y/o ancho de playa está influida adicionalmente por la sobre-elevación del mar inducido por diversos factores como el viento, la marea y las olas. La marea es evidente para cualquier observador, pero la sobre-elevación producida por las olas, es singularmente importante y observable cuando arriban olas de tormenta. La sobre-elevación del mar inducido por las olas está gobernado por la altura de las olas y la pendiente de la playa en la zona de rompiente. Mediante aproximaciones empíricas, se ha derivado una relación para calcular la sobre-elevación del nivel del mar con respecto al nivel medio de referencia, $\bar{\eta}_s = 0.15d_b$, en la que $\bar{\eta}_s$ es la sobre-elevación del mar con respecto al nivel medio en la intersección de ésta con la playa y d_b es la profundidad en la que rompe la ola (USACE, 2002). El mecanismo de influencia está relacionado

con la altura de la ola, mientras mayor es ésta, mayor será la sobre-elevación del nivel del mar y por tanto, la ola rompiente tendrá un mayor alcance o incursión en dirección hacia tierra. Como consecuencia, las olas tendrán capacidad de remover arena desde la parte interior de la posplaya y actuar directamente sobre la base de cantiles o incluso estructuras de protección costera.

Para el caso particular de las playas en Rosarito, la caracterización de los cambios de playa ha sido escasa en tiempo y espacio. Marmolejo-Lara (1985) llevó a cabo el registro de perfiles de playa, mediciones de oleaje y corrientes litorales durante 18 meses en las playas colindantes al rompeolas de la CFE. Él concluye que la playa muestra el patrón de cambio estacional –deposición en verano y erosión en invierno- con variaciones en la vertical de entre 1 y 2 metros. Conforme a Marmolejo-Lara (1985), la dirección de proveniencia del oleaje medido visualmente frente al rompeolas de la CFE, es principalmente del W, WSW y SW para el periodo de octubre de 1980 a mayo de 1982, lo cual es contrapuesto a la dirección de proveniencia predominante NW presentados por MacDonel y Torres-Coto (1962) para la misma región. Los patrones de corrientes litorales muestran una gran variabilidad en cuanto a dirección ya que son afectadas por la presencia del rompeolas y espigones en el área.

De los datos de perfil de playa disponibles en el trabajo de Marmolejo-Lara (1985) se puede observar que las variaciones verticales de la playa son del orden de 1 a 2 m y siguen un patrón estacional (verano-invierno), sin embargo, no hay un patrón definido en cuanto a la predominancia de los rasgos morfológicos (barras y/o bermas) característicos del tipo de perfil de cada estación del año. En contraste, mediante la comparación de perfiles medidos a lo largo de 21 meses (1997-1998), Mendoza-Ponce (1999) reportan variaciones en la altura del perfil de playa hasta de 4 m en el lapso de algunos días, además, identificaron el ciclo estacional típico de erosión-deposición (invierno y verano respectivamente). Estas diferencias las asoció a los patrones generales del oleaje que arribaron a la zona durante el invierno de 1998 (Niño). Es interesante notar que el arribo de

intensas tormentas durante el invierno 1982-1983 asociadas a El Niño (Seymour, 1996; 1998) y su efecto sobre la playa de Rosarito no fue registrado por Marmolejo-Lara (1985). Con estos contrastes, es evidente que los cambios estacionales y la influencia de los factores como el oleaje y el transporte de arena que induce requieren de una mejor caracterización en términos de la ocurrencia en el corto plazo (menor al año) y de su ocurrencia en el mediano plazo (interanuales).

Habiendo señalado la limitada longitud de la serie temporal de perfiles en Rosarito y la restringida asociación con los datos de oleaje de los estudios realizados, se hace evidente que la caracterización de los cambios de playa en el mediano plazo es prácticamente desconocida. El transporte litoral de arena como forzante potencial de cambios morfológicos no ha sido considerado. Appendini et al., (1997) utilizó un modelo numérico (GENESIS, GENERalized Model for Simulating Shoreline Change) para evaluar el potencial de azolve en la toma de agua de la CFE, encontrando que el transporte litoral neto es de 130,000 m³/año en dirección sur lo cual concuerda con el estimado por Marmolejo-Lara (1985). Sin embargo, persiste la incertidumbre en la dirección de proveniencia de las olas utilizadas en la estimación de dicho transporte. Appnedini et al., concluyen además que si bien el azolve en las instalaciones de la CFE se presenta a lo largo de todo el año, este es mayor durante los meses de noviembre a abril y menor de mayo a octubre. Es importante señalar que los resultados obtenidos con el modelo GENESIS, deben considerarse con cautela ya que para realizar la validación de los mismos es necesario tener mayor información sobre la evolución espacio-temporal de la playa y de las características del oleaje que arriba a esta zona, información que no existía en ese entonces y que es precisamente unos de los objetivos de este trabajo, el generar una base de datos de alta calidad que describa la evolución espacio-temporal del perfil de playa en Rosarito.

Con el objetivo de preservar la playa como recurso natural, Appendini (1998), propone un plan de manejo de la erosión costera en Rosarito con base en

una primera estimación de los cambios de playa a corto y largo plazo. En el primer caso, observó una intensa erosión de la playa en los meses de enero y febrero de 1998, con un retroceso máximo de la cresta de la berma de hasta 72 m. En el segundo caso, con fotografías aéreas correspondientes a los años 1972 y 1993, estimó que en el segmento de playa adyacente hacia el sur de la toma de agua de la CFE, la tasa promedio de retroceso de la línea de playa es de 1.5 m/año. A mayores distancias hacia el sur del rompeolas de la CFE, partiendo de los 2,500 m, la posición de la playa avanza hacia el mar con una tasa promedio de 0.6 m/año. Los cambios en la Posición de la Línea de Playa (PLP) fueron obtenidos mediante la técnica de punto final, que consiste en dividir la distancia del movimiento total de la PLP entre el tiempo transcurrido entre las mediciones; sin embargo, existe incertidumbre sobre el comportamiento de la PLP en las cercanías del rompeolas y en el segmento de playa al norte del mismo rompeolas. Por otra parte, algunos autores señalan que mientras mayor sea el número de fotografías que se comparen y mayor el periodo de comparación, la estimación de la tasa de cambio de la PLP será mas confiable (Dolan et al., 1991). Esta aproximación será retomada en este trabajo con lo cual se pretende llevar a cabo el uso de dos fotografías aéreas y una imagen de satélite, que cubren un periodo de 30 años, para calcular los cambios en la PLP en las playas de Rosarito.

Se puede resumir en general, que los perfiles de playa proveen una herramienta adecuada para el estudio de los cambios de playa. La construcción de series temporales de las características de la playa (altura, volumen de arena contenido, ancho de playa, pendiente, etc.) con longitud cada vez mayor, han permitido definir ciclos de cambio en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Estos ciclos se han explicado como una consecuencia a la acción, también cíclica, de las olas y los procesos que inducen en la zona cercana a la playa en escalas de días a años. En la playa de Rosarito, la construcción limitada en tiempo y espacio de series de perfiles de playa y sus características no han permitido la caracterización de los patrones de cambio en el mediano plazo. De la

misma manera, la tasa de cambio en la PLP no se ha estimado para la longitud total de la playa bajo estudio. En este trabajo, se pretende caracterizar los patrones de cambio en el corto, mediano y largo plazo de las playas de Rosarito a partir de la serie de perfiles de playa más larga, en conocimiento del autor, construida para playas de Rosarito, pero también para cualquier playa mexicana, mediante el uso de un juego de fotografías aéreas y una imagen digital que cubren un lapso de tiempo de 30 años entre ellas.

4.- ÁREA DE ESTUDIO.

Playas de Rosarito (Rosarito) se localiza en la costa NW de Baja California entre los 32° 20' y 32° 23'N y los 117° 03'y 117° 05' W, aproximadamente a 15 km de la ciudad de Tijuana, frontera con Estados Unidos. Rosarito es una zona de importancia económica por la intensa actividad turística y por la presencia de los centros de distribución de energéticos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Petróleos Mexicano (PEMEX). El área de estudio comprende 10.7 km de playas arenosas desde San Antonio del Mar hasta el Hotel Rosarito Shores, un poco al norte de la punta rocosa Punta La Paloma (figura 2). Este litoral forma parte de la celda de circulación que comprende prácticamente desde la frontera México-Estados Unidos hasta Punta Descanso ubicada al sur de Rosarito. Esta celda litoral solo se señala de manera enunciativa ya que no se dispone de información para caracterizar los procesos que en ella ocurren, por lo que tampoco se pueden establecer los límites geográficos de dicha celda. Las características generales de la zona costera de Rosarito se describen a continuación en los apartados de geología-geomorfología, oceanografía y clima.

4.1.- Geología-geomorfología.

La región noroeste de Baja California, presenta características geológicas asociadas a una importante actividad tectónica (Legg et al., 1991). El levantamiento de la parte continental provocada por la subducción de la placa Farallón hace aproximadamente 20 millones de años dio lugar a una costa montañosa, relativamente recta y a la presencia de cantiles, terrazas elevadas y plataformas continentales estrechas y de compleja topografía submarina (Flick y Sterret, 1994; Inman y Nordstrom, 1971). A lo largo de la zona entre Tijuana y Rosarito predominan los afloramientos de la formación Rosario que está compuesta por areniscas, arcillas y derrames de lava del Mioceno (~16 ma); los

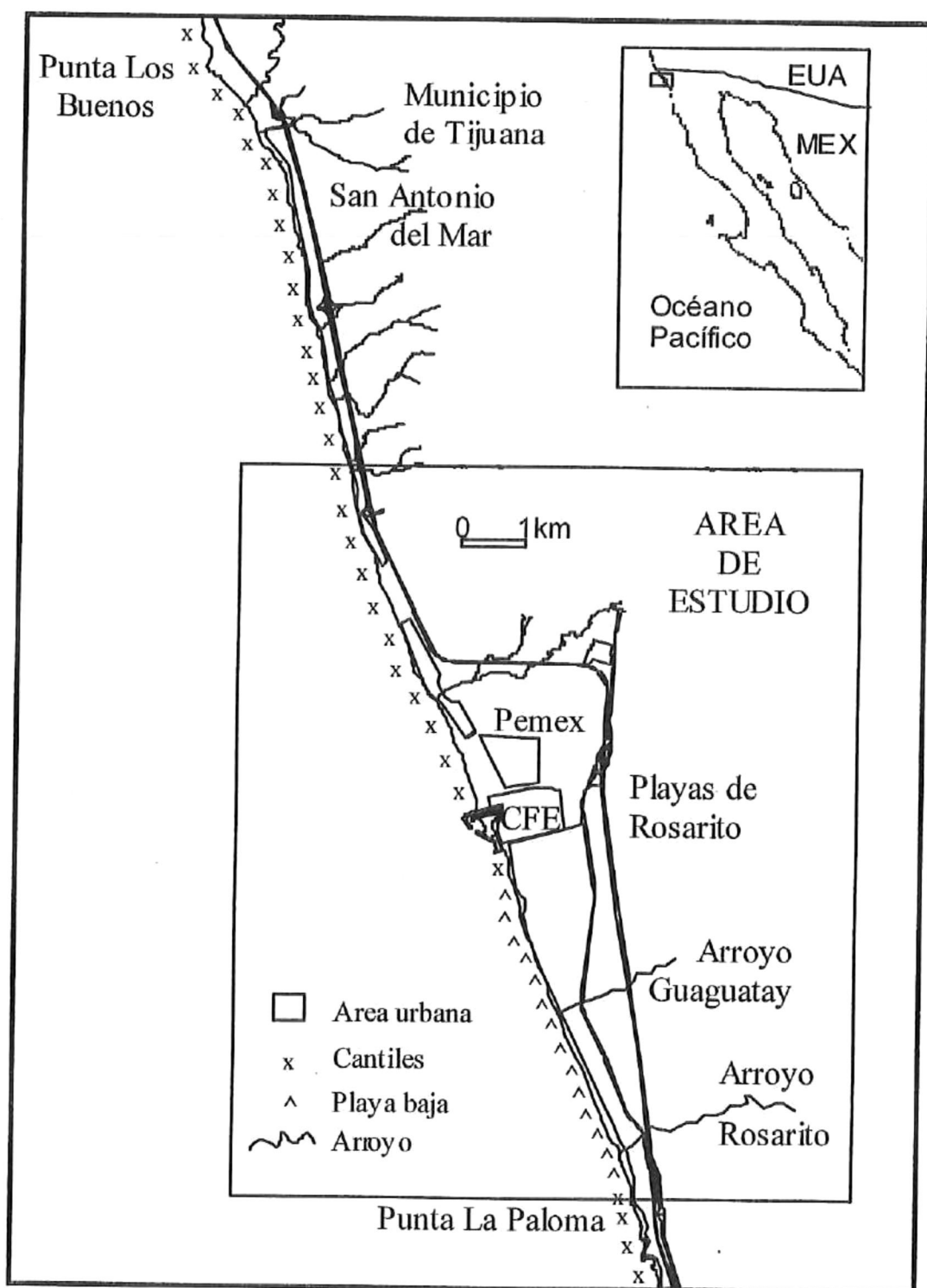


Figura 2. Área de estudio y características morfológicas generales en Playas de Rosarito.

derrames de lava están intercalados y/o sobreyacen a rocas sedimentarias de origen marino (Minch, 1967). En los arroyos del área de Rosarito aflora la formación San Diego compuesta por conglomerados, areniscas y limonitas del Plio-Pleistoceno (~3 ma) (Minch, 1967, 1970).

En la litología costera de Rosarito y áreas adyacentes, se observa que predominan las rocas ígneas y sedimentarias (figura 3). De particular interés resulta el hecho que el depósito denominado *Suelo litoral Q* en la figura 3, sobre el que se asienta la mayor parte de la zona urbana de Rosarito, muestra un importante estrechamiento de este depósito areno-arcilloso hacia el norte y que es afectado por la presencia de la forma basáltica (Ts) al norte del suelo litoral (Q). El paisaje costero está constituido por rasgos morfológicos de baja altura como valles, lomeríos y mesetas (Gómez-Morin et al., 1993).

Otro rasgo importante en esta región son las Islas Coronado, un conjunto de tres islas que se encuentran a 14 km al oeste de la costa de Rosarito. Los tamaños de las islas disminuyen desde la más al sur hasta la más al norte. Los ejes longitudinales son de 3.3 km, 1.8 km y menor de 1 km respectivamente; las dos primeras, presentan una orientación azimutal de 342 grados. El fondo marino entre las islas y el bloque continental de Baja California presenta una pendiente relativamente baja (~1:200) ya que muestra un arreglo de isobatas - particularmente la de 20 brazas- que se asemeja a una forma depositacional conocida como tómbolo y que se puede observar en la figura 4. Por contraste, la pendiente del fondo marino frente a Punta Loma (San Diego) y Punta El Descanso es más abrupta (~1:40) dando lugar a que las profundidades mayores estén más cercanas a la costa. La combinación de estos rasgos morfológicos proporciona una importante protección del oleaje de mar profundo que proviene del oeste-noroeste y que más tarde llega a la costa de Rosarito.

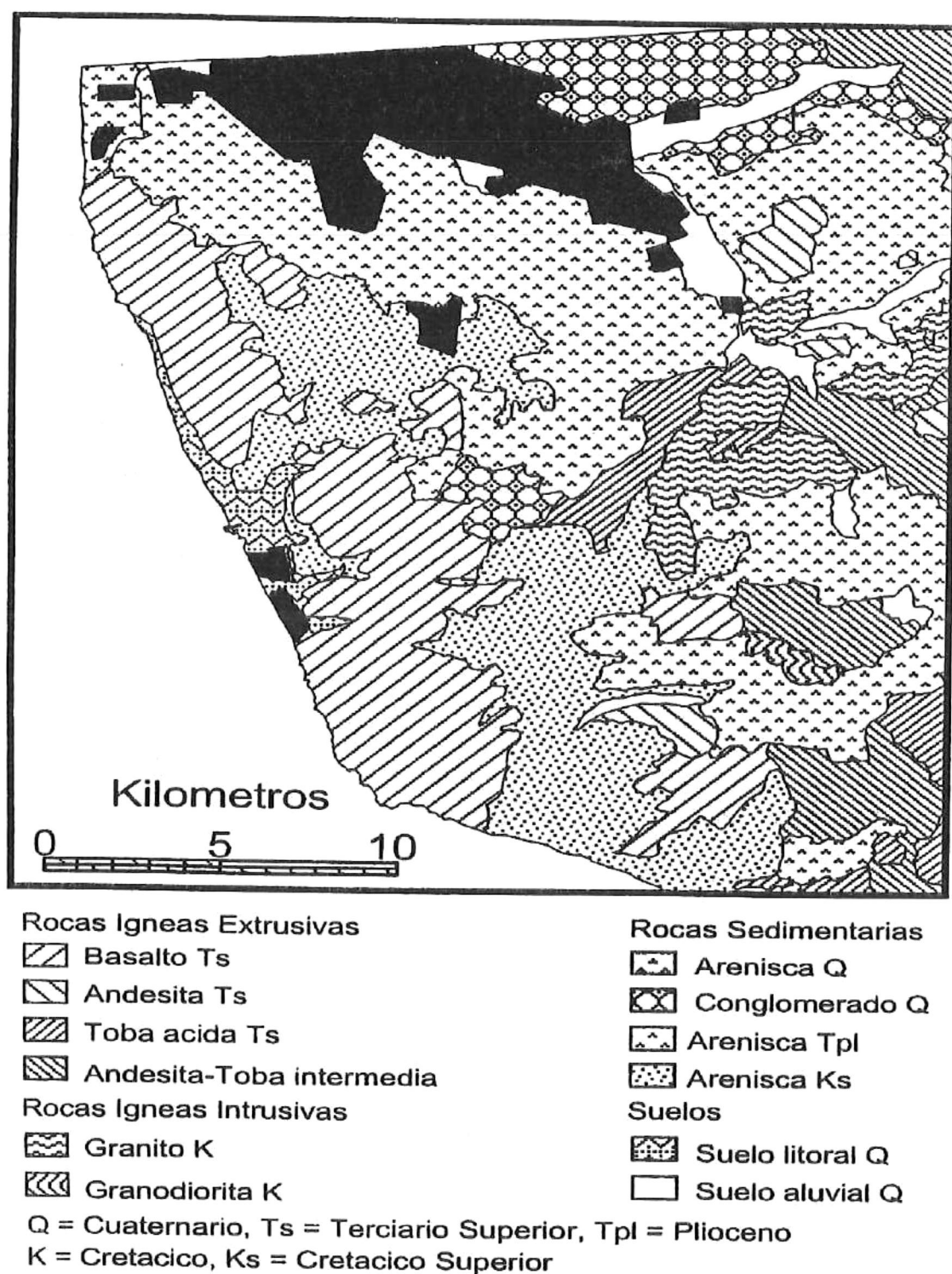


Figura 3. Litología del NW de Baja California en la que se observa la reducción gradual hacia el norte del depósito de suelo litoral Q.

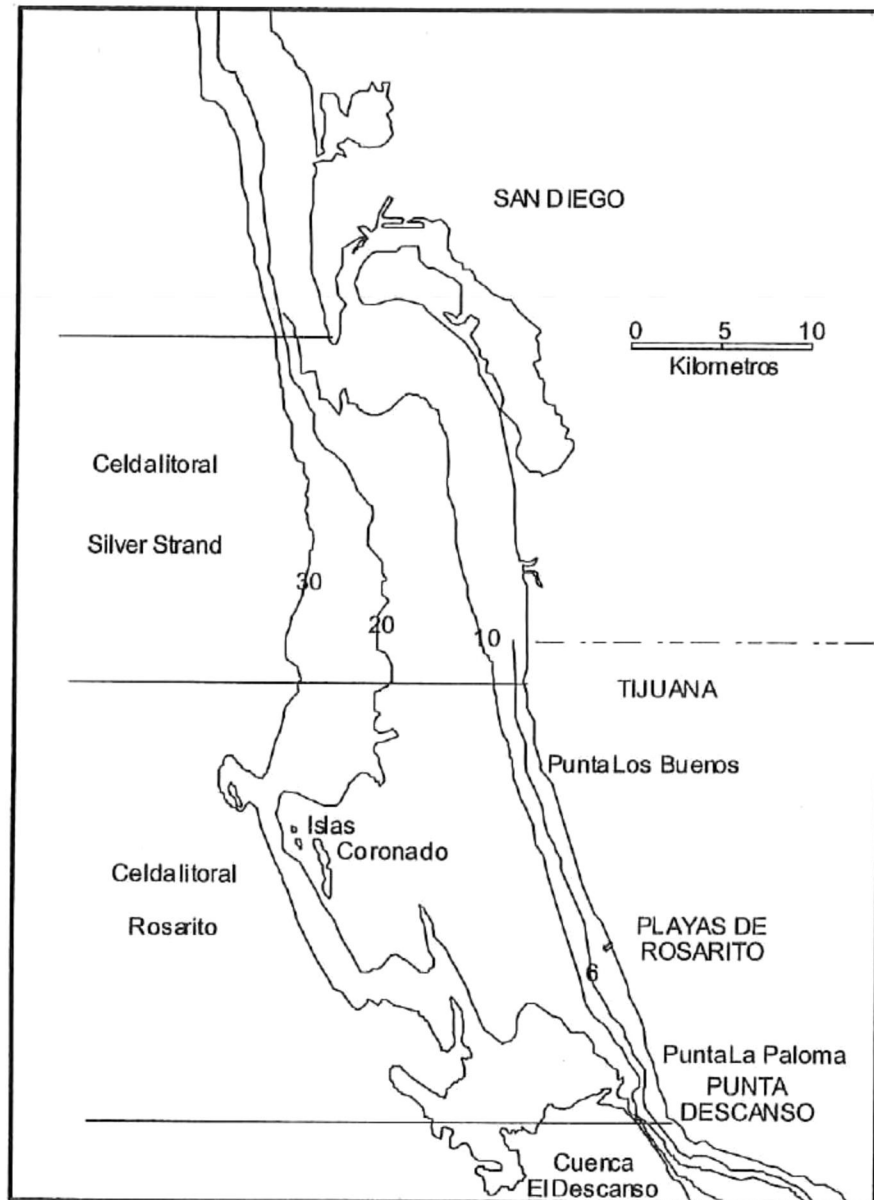


Figura 4. Topografía submarina con profundidades en brazas y posibles celdas litorales en la región de estudio.

El rasgo más notable a lo largo de este segmento de litoral lo constituye el sistema de estructuras costeras frente a la CFE. Está compuesto por una escollera en forma de J y un par de espigones construidos en los 60's por la CFE para abastecerse de agua y operar sus sistemas de enfriamiento. En la figura 2 se señala también como las playas hacia el norte de las estructuras presentan características diferentes a las que se presentan hacia el sur de las mismas. En

las playas hacia el norte de las estructuras, hasta San Antonio del Mar, predominan los cantiles con alturas entre 2 y 10 m así como la presencia de muros que protegen el pie del cantil; las playas frente a los muros son angostas debido a la estrechez del depósito como se señaló anteriormente. En estas playas es común observar depósitos de canto rodado y plataformas rocosas que subyacen la playa y quedan expuestas cuando la erosión de la playa es intensa.

En las playas hacia el sur, desde las estructuras de la CFE hasta el arroyo Rosarito, los cantiles se desvanecen y comienza la playa baja en la que es común observar la existencia de construcciones residenciales y/o turísticas sobre la playa misma. Conforme se incrementa la distancia desde las estructuras hacia el sur, la playa tiende a ser más ancha (~180 m) hasta unos doscientos metros al norte del arroyo Rosarito para luego reducirse en Punta La Paloma.

4.2.- Oceanografía.

Las olas contribuyen con la mayor cantidad de energía que modifica la costa. Son el principal agente de transporte de arena en sentido paralelo y perpendicular a la playa. Los patrones de ocurrencia de las olas son, por tanto, determinantes en el comportamiento de las playas. La climatología del oleaje en mar abierto que ocurre frente a la costa de Rosarito es, en general, parecido al que se registra en mar profundo frente a la costa del sur de California como lo ilustra Appendini (1998) conforme a Moffat y Nichol (1989); sin embargo, conviene señalar que la climatología del oleaje cercano a la costa frente a Rosarito puede presentar variaciones significativas (Marichal-González, 2001) debido a la presencia de las Islas Coronado y a la compleja batimetría en la región costera.

Moffat y Nichol (1989) señalan que el oleaje distante (swell) se puede originar tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur; el primero predomina durante los meses de octubre a marzo, y es producido por tormentas extratropicales en la región del noreste del Pacífico y norte de Hawaii. El oleaje

distante producido en el Pacífico sur predomina en los meses de abril a junio, al igual que el generado por huracanes en la costa W de México. El oleaje local (sea) está presente todo el año y es producido por los vientos y brisas que generan los gradientes de presión diurnos-nocturnos. Debe apuntarse que al acercarse a la costa, la altura y dirección de avance de la ola se puede modificar sustancialmente dependiendo de la topografía del fondo y la presencia de islas u otros rasgos topográficos.

Una primera comparación del oleaje medido en mar profundo por el Coastal Data Information Program (CDIP; Seymour et al, 1985) frente a Punta Concepción, California, con el medido cerca de la costa en Rosarito, muestra una importante diferencia en sus características. La reducción de la altura de ola y el cambio en la dirección de viaje de las olas indican que la atenuación de energía desde la región de mar abierto a la zona cercana a la costa es relativamente constante (aproximadamente 30%). Estas transformaciones están no sólo asociadas a las características propias de las olas como son la altura, periodo y dirección de viaje, sino también a la complejidad topográfica del fondo marino y a la presencia de las Islas Coronado (Martínez-Díaz de León, et al, 2002). Los factores locales como son la ubicación de la localidad somera con respecto a las Islas Coronado y el tipo de playa (p.e. playa de bolsillo) también influyen en la magnitud de la transformación de las olas al acercarse a la costa. Para las playas de Rosarito, se desconoce la variabilidad del oleaje a lo largo de la costa ya que, desafortunadamente, sólo existen mediciones de oleaje frente a las estructuras costeras de la CFE, las cuales se analizan más adelante.

El nivel del mar tiene una importante influencia sobre los procesos litorales. Las mareas junto con otras variaciones en el nivel del mar, determinan la altura y distancia de incursión de las olas rompientes y por tanto, la remoción/acreción de arena en la parte posterior de la playa, comúnmente caracterizada por dunas, estructuras costeras o infraestructura urbana. El nivel del mar en Rosarito está asociado a las mareas, a la sobre-elevación inducido por las olas y a procesos

geológicos de largo alcance como son las deglaciaciones y/o desplazamiento verticales de la corteza terrestre (Moffat y Nichol, 1989). La marea como producto de la interacción entre las fuerzas de atracción gravitacional entre la luna, sol y Tierra presenta en la región de estudio las desigualdades diurnas (dos bajas y dos altas diarias); quincenales (vivas y muertas); anuales (2 ciclos, verano e invierno) y otros que ocurren sobre el régimen mixto de marea típico (Flick y Cayan, 1985; Zetler y Flick, 1985).

Las mareas de tormenta se refieren a la sobre-elevación del nivel del mar como resultado de la baja presión atmosférica y los vientos asociados a la tormenta. Flick y Badan-Dangon (1989) estiman que estas sobrelevaciones raramente exceden los 30 cm de amplitud. Adicionalmente, la disipación de energía de las olas al romper produce una acumulación de agua sobre la costa con la consecuente elevación del mar. Bajo condiciones combinadas de marea alta, viento intenso soplando de mar a tierra y oleaje de tormenta, la sobre-elevación del mar puede ser hasta 2.5-3 m sobre la cara de la playa.

En el tiempo geológico se han estimado cambios en la elevación relativa del nivel del mar. En los periodos de glaciaciones, el nivel del mar desciende, mientras que durante la deglaciaciones, el nivel del mar aumenta. Otras variaciones del nivel del mar están asociadas a movimientos geológicos de hundimiento o levantamiento de bloques marinos/continentales que también producen cambios en la posición de la línea de costa (Flick y Sterrett, 1994). Se ha estimado que para la región del Sur de California, el aumento relativo del nivel del mar ha presentado variaciones de hasta 140 m en ciclos de 100,000 años y superpuestos a estos cambios, se han estimado variaciones de 45 m en los últimos 20,000 y 40,000 años (Flick and Sterrett, 1994). Parece ser que los efectos de invernadero y calentamiento global han acelerado la tasa de cambio del nivel del mar. Moffat y Nichol (1989) señalan que el aumento relativo del nivel del mar para la zona de San Diego, California, es entre 0.19 y 0.21 cm/año.

4.3.- Clima

El clima en el NW de Baja California es semi-árido y con lluvias marcadamente estacionales a los que se sobreponen los ciclos de años húmedos y secos con periodicidad de ~11 años (Pou-Alberú y Pozos-Salazar, 1992). En general, el clima está influenciado por la posición y desplazamiento de los centros de baja presión de las Aleutianas y el de alta presión sobre el Pacífico Norte. Un mayor número de tormentas invernales ocurre sobre la región del sur de California y parte NW de Baja California cuando el sistema de alta presión del Pacífico se mueve más hacia el sur y al oeste de su posición habitual, como es el caso de ocurrencia del fenómeno de El Niño (Storlazzi y Griggs, 2000).

En Rosarito, la precipitación promedio anual es de 273 mm aunque la media invernal es de 240 mm (Reyes-Coca y Troncoso-Gaytán, 2004). El paso de tormentas invernales descarga grandes cantidades de lluvia en lapsos de tiempo corto. El Río Tijuana, localizado al norte de Rosarito, se considera como uno de los principales contribuyentes de arena al sistema litoral (Pou-Alberú y Pozos-Salazar, 1992) aunque la presa Abelardo L. Rodríguez, construída en los años 30, reduce potencialmente dicha contribución. Los arroyos de mayor importancia relativa que se encuentran en la costa de Rosarito son el Rosarito y el Guaguatay. La desembocadura de estos arroyos se encuentra a aproximadamente 4.5 km y 3 km respectivamente al sur de las estructuras costeras de la CFE. El riesgo de desborde de estos arroyos se acentúa cuando ocurren precipitaciones extremas, como la del invierno de 1998 en la que el arroyo Guaguatay ocasionó severas inundaciones en varios sectores urbanos.

5.- METODOLOGÍA

Para analizar los cambios de playa en el corto, mediano y largo plazo, la información de partida consiste de registros de olas, perfiles de playa, fotografías aéreas y una imagen satelital. La obtención y tratamiento de ella se describe a continuación.

5.1 Base de datos

5.1.1 Oleaje

La climatología del oleaje en las costas mexicanas está poco estudiada. La CFE es la organización que ha obtenido los registros de mayor duración y en varias localidades en la costa del Pacífico (Oropeza-Rosales, 1998). En la zona de Rosarito, Baja California, el grupo de Oceanografía de la CFE operó un programa de registro cuyos datos fueron facilitados para este trabajo. Las mediciones de oleaje se efectuaron con un instrumento autónomo del tipo sensor de presión, marca Sea Data modelo 635-12, cuyo sensor mide las diferencias de presión inducidas por las olas con una resolución de 0.1 cm. Para resolver la dirección de propagación de las olas, el instrumento cuenta con un correntímetro que mide la velocidad promedio de la corriente inducida por las olas con una resolución de 0.2 cm/s en un rango de ± 3 m/s. La orientación del instrumento respecto al norte magnético es conocida con un compás digital con resolución de 1.4 grados.

El instrumento se instaló sobre la isobata de los 10 metros y se programó para que el intervalo de muestreo fuera de 1 s con ráfagas de 1024 datos, por lo que la duración de la ráfaga es de 17.06 minutos, y un intervalo entre ráfagas de 3 horas. Dado que los datos ya procesados fueron facilitados por el grupo de Oceanografía de la CFE, en la figura 5 sólo se esquematiza un diagrama de flujo del tratamiento que se le dieron a los mismos. En Oropeza-Rosales (1998) se

pueden encontrar mayores detalles sobre el procesamiento y análisis de los datos de oleaje generados por la CFE.

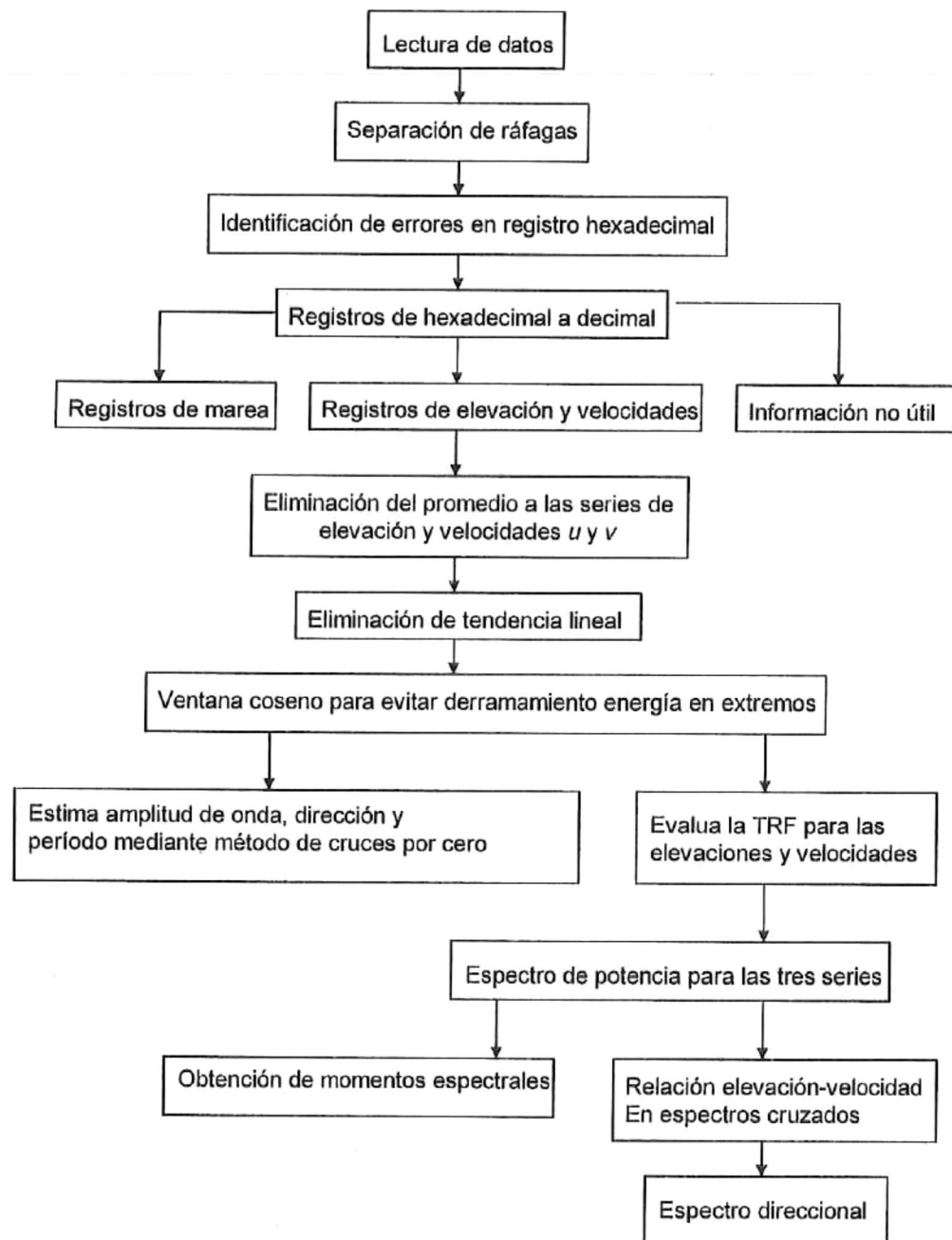


Figura 5. Diagrama de flujo del procesamiento que se realizó a los datos de oleaje obtenidos en Rosarito (tomado de Oropeza-Rosales, 1998).

La base de datos de olas utilizada en este trabajo consiste de 9,262 registros de altura (Hs), periodo (Tz) y dirección de viaje de las olas (θ) cada tres horas durante el periodo de junio 15 de 1994 a enero 7 de 1999. A partir de estos registros, se elaboró la estadística general de los datos, se agruparon conforme a las condiciones de tormenta más rigurosas para asociarlos a los cambios de playa en le corto plazo. También se agruparon estacionalmente e inter-anualmente para asociarlos a los cambios de mediano plazo. Las estaciones del año se definieron como sigue:

Estación del año	Meses
invierno	enero-marzo
primavera	abril-junio
verano	julio-septiembre
otoño	octubre-diciembre

Adicionalmente se emplearon registros de mayor longitud temporal producidos por el CDIP frente a la costa del sur de California con el objeto de revisar patrones de recurrencia en las características del oleaje.

5.1.2 Perfiles de playa

Los estudios publicados sobre cambios de playa en las costas de México son escasos y los registros de perfiles de playa son en general, de corta duración. En las playas de Rosarito, se ha construido la base de datos de perfiles de playa de mayor duración para litorales mexicanos con el trabajo conjunto del grupo de oceanografía de la CFE y del grupo de procesos litorales de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

Los datos obtenidos por la CFE corresponden a perfiles de playa levantados en 40 localidades, 20 al norte y 20 al sur del rompeolas de la CFE. La separación entre localidades es de 100 m, por lo que se cubrió una longitud total

de playa de 4 km. El periodo de mediciones comprende desde mayo 1995 a febrero de 2001. Sin embargo, por restricciones en el financiamiento, a partir de octubre de 1998, solamente se levantaron 10 perfiles al norte del rompeolas y 10 perfiles al sur del mismo. Debido a inconsistencias en la ubicación de los puntos de control o bancos de nivel donde se inician los levantamientos de los perfiles de playa no se pudieron utilizar los perfiles de mayo a diciembre de 1995. De esta manera, de la base de datos de la CFE se utilizaron 1,240 perfiles de playa.

Para diferenciar los perfiles de esta base de datos de la base de datos de la UABC, se utilizó una nomenclatura definida por una letra y dos dígitos: N para los ubicados al norte de las estructuras de la CFE y S para los perfiles ubicados al sur de la misma. Los dígitos ones (del 01 al 19) corresponden a los N y aumentan a partir de las estructuras de la CFE. Los dígitos pares (del 02 al 20) corresponden a los S y se incrementan a partir de las mismas estructuras. En la figura 6 se presenta la ubicación geográfica de estos puntos de control.

Los datos generados por el grupo de procesos costeros de la UABC constan de 10 líneas de perfil cuya separación entre ellas es aproximadamente entre 1 y 1.5 km, cubriendo una longitud de playa de 11 km aproximadamente, desde San Antonio del Mar hasta un poco al norte del arroyo Rosarito. Los levantamientos de los perfiles de playa se iniciaron en junio de 1997 en cuatro localidades y a partir de enero de 1998 se adicionaron seis localidades más, y sus mediciones se han continuado hasta diciembre de 2003. Debido a la previsión de condiciones extraordinarias durante el invierno de 1998, de febrero a abril de ese año la medición de este conjunto de perfiles se hizo quincenal, de manera que se tiene un total de 621 perfiles de playa. La nomenclatura de esta base de datos está definida por dos letras, BN, y dos dígitos que van del 01 al 11. El BN01 se localiza en la playa de San Antonio del Mar y el BN11, frente al Hotel Rosarito. Entre las dos bases de datos, CFE y UABC, se utilizan un total de 1,861 perfiles de playa.

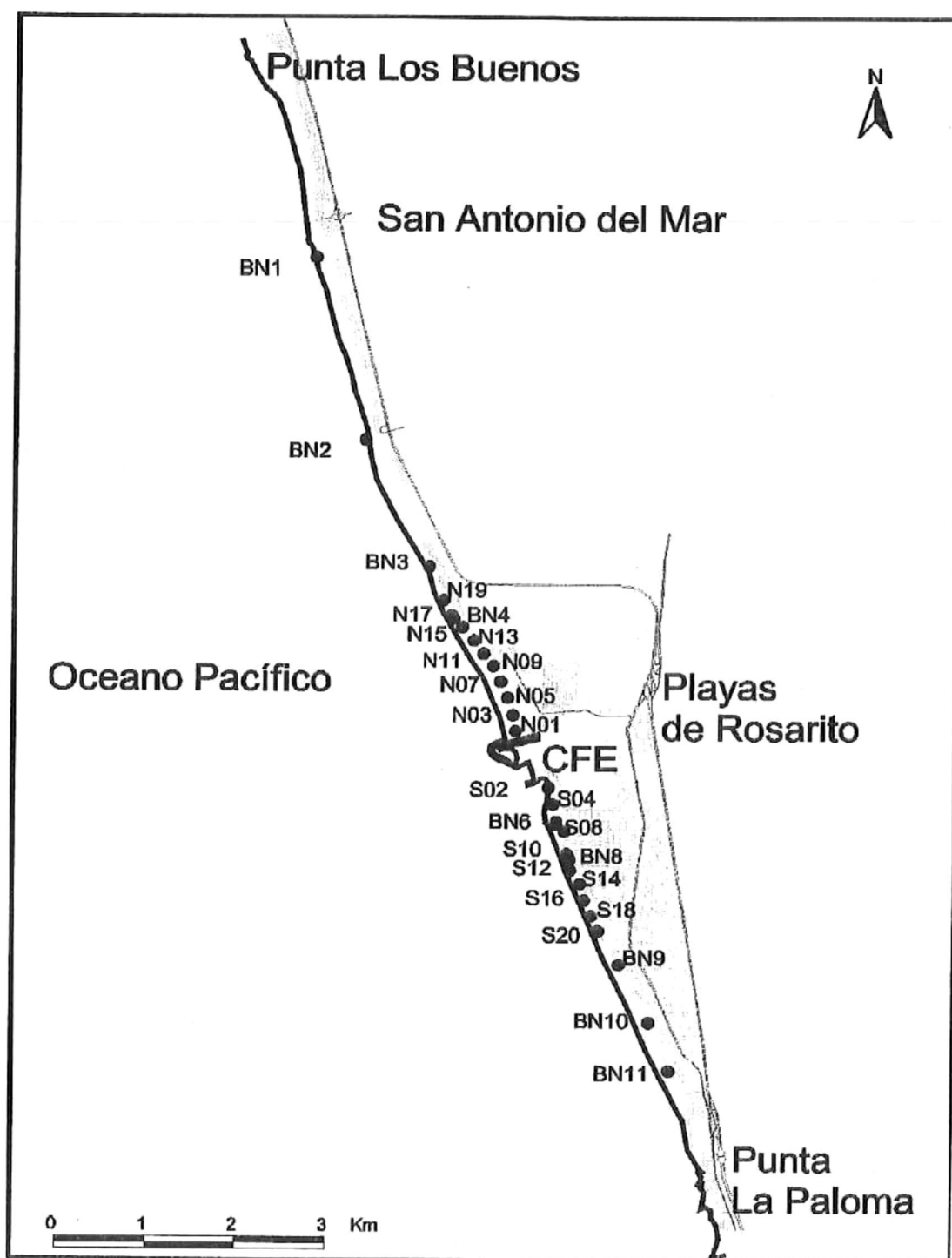


Figura 6. Localización de los puntos de control de las bases de datos de la CFE y de la UABC. Los que inician con S o N indican que son al sur o al norte del rompeolas y corresponden a la base de datos de la CFE. Los que inician con las letras BN corresponden a la base de datos de la UABC.

El registro de perfiles de playa se efectuó por ambos grupos de trabajo mediante la nivelación topográfica diferencial. Los puntos de control se establecieron, de preferencia, sobre estructuras firmes y su elevación se refirió al Nivel de Bajamar Media Inferior (NBMI) registrado en las instalaciones de la CFE y establecido por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información (INEGI). La forma y altura de los perfiles de playa se obtuvo empleando la técnica de nivelación diferencial simple, en la que se determina la altura del perfil de playa a distancias determinadas del punto de control o banco de nivel como lo describe Montes de Oca (1989) y que se ilustra en la figura 7. La distancia entre los puntos para determinar la altura se efectuó regularmente cada 5 m desde el punto de control hasta una profundidad donde las olas rompientes le permitieran al estadalero operar con seguridad, usualmente alrededor de 1 m por debajo del NBMI.

El análisis de los perfiles de playa para caracterizar los cambios de playa se basa en tres parámetros: el volumen de arena (V_p) contenido en la playa entre el punto de control y el NBMI, el ancho de playa (A_p) definido como la distancia entre el punto de control y el contorno del NBMI y la elevación del perfil (h) definida como la distancia vertical entre el NBMI y un punto determinado en el perfil como se esquematiza en la figura 6.

La definición de las escalas temporales en cuanto al lapso de tiempo que comprenden el corto, mediano y largo plazo es subjetiva y depende del problema a estudiar. En este trabajo y dada la longitud temporal de los datos disponibles (cinco años), los cambios de corto plazo o episódicos, se refiere a aquellos cuyo periodo es menor a 2 meses; los cambios de mediano plazo se refieren a lapsos entre 2 meses y 5 años y los de largo plazo se refieren a lapsos de 15 a 30 años. Los cambios de corto y mediano plazo se pueden estudiar haciendo uso de los datos de perfil de playa, mientras que para estudiar los cambios de largo plazo, se hará uso de las fotografías aéreas.

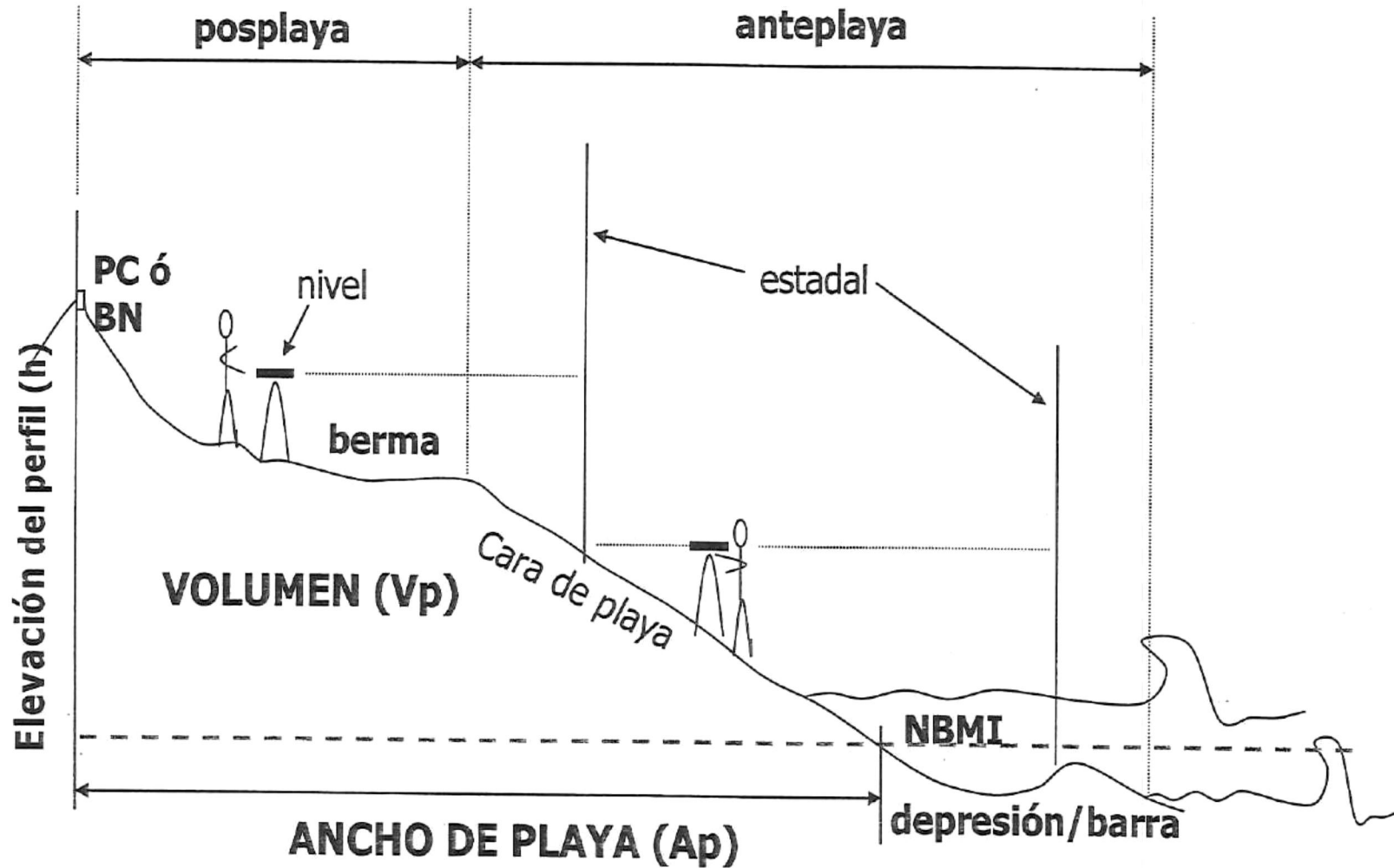


Figura 7. Método de nivelación diferencial simple (o de perfil) y conceptualización del ancho de playa, volumen de arena contenido por arriba del nivel de referencia y elevación o altura del perfil de playa.

5.2.- Cambios de corto plazo

Los cambios de playa en esta escala usualmente están asociados a eventos aislados. Pueden ser erosionales, debido a una tormenta o sucesión de tormentas, o depositacionales, como consecuencia a la contribución de sedimento por un deslizamiento o derrumbe del cantil costero o bien por súbitas avenidas de ríos o arroyos. Conforme a Eliot y Clarke (1989), el criterio para caracterizar el cambio de playa en el corto plazo es la ocurrencia de un evento que se identifique como el más distintivo, esto es, para nuestro caso, único en todas y cada una de las series de V_p y A_p . Para obtener esta unicidad se procedió a la identificación de valores mínimos/máximos de todas las series temporales de V_p y A_p y cuya tasa de cambio en un periodo de tiempo dado fuera la mayor.

Este tipo de cambios se deben principalmente a la ocurrencia de tormentas y/o los derrumbes de cantiles costeros. Como no existen reportes de estos últimos en la zona durante el periodo de estudio, se procedió al análisis de los registros de oleaje. Para detectar la excepcionalidad de oleaje se estimó la ocurrencia de oleaje más energético ocurrido -desde julio de 1994 a febrero de 1999- cuantificando la potencia relativa de las olas mediante la siguiente relación

$$P_r = H_s^2 * T$$

donde P_r es la potencia relativa de las olas ($m^2 s$), H_s es la altura significativa de las olas (m) y T es el período de las olas. Posteriormente, mediante la técnica de análisis de series parciales, se identificaron las tormentas más rigurosas durante el periodo de medición de oleaje. La respuesta de la playa a las condiciones de tormenta se estimó para la secuencia de tormentas más rigurosas mediante el uso del indicador adimensional de la velocidad de asentamiento de las partículas de sedimento (N_0) definido como:

$$N_0 = H_s / W_s T$$

también conocido como número de Dean y donde H_s es la altura de ola, W_s es la velocidad de asentamiento de la partícula de sedimento y T es el periodo de la ola. Este indicador es el más utilizado para determinar la transición de un perfil sin barras (verano) a un perfil con barras (invierno) (Dean, 1973; Dalrymple, 1992).

Los cambios en el nivel del mar que se analizan en esta sección están asociados a las mareas, la sobre-elevación del nivel del mar inducido por las olas rompientes (set up) y la combinación de ellos, esto es, coincidencias de mareas altas con excepcionales sobre-elevaciones del nivel del mar inducidos por las olas.

5.3.- Cambios de mediano plazo

Para identificar los cambios de mediano plazo se emplearon sólo las series temporales del volumen de arena contenido por arriba del NBMI en cada perfil. Esta decisión se adoptó con base en que la correlación entre el volumen de arena y el ancho de playa en los perfiles medidos resultó ser muy alta (0.7 a 0.9) y sería redundante el hacer un análisis de cambios para cada uno de ellos. La alta correlación entre volumen y ancho de playa se ha observado para otras playas (Bokuniewicz y Tangren, 1985; Hicks, et al, 1999).

La caracterización de los cambios de mediano plazo se hizo utilizando la técnica de análisis espectral, ya que se consideró como la herramienta más adecuada por tener la ventaja de distinguir claramente las periodicidades más significativas en los datos. Previo al análisis espectral, se restó la media a cada una de las series de volumen con el objeto de cancelar el contenido energético de la frecuencia cero; el intervalo de muestreo del volumen es de 30 días. El método de análisis espectral que se utilizó es del periodograma, uno de los más directos en el análisis espectral (Macintosh Program Performs Time-Series Analysis, 1996). Los resultados se presentan de manera gráfica como espectros de potencia, en

los que en la abcisa se representa las frecuencias (ciclos/año) y en la ordenada, la densidad espectral $[(m^3/m)^2 \text{ (cpa)}]$

Para estimar de manera aproximada la contribución energética de cada una de las principales frecuencias, identificadas mediante el análisis espectral, se buscó el mejor ajuste por cuadrados mínimos para el senoide con la frecuencia correspondiente a cada uno de los picos espectrales de mayor relevancia. De esta manera, la amplitud del senoide representa el volumen de arena que es movido bajo la influencia exclusiva de dicha frecuencia. La contribución de la componente de frecuencia dada a la varianza total se estimó mediante el uso del coeficiente de determinación, R^2 , que también se conoce como coeficiente de correlación al cuadrado.

5.4.- Cambios de largo plazo

La operatividad y mantenimiento de programas de largo plazo (décadas) de registros de perfiles de playa resulta costoso por lo que son pocas las localidades en el mundo que cuentan con series de perfiles de playa cuya duración sea mayor de 20 años (Clarke y Eliot, 1988; Lacey y Peck, 1998). Por esta razón, para analizar los cambios de playa en el largo plazo la técnica más adecuada es la de comparar fotografías aéreas y/o imágenes satelitales de diferentes fechas (Anders y Byrnes, 1991).

Recientemente se han tenido avances importantes en la tecnología para medir la topografía costera. El uso de la tecnología satelital para el posicionamiento geográfico (GPS) de rasgos terrestres en combinación con los Sistemas de Información Geográfica (GIS) ha mejorado la calidad y exactitud de los levantamientos de terreno, en particular en ambientes tan dinámicos como es la zona costera (Wright y Winckell, 1997). En los Estados Unidos se desarrolla un programa nacional para el mapeo de la línea de playa utilizando la tecnología de LIDAR (Light Detection and Range) y se ha integrado al sistema denominado

SHOALS (Scanning Hydrographic Operacional Airborne Lidar Surveying) que permite la obtención simultánea de imágenes batimétricas/topográficas digitales con exactitud de ± 0.15 m en la vertical y $\pm 1-3$ m en la horizontal. (Wozencraft, 2002; Sallenger, et al, 2003; Wozencraft y Lillycrop, 2003).

La toma de fotografías aéreas del litoral mexicano es limitada y se obtienen a través del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Para este estudio se obtuvieron dos fotografías aéreas y una imagen de satélite Quick-Bird cuya fuente, fecha y escala se dan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las fotografías aéreas e imagen satelital para el análisis de cambio de playa en el largo plazo.

Tipo	Fuente	Fecha	Escala
Fotografía aérea	INEGI	Sep 1972	1:150,000
Fotografía aérea	INEGI	Jun 1985	1:37,000
Quick-Bird	INEGI	Oct 2002	Resolución: 60 cm

Para efectuar el análisis comparativo entre fotografías aéreas se sometieron a un pre-procesado, ya que no son mapas que tengan alguna proyección específica. En este trabajo, el tratamiento de las fotografías se inició con su digitalización, utilizando una resolución de 1200 dpi, de manera que al aumentar la escala en pantalla se minimizara la apariencia pixelada de la fotografía. La imagen del satélite es digital y su resolución es de 0.6 m.

Dado que las fotografías y la imagen no tienen puntos de control definidos, como son la latitud, longitud o puntos de triangulación, es necesario generar puntos que permitan el co-registro o georeferenciación de ellas, esto es, el proceso de alineación de dos objetos de un juego de imágenes que se posicionan coincidentemente de unas con respecto de otras.

Para llevar a cabo el co-registro se utilizó un GPS para obtener las coordenadas del mayor número de puntos que fueron comunes en el campo y la fotografía (p.e. cruces de calles, carreteras, esquinas de edificios, inicio o final de rompeolas, etc.). Este proceso implica digitalizar la información de los puntos de control en una fotografía aérea y comparar su ubicación con la ubicación conocida en el sistema geográfico de referencia. Existen varios algoritmos para efectuar estas transformaciones y lograr, mediante cuadrados mínimos, el mejor ajuste de cada punto de control a su posición "correcta" (Jensen, 1986). La rectificación de las imágenes se llevó a cabo utilizando la programación ERMAPPER 6.1 © con 49 puntos de control para transferirla al sistema de coordenadas UTM Zona 11 con referencia al datum NAD 27 (North American Datum 1927) y el error cuadrático medio se redujo a 3 m. Los ajustes efectuados utilizando este tipo de técnicas simplemente corrigen todos los errores de escala e inclinación inherentes (Anders y Byrnes, 1991).

Una vez que se georeferenciaron las fotografías y la imagen se procedió a definir la línea de playa. Algunos autores han debatido sobre la consistencia de los indicadores de largo plazo para definir la línea de playa como son: la línea de marea alta, línea de remanentes marinos (debris), línea de vegetación, línea media de marea alta, cresta de la berma (Parker, 2003). Sin embargo, la línea entre la arena mojada y la arena seca ha sido el indicador más utilizado debido a que es fácil de detectar como un cambio tonal significativo en las fotografías (Smith y Zarillo, 1990; Anders y Byrnes, 1991). Dolan et al., (1980) sugieren que en playas cuya pendiente es entre 3 y 6 grados la línea mojada/seca se aproxima a la línea de marea alta (HWL), que a su vez se aproxima a la línea de marea alta promedio (MHWL), que es la que puede tener mayor consistencia estadística (Parker, 2003). En este trabajo se utilizó la programación de ArcView 3.2 © para digitalizar la línea mojada/seca por facilidad de detección en las fotografías aéreas consideradas.

La digitalización de la línea mojada/seca para cada fotografía y la imagen satelital se efectuó en pantalla haciendo una ampliación de ellas a una escala de 1:3000 o mayor. La calidad de las fotografías y la imagen para algunos segmentos de playa no fue lo suficientemente buena por lo que, para determinar el error de este proceso, se digitalizó dos o tres veces el mismo segmento y se obtuvieron diferencias hasta de 4 metros. En segmentos en donde la playa es ancha y no hay interferencia tonal producida por estructuras costeras en la parte posterior las diferencias fueron de 2 m. Utilizando también la programación de ArcView 3.2 © se estableció una línea arbitraria de referencia que fuera común para las dos fotografía y la imagen.

Considerando que la variación de la PLP en transectos adyacentes en sentido perpendicular a la playa puede estar altamente correlacionada debido a que los procesos que los modulan son los mismos, se seleccionaron transectos con una separación de 150 m y que totalizaron 50 transectos a lo largo de 8 km de playa en Rosarito. La distancia entre ellos se definió conforme al nomograma construido por Dolan et al., (1992) en el que señalan que con esta separación se obtiene una estimación de la tasa de cambio con un 95% de confianza. Una vez obtenidas las PLP para cada una de las fotografías aéreas y la imagen satelital, se determinó la tasa de cambio utilizando la técnica de tasa de punto final (End Point Rate, EPR, por sus siglas en inglés) que consiste en determinar la distancia desde la línea de referencia hasta la PLP correspondiente dividido entre el lapso de tiempo entre las mediciones (Dolan et al., 1991).

6.- RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección del trabajo se han organizado los resultados y discusiones de manera que se facilite el análisis. Primeramente se analizan los cambios en el corto plazo y los factores que los inducen; seguidamente se procede con el análisis de los cambios de mediano plazo y por último los cambios de largo plazo.

6.1 Cambios de playa en el corto plazo

Una de las características más sobresalientes del ambiente playero es su constante cambio morfológico. La cualificación y cuantificación de la rapidéz o lentitud con la que ocurren estos cambios son de vital importancia para el desarrollo de proyectos de ingeniería costera y para la planificación del uso de la playa como recurso recreativo. Los grandes cambios en escalas de horas o días pueden estar asociados a eventos que por su naturaleza se pueden definir como catastróficos. Los principales forzantes de éstos pueden ser:

- Deslizamientos costeros: en la figura 8 se ilustra un deslizamiento costero en el que se observa una importante acumulación de sedimentos sobre la playa, pero que sólo cubre una extensión limitada a lo largo de la línea del litoral. La contribución de material sedimentario a la playa de este tipo de deslizamientos pueden ser superiores, inclusive, a los aportados por otros contribuyentes en lapsos anuales o mayores.
- Olas de tormentas excepcionales y/o persistentes: estos agentes, por el contrario, producen procesos erosionales rápidos. En la figura 9 se ilustra la condición erosionada de una playa inmediatamente después de una tormenta en la que un importante volumen de arena ha sido removido desde la posplaya; también muestra la alta vulnerabilidad de la infraestructura costera a la erosión costera.



Figura 8. Proceso acrecional episódico ocasionado por deslizamientos de cantiles costeros (tomado de <http://pubs.usgs.gov/>).



Figura 9. Erosión episódica producida por olas de tormenta. La reducción de arena sobre la playa facilita una mayor incursión de las olas hacia tierra provocando daños a la infraestructura (tomado de www.fema.gov/).

- En costas formadas por barras o barreras arenosas, el ataque de tormentas intensas pueden ocasionar el rebase (overwash) e incluso el rompimiento (breaching) de las barreras arenosas, que pueden, en casos extremos, implicar el transporte o remoción de cientos de miles de m^3 de arena en el lapso de 3 o 4 días (Komar, 1978; Jiménez et al, 1997a).
- Otros efectos dramáticos sobre la playa que producen las olas de tormenta, además del desplazamiento de grandes volúmenes de arena, son la reducción del ancho de la playa, desde algunos metros hasta casi un centenar, así como la pérdida de altura del perfil de playa que puede oscilar entre 1 y 4 metros (Egense, 1989; Bokuniewicz, 1998; Lizárraga-Arciniega, et al, 2003).

Es de señalar que en esta sección se analizarán los cambios de corto plazo, esto es, aquellos cambios que ocurren en un lapso de días o algunas semanas. El análisis se efectuará a partir de la base de datos de perfiles de playa y base datos de oleaje descritas con anterioridad.

6.1.1. - Identificación de eventos extremos en perfiles de playa.

Es frecuente que los valores mínimos de V_p no ocurran en el mismo mes a lo largo del tiempo, por ejemplo: en un año, el menor volumen de arena en un punto de control determinado puede presentarse en enero y al siguiente año, en el mismo punto de control el menor volumen se registra en abril. De la misma manera, mientras en un tramo de playa puede ocurrir la disminución de volumen de arena, en otro tramo puede presentarse un aumento de volumen de arena sobre la playa. Bajo este concepto, la determinación de un evento al que se pudiera definir como episódico se hizo con base en el comportamiento espacial y temporal del volumen de arena y ancho de playa en la zona de estudio.

El criterio utilizado consistió en establecer cuando se presenta el menor volumen de arena e identificar si ocurre de manera simultánea a lo largo de los 11 km de playa estudiados. El análisis de las series temporales de volumen y ancho de playa muestran que el menor volumen de arena que se presentó de manera simultánea en la totalidad de los puntos de control (29) fue en el invierno de 1998, en un lapso menor de dos meses. En las figuras 10a y 10b se presentan sólo las series temporales de ocho de los 29 puntos de control y se observa que los valores mínimos de volumen ocurren simultáneamente en febrero de 1998.

Conviene señalar que el volumen mínimo de arena en el invierno de 1998 en un punto de control determinado puede ser significativamente diferente con respecto al volumen mínimo de arena de un invierno pero no significativamente diferente con respecto al volumen mínimo de otros inviernos. Por ejemplo, en el punto de control BN01 (figura 10a), la única diferencia significativa de volumen entre inviernos ocurre entre el invierno de 1998 y el del 2000; también para el punto de control S06 (figura 10b), las diferencias significativas de volumen con respecto al invierno de 1998 ocurren con los inviernos de 1997, 1999 y 2000. Aún que no existan diferencias significativas de los volúmenes de arena para los diferentes inviernos en toda la extensión de playa, es importante anotar que la ocurrencia simultánea de erosión en los 29 puntos de control en el invierno 1998 permite definirlo como el único evento episódico en el periodo de 1996 a 2003 en la zona de estudio. Los volúmenes mínimos y su fecha de ocurrencia se realzan con círculos en las figuras 10a y 10b.

6.1.2 Identificación de evento extremo de oleaje de tormenta

El análisis de oleaje en la costa Pacífico de la península de Baja California, utilizando tecnología satelital, muestra que durante el invierno la altura de ola es mayor que en verano (De Dios-Sanchez, 2002). Con mediciones in situ, se presentan resultados similares para la región de Punta Cabras y Eréndira (Oropeza-Rosales, 1998), la Bahía de Todos Santos (Coria-Mendez, 1991), y la

región de Rosarito (Marmolejo-Lara, 1985; Marichal-González, 2001). Siguiendo este patrón, es de esperarse que el oleaje más energético en la zona de estudio ocurra durante los inviernos y en consecuencia se suceda la erosión de la playa. Sin embargo, la excepcionalidad de la erosión de playa en el invierno de 1998 presupone el arribo de oleaje con características excepcionales de energía y en consecuencia, la intensificación de otros procesos litorales que favorecieron la erosión de la playa.

Para cuantificar la excepcionalidad de oleaje se exploraron los registros de oleaje obtenidos por el grupo de Oceanografía de la CFE frente al rompeolas de la misma Comisión en el periodo de julio de 1994 a enero de 1998. Como una primera aproximación para estimar la contribución energética de las olas se estimó la potencia relativa de las olas (P_r), como sigue:

$$P_r = H_s^2 T \quad [\text{m}^2 \text{ s}]$$

donde H_s es la altura significativa de las olas (m) y T es el período (s).

Esta estimación de P_r se hizo para los meses de septiembre a marzo de los cinco periodos invernales de los registros de oleaje de la CFE. En la figura 11 se muestra el comportamiento energético del oleaje y rápidamente se desprende que las condiciones de potencia relativa del oleaje en el invierno de 1998, comparadas con los demás periodos invernales, son excepcionalmente mayores. En la figura 12 se ilustra como al 95% de confianza la contribución energética del oleaje para cada uno de los inviernos es significativamente diferente excepto entre los inviernos 1995-1996 y 1998-1999. Dada la excepcionalidad el invierno de 1998 éste se analiza con más detalle.

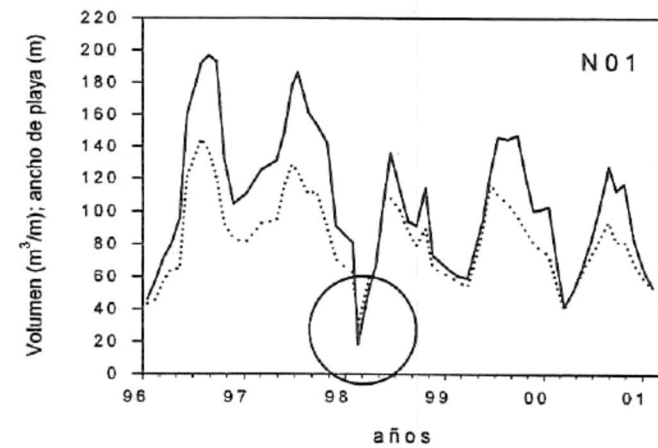
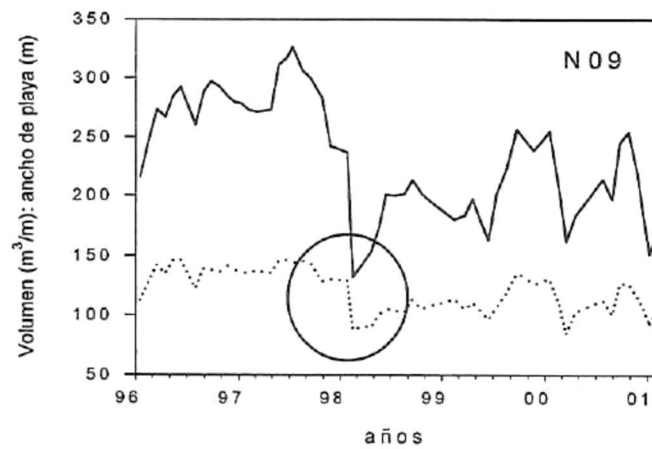
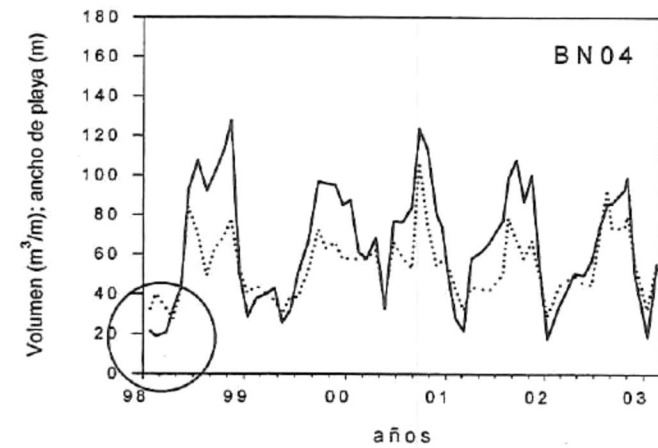
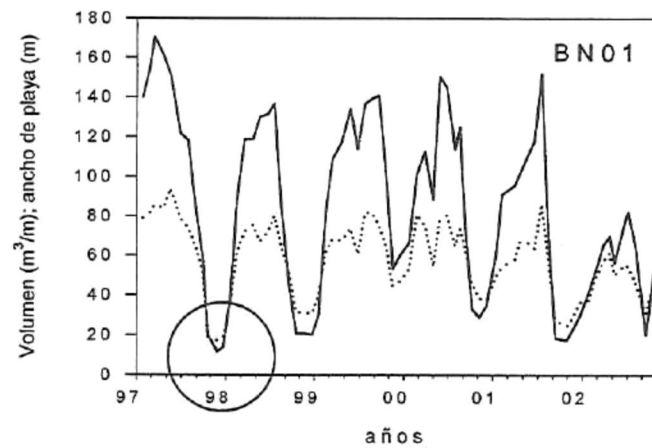


Figura 10a. Ocurrencia de valores mínimos del volumen de arena (línea llena) y ancho de playa (línea punteada) durante el periodo total de mediciones en las playas hacia el norte del rompeolas de la CFE. Aunque las diferencias en volumen son significativas al 95% sólo para algunos inviernos, la coincidencia de erosión máxima en el total de puntos de control durante el invierno de 1998 permite definirlo como el evento episódico a estudiar.

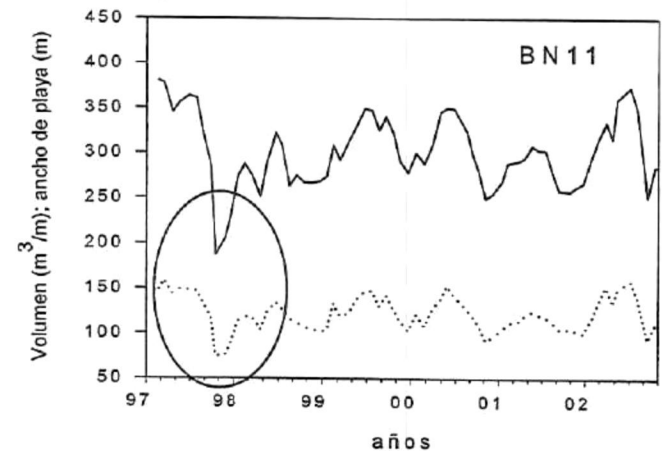
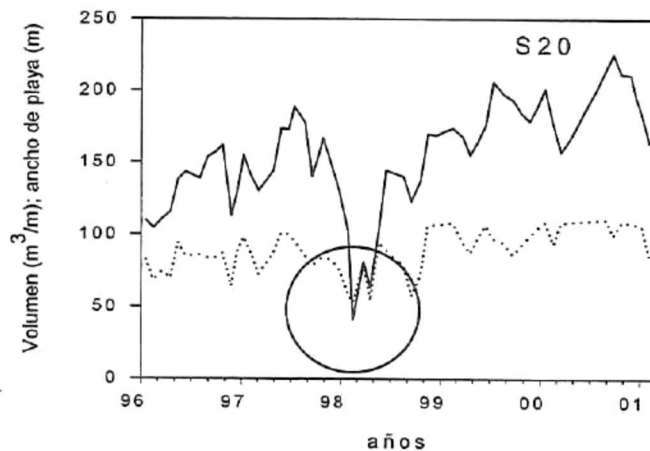
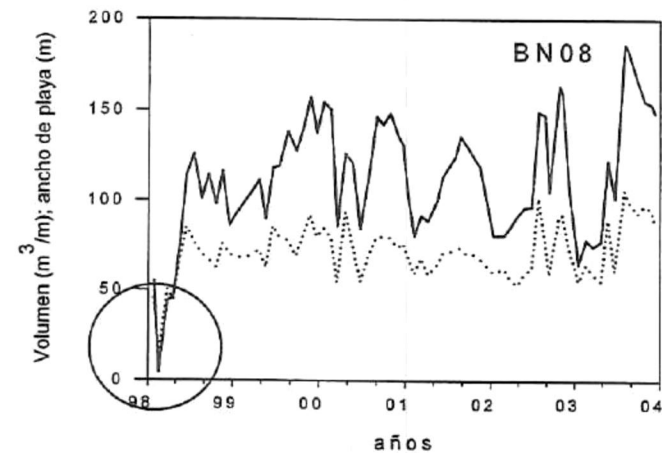
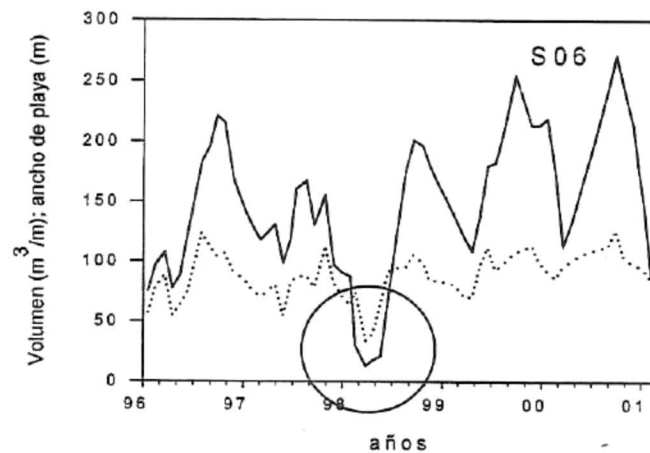


Figura 10b. Ocurrencia de valores mínimos del volumen de arena (línea llena) y ancho de playa (línea punteada) durante el periodo total de mediciones en las playas hacia el sur del rompeolas de la CFE. La diferencia en volumen entre los diferentes inviernos es significativa al 95% sólo para algunos inviernos, sin embargo la coincidencia de erosión máxima en el total de puntos de control durante el invierno de 1998 permite definirlo como el evento episódico a estudiar.

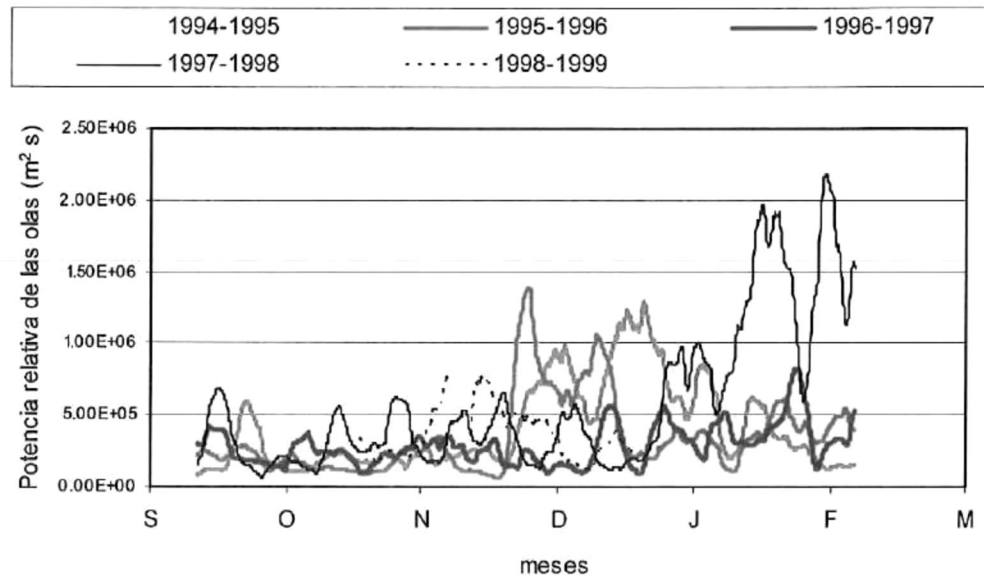


Figura 11.- Potencia relativa de las olas durante los meses de septiembre a febrero del periodo de 1994-1995 a 1998-1999 frente a las instalaciones de la CFE, Rosarito.

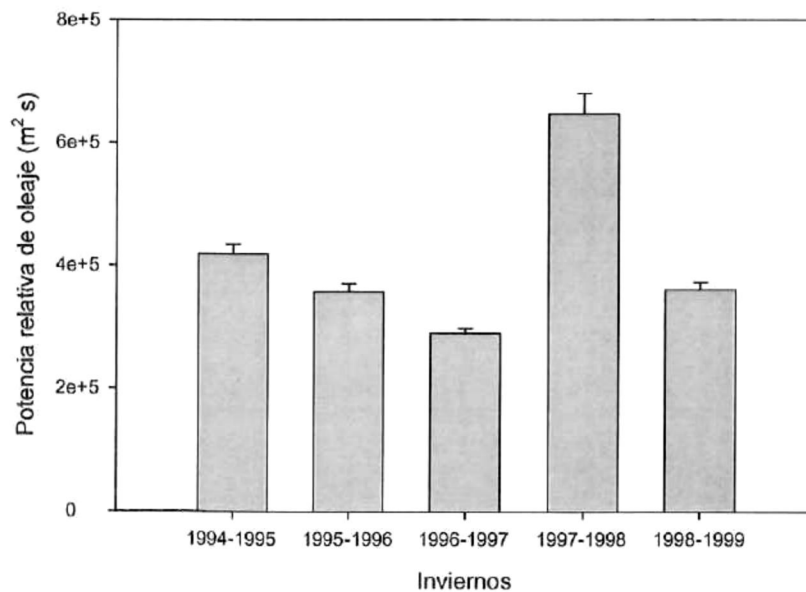


Figura 12. Comparación de la potencia relativa de las olas ($m^2 s$) inter-inviernos en Rosarito. Las condiciones energéticas del oleaje que se presentaron entre los inviernos de 1995-1996 y 1998-1999 son similares al 95% de confianza, las diferencias entre los demás inviernos son significativas.

Los criterios para establecer las características de los eventos que dan lugar a los inviernos altamente energéticos que se muestran en la figura 11, se basaron en la técnica de análisis de una serie de duración parcial de los registros de H_s obtenidos en Rosarito. Este análisis consiste en obtener todas aquellas alturas de ola que son mayores a una magnitud arbitraria base, que en este caso puede ser la altura más baja de la serie de alturas máximas anuales (Lee et al, 1998). En la tabla 2 se muestran las H_s máximas anuales, donde se observa que la altura mínima de una tormenta excepcional para Rosarito fue de 3.5 m, que corresponde a la tormenta ocurrida en julio de 1996.

Tabla 2. Alturas máximas anuales de las olas en Rosarito.

año	H_s máxima (m)
1994	3.55
1995	4.37
1996	3.54
1997	3.78
1998	5.71

Dolan y Davis (1992) señalan que el efecto de las tormentas sobre la playa no sólo es función de las alturas de las olas sino también de la duración de la tormenta. En este trabajo la duración de tormenta se definió como el tiempo que transcurre desde que se inicia la tormenta ($H_s \geq 3.5$ m) hasta que la altura de ola es igual o menor que 2.5 m. Este valor es el promedio de la altura de ola de todos los inviernos más una desviación estándar (1.8 ± 0.7 m), y se considera como la altura de ola de una tormenta promedio.

Como resultado de la aplicación de los criterios señalados, en la tabla 3 se presenta la serie parcial de tormentas excepcionales con sus alturas de ola

máximas y duración de tormenta que ocurrieron durante el periodo de junio 1994 a enero 1999 para la costa de Rosarito. Obtenido el número de tormentas y su duración se procedió a caracterizar la intensidad de las tormentas que ocurrieron en cada uno de los meses que se señalan en la tabla 3, siguiendo el procedimiento de Dolan y Davis (1992) en el que se integra la potencia de la ola conforme a la relación:

$$I = \text{Potencia} * \text{duración} = \left[\frac{1}{8} \rho g H_s^2 C_g \right] d \quad [\text{joules}]$$

donde I es la intensidad de la tormenta, ρ es la densidad del agua ($1.025 \times 10^3 \text{ g/m}^3$), g la gravedad (m/s^2), H_s es la altura significativa máxima (m), C_g es la velocidad de grupo de las olas (m/s) y d es la duración de la tormenta (s).

Tabla 3.- Tormentas excepcionales resultantes del análisis de series parciales y su duración durante el periodo 1994-1999 en Rosarito, B. C.

Fecha	# tormenta	Hs max	Duración (h)
25-dic-94	1	3.6	21
05-ene-95	2	4.4	30
06-ene-95	3	3.5	12
08-ene-95	4	3.8	21
11-ene-95	5	4.0	24
23-ene-95	6	3.8	15
14-dic-95	7	3.6	3
14-dic-95	8	4.0	33
24-jul-96	9	3.5	9
13-ene-98	10	4.0	18
20-ene-98	11	4.3	24
30-ene-98	12	4.0	24
31-ene-98	13	3.9	27
04-feb-98	14	4.7	30
06-feb-98	15	3.5	9
07-feb-98	16	4.0	3
08-feb-98	17	4.8	27
14-feb-98	18	4.0	36
16-feb-98	19	5.7	72
24-feb-98	20	4.5	30

En la figura 13 se presenta la intensidad acumulada mensual de las tormentas en el periodo de junio de 1994 a enero de 1999. Es evidente que la contribución energética más importante se presenta en los meses de enero de 1995 y enero y febrero de 1998. En estos últimos, considerando que el tiempo promedio entre cada una de las tormentas es del orden de 4 días, se puede considerar que, en su conjunto, constituyen el “evento de corto plazo” de mayor significancia en el cambio de playa a lo largo del periodo de estudio. Como es de esperarse, varias tormentas de mediana intensidad en un lapso de tiempo corto pueden tener efectos más destructivos sobre la playa que la ocurrencia de una tormenta única de mayor intensidad en ese mismo lapso de tiempo.

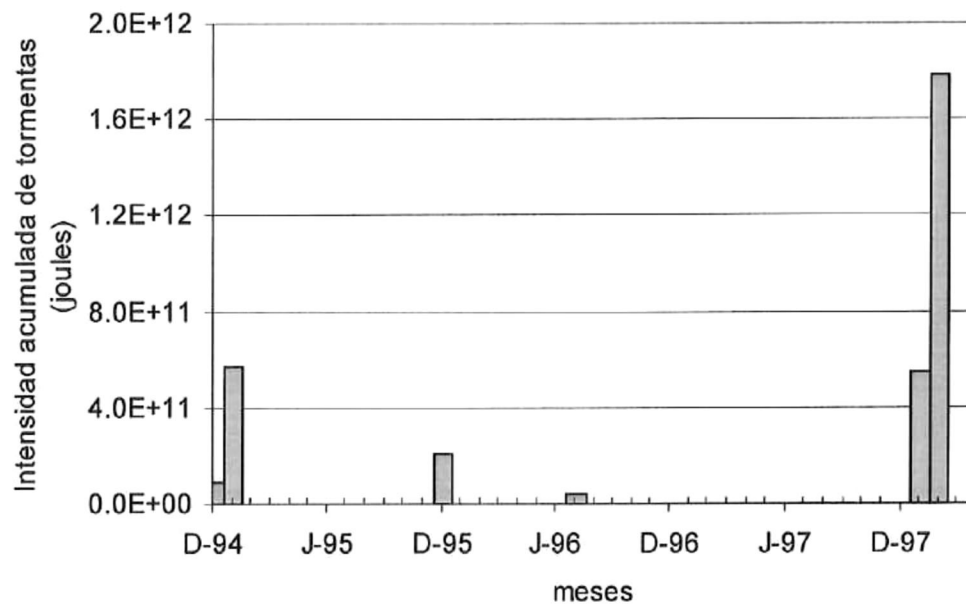


Figura 13. Intensidad acumulada mensual de tormentas en Rosarito durante el periodo de 1994 a 1999 conforme al criterio de Davis y Dolan (1992).

La excepcionalidad de las tormentas señaladas coincide con eventos El Niño de intensidad baja (1995) y media (1998) (NOAA, 2002). La correlación positiva entre un evento Niño y la severidad de los eventos de tormentas invernales, en términos de número e intensidad, ha sido probada para las costas de California y Oregon (Seymour et al, 1984; Seymour, 1998; Allan y Komar, 2000).

A continuación se describen y discuten los cambios de playa identificados mediante el análisis de cambio de volumen y su relación con las tormentas ocurridas en el mes respectivo. Para proporcionar un contexto de la rapidez de los cambios de playa, primeramente se presenta los cambios que ocurrieron del 28 de octubre al 28 de diciembre de 1997, periodo previo al arribo de las tormentas excepcionales. Seguidamente se discuten los cambios observados del 28 de diciembre de 1997 al 27 de enero de 1998 y por último los cambios del 28 de enero al 27 de febrero de 1998.

6.1.3.- Respuesta de la playa a tormentas excepcionales

6.1.3.1.- Periodo del 28/octubre/1997 al 28/diciembre/1997.

En la figura 14 se muestra el cambio de volumen de arena en cada uno de los perfiles de playa en Rosarito ocurrido entre el 28 de octubre de 1997 y el 28 de diciembre de 1997. Se observa que en todos los puntos de control, excepto en el N05, los cambios fueron negativos, lo que indica una remoción de arena de la playa subaérea. El volumen de arena removido varió desde $-9.5 \text{ m}^3/\text{m}$ en el punto de control N03, hasta $-73 \text{ m}^3/\text{m}$ en el punto de control N11. Sólo en un punto de control (N05) se presentó un ligero incremento de arena de $10.5 \text{ m}^3/\text{m}$. El promedio de arena removida a lo largo de la playa de Rosarito fué de $-42 \text{ m}^3/\text{m}$, correspondiendo a una tasa de pérdida de arena de $0.7 \text{ m}^3/\text{m} / \text{día}$ durante todo el periodo considerado.

Por otro lado, en la figura 15 se presenta el cambio en el ancho de playa durante el mismo periodo del 28 de octubre de 1997 al 28 de diciembre de 1997, donde nuevamente los valores negativos indican una reducción del ancho de playa. Se observa un patrón de disminución similar al del cambio de volumen, donde la disminución del ancho de playa llegó a ser de un poco más de -40 m en el punto de control S06. La disminución promedio del ancho de playa fue 14 m correspondiendo a una tasa de 0.23 m/día . En los puntos de control N09, S02,

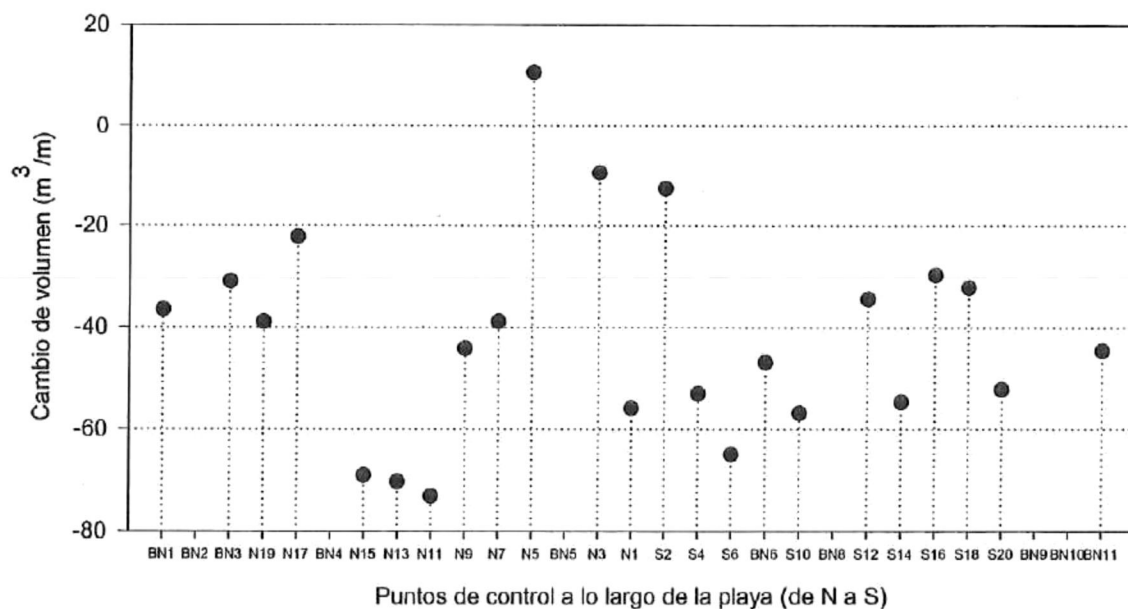


Figura 14.- Cambio de volumen de arena en cada uno de los perfiles de playa en Rosarito ocurrido entre el 28 de octubre de 1997 y el 28 de diciembre de 1997 en el que predomina la erosión de la playa subaérea a lo largo de la zona de estudio.

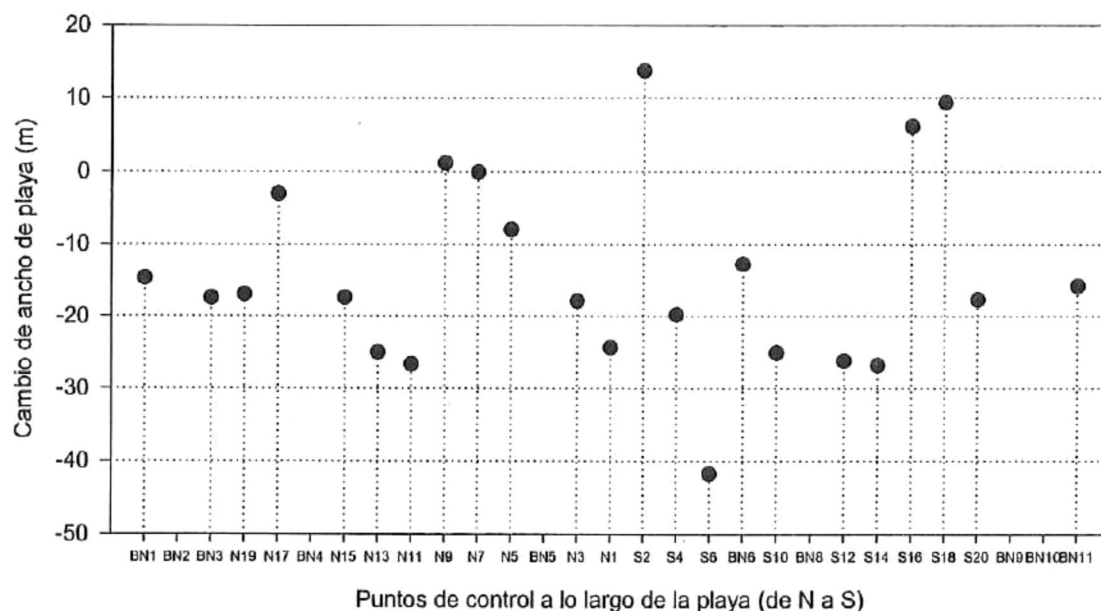


Figura 15. Cambio en el ancho de playa en cada uno de los perfiles de playa en Rosarito ocurrido entre el 28 de octubre de 1997 y el 28 de diciembre de 1997. En la mayoría de los perfiles predomina la disminución del ancho.

S16 y S18 se observa un aumento del ancho de playa que va desde menos de 1 m (N09) hasta un máximo de 14 m (S02), sin embargo, este aumento no necesariamente indica un proceso de acreción, ya que la arena removida desde la berma y de la parte superior de la cara de la playa se puede depositar en la parte baja de la playa ocasionando el aumento del ancho de playa pero con una reducción del volumen dando como consecuencia una disminución de la pendiente del perfil.

Se puede establecer que las modificaciones observadas en el perfil de playa son una respuesta a las condiciones de oleaje que se presentaron durante este periodo, como se discute a continuación.

En la figura 16 se ilustran las características de H_s desde el 1 de octubre al 31 de diciembre de 1997. Se observan algunos eventos energéticos aislados ($H_s > 3$ m), pero ningún evento que cumpla con el criterio aquí establecido para definir tormentas excepcionales ($H_s \geq 3.5$ m); en octubre se tiene un registro de $H_s = 3.5$ m seguido de H_s menores de 2.5 m. Sin embargo, a partir de mediados del mes de noviembre se presentaron cinco eventos de oleaje con alturas entre 2 y 3 metros. Si bien estos eventos no clasifican como tormentas excepcionales, el evento de los primeros días de diciembre tuvo una duración aproximada de 90 horas siendo un evento que potencialmente produjo una erosión importante sobre la playa.

6.1.3.2 Periodo del 28/diciembre/1997 al 27/enero/1998

Este periodo presentó una reducción del volumen de arena en todos los perfiles de playa adicional a la que se registró en el periodo arriba analizado. Sin embargo, como se muestra en la figura 17, la magnitud del cambio de volumen es muy variable ya que en diez puntos de control se presentó una pérdida de volumen menor a $10 \text{ m}^3/\text{m}$, y sólo cuatro presentan una reducción de volumen

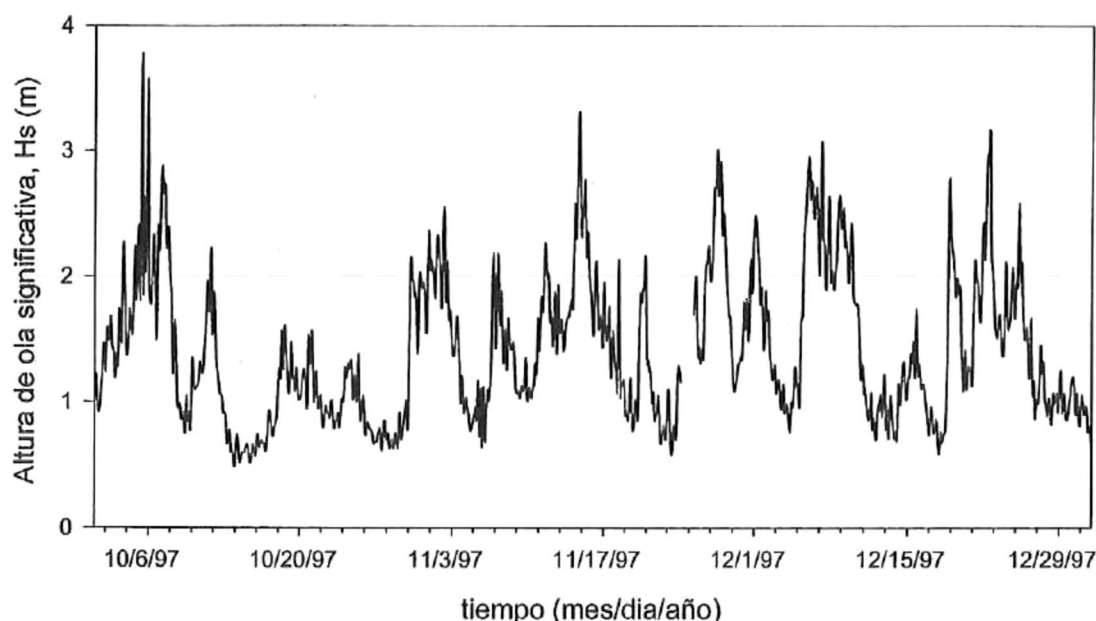


Figura 16. Altura de olas en Rosarito durante el periodo del 1 de octubre al 31 de diciembre de 1997. No se registra ninguna tormenta excepcional en este periodo pero si varios eventos con aturas de ola menores de 3 metros que en conjunto pueden ocasionar una erosión importante de la playa subaérea.

mayor a $5 \text{ m}^3/\text{m}$. La remoción de arena de más de $20 \text{ m}^3/\text{m}$ se presenta en nueve puntos de control, de los cuales seis se ubican en las playas hacia el sur del rompeolas.

En la misma figura 17 también se puede observar de manera general que la variabilidad en el cambio de volumen es menor en las playas hacia el norte del rompeolas (excepto en el BN01 y desde el BN02 al N01) en comparación a las playas hacia el sur (desde el S02 al BN11). En la región norte, la remoción de volumen de arena es desde $-0.05 \text{ m}^3/\text{m}$ (BN03) hasta $-28 \text{ m}^3/\text{m}$ (BN01) con un promedio de $-10 \text{ m}^3/\text{m}$. Por el contrario, en la región sur el volumen de arena erosionada varió desde $-3.3 \text{ m}^3/\text{m}$ (S06) hasta $-34 \text{ m}^3/\text{m}$ (BN11), con un promedio de $-18 \text{ m}^3/\text{m}$. Esa diferencia se debe a que en la parte norte las playas son menos anchas que en la parte sur debido al angostamiento del depósito de suelo litoral Q (figura 3), aunado a la presencia de muros costeros que protegen el pie del cantil, evitando así la erosión de la playa y el cantil durante los eventos de tormenta.

Por otro lado, el cambio del ancho de playa muestra un patrón similar al cambio de volumen. En la figura 18 se observa que en la región norte el cambio del ancho de playa varió desde un poco más de ± 0.5 m, en los puntos de control BN03, N19, N11, N09 y N03, hasta -14 m en el BN01; el promedio de disminución del ancho de playa en esta región fue de -4 m. En contraste, en las playas hacia el sur del rompeolas el retroceso de la playa varió desde -7 m (S06) hasta -21 m en el punto de control S16, con un promedio general de retroceso en la región de -13 m.

En general, la variabilidad en el volumen y ancho de playa en las playas hacia el norte del rompeolas pudiera estar asociado a la presencia de muros costeros y cantiles en la posplaya. La función protectora contra la acción de las olas de los muros costeros, si bien evitan el retroceso de la playa, no permite ningún intercambio de material sedimentario de el lado hacia tierra del muro hacia la playa. Por otro lado, además de no contribuir con sedimentos al sistema litoral los muros costeros confinan severamente las dimensiones de la playa, como se observa en otras localidades (Basco et al, 1997).

En contraste, las playas hacia el sur del rompeolas presentan cambios de volumen y ancho de playa de mayor magnitud. Esto se puede deber a que los muros costeros que existen en esta zona son de corta longitud y están más al interior de la posplaya y por lo tanto más lejos del alcance de olas, permitiendo que la playa tenga una mayor capacidad de almacenamiento de arena, y en consecuencia generen playas más anchas. Las olas rompientes de las tormentas excepcionales sobre este tipo de playas, al sur del rompeolas, tienen un mayor alcance sobre la posplaya, de esta manera, la remoción de arena desde la parte más interior de la posplaya no es interferida por la presencia de estructuras de protección como muros costeros.

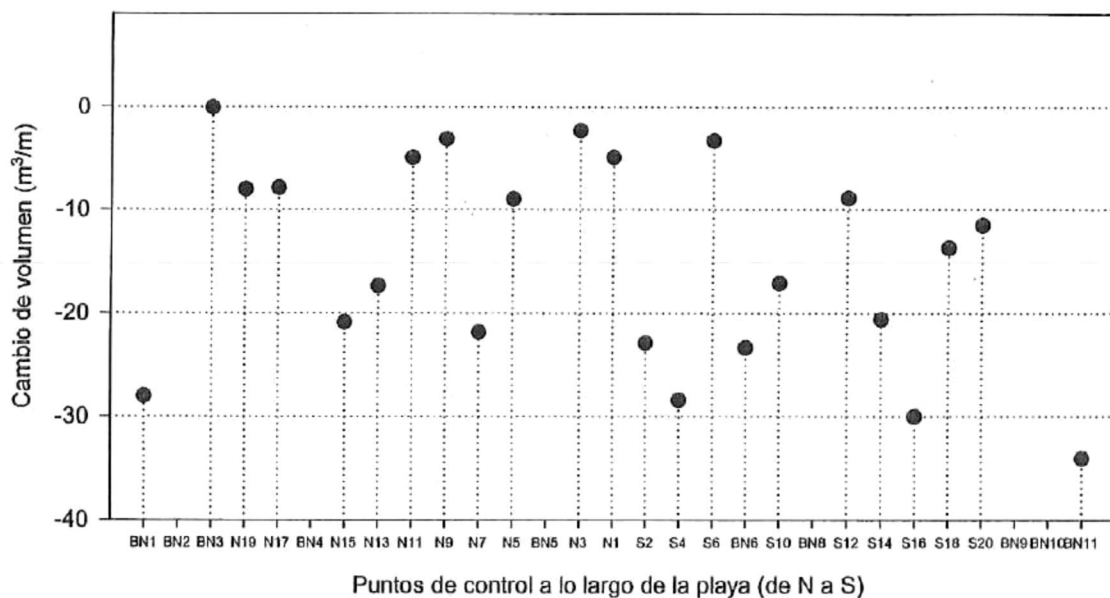


Figura 17. Cambio de volumen de arena en los perfiles de playa durante el mes de enero de 1998.

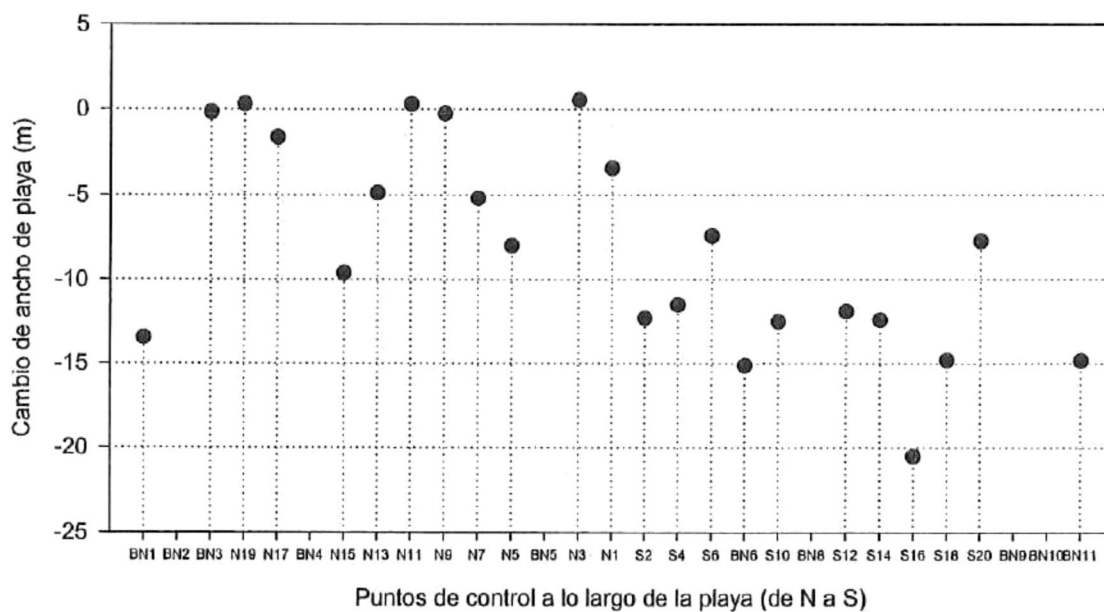


Figura 18. Cambio del ancho de playa en los perfiles de playa durante el mes de enero de 1998.

La acción amortiguadora que producen las playas arenosas más alejadas al sur del rompeolas es más evidente debido a que presentan playas hasta de 180

m de ancho mientras que en la parte norte el ancho de playa es de alrededor de 100 m.

La erosión de la playa subaérea que se registró durante el mes de enero (figuras 17 y 18) fue resultado de la ocurrencia combinada de el arribo de las olas de tormenta excepcional y el máximo nivel del mar. El arribo de oleaje de baja altura (~1 m) en los últimos días de diciembre y primeros días de enero ocasionaron una calma relativa que fue interrumpida por el arribo de oleaje de dos tormentas excepcionales durante los días 13-14 y 20 de enero de 1998, con H_s ligeramente mayores de 4 m (figura 19 y tabla 3). A pesar de la altura de estas olas su potencial para producir erosión de la playa subaérea se atenuó, ya que durante las 10 horas que duró la primera tormenta, el arribo de las grandes olas ocurrió cuando la altura máxima de la marea fue de 1.2 m sobre el NMBI. La segunda tormenta, con duración de 24 horas, transcurrió principalmente durante el periodo de mareas muertas en las que la altura máxima del NMBI fue de 1.1 m (figura 19).

La reducción en la capacidad potencial de erosión de las olas de tormenta excepcional se produce porque la línea de rompiente se desplaza hacia el mar, alejándose de la playa subaérea, y en la parte hacia el mar de la cara de la playa, en la terraza de baja marea ("terraza" en la figura 1), la pendiente de la playa es más suave y permite que la disipación de energía de la ola rompiente se efectúe a través de una mayor distancia, desde la línea de rompiente hasta la cara de la playa. Por otra parte, cuando la marea es baja, el alcance de las olas sólo influye en la terraza de baja marea y, en el mejor de los casos, hasta la parte baja de la cara de la playa tipificándose así una playa disipativa conforme a la clasificación de Wright y Short (1983).

Si bien la magnitud de la erosión de la playa producida por estas tormentas no fue excepcional, si ocasionaron reducciones en la altura del perfil y algunos retrocesos importantes de la berma de la playa, de manera que, la susceptibilidad

a la erosión de la playa por tormentas subsiguientes se incrementó notablemente como se discute más adelante.

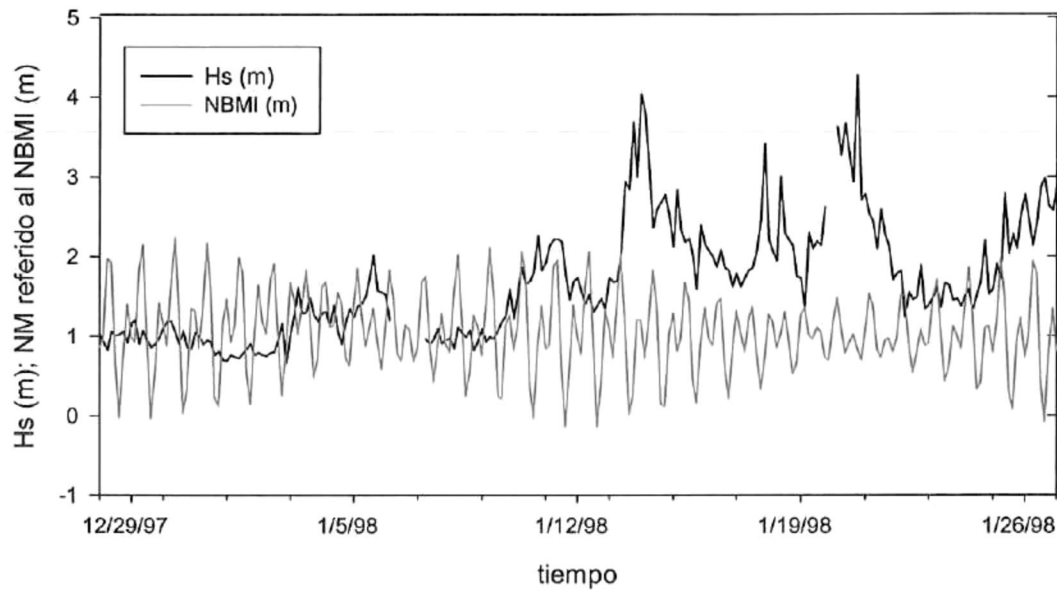


Figura 19.- Combinación de altura de las olas con condiciones de mareas para el periodo de 28 diciembre de 1997 al 27 de enero de 1998 cuyos efectos se describen en el texto para las playas de Rosarito.

Un índice para valorar el proceso de erosión de la playa inducido por olas de tormenta es el número de Dean (N_0), definido como:

$$N_0 = H_s / W_s T$$

donde H_s , W_s , y T ya han sido definidos anteriormente; otros autores también denominan a este número como velocidad de asentamiento adimensional (Masselink y Pattiaratchi, 2001).

Kraus et al., (1991) utilizaron datos de oleaje medidos en el campo para relacionar el número de Dean a la pendiente de la ola (N_0 vs. H_o/L_o). De esta relación obtuvieron una clara separación entre un perfil susceptible a la erosión y uno susceptible a la acreción cuando $N_0 = 3.2$. De aquí determinaron que el valor crítico del número de Dean para diferenciar entre la acreción y erosión de la playa

subaérea es cuando $N_0 = 3.2$. Si $N_0 < 3.2$ la acreción de la playa es probable (no hay formación de barras) y si $N_0 \geq 3.2$ la erosión es probable (formación de barras). Wright et al (1985) evaluaron este criterio empleando seis años y medio de observaciones diarias de la playa y encontraron que estos valores concuerdan con los estimados por ellos.

En la figura 20 se presentan los valores de N_0 para el periodo del 28 de diciembre de 1997 al 28 de enero de 1998, la línea segmentada define el valor crítico de N_0 . Se puede observar claramente que previo al 11 de enero de 1998, se sucedió un proceso acrecional de la playa que no se observa marcadamente en los perfiles de playa, esto muy probablemente debido a que el espaciamiento en tiempo con el que se tomaron los perfiles es mayor que la duración del proceso acrecional mismo. A partir de esta fecha se inició un proceso erosivo prácticamente permanente, y cada vez más intenso de la playa subaérea, como lo indican los valores de N_0 cuyo promedio es cercano a 5. Esto se manifiesta claramente en la erosión observada en todos los perfiles de playa (figura 17), como ya se ha discutido con anterioridad.

El principal factor de degradación de la playa en el periodo del 28 de diciembre de 1997 al 28 de enero de 1998 parece estar asociado principalmente al transporte perpendicular de arena, con un sentido predominante de tierra a mar. El transporte de arena en sentido paralelo a la playa pudiera estar enmascarado por la cantidad de arena que se mueve desde la parte interna de la posplaya hacia la parte posterior de la zona de rompiente. En base al ángulo de aproximación promedio del oleaje a las playas de Rosarito uno pudiera esperar un transporte de arena paralelo a la playa hacia el noroeste, y por tanto mostrar un acumulación de arena en el lado sur del espigón de la CFE, lo cual no se observa. Aún más, todos los perfiles de playa adyacentes al norte y al sur de las estructuras de la CFE muestran una disminución del volumen de arena y una reducción, en lo general, del ancho de playa.

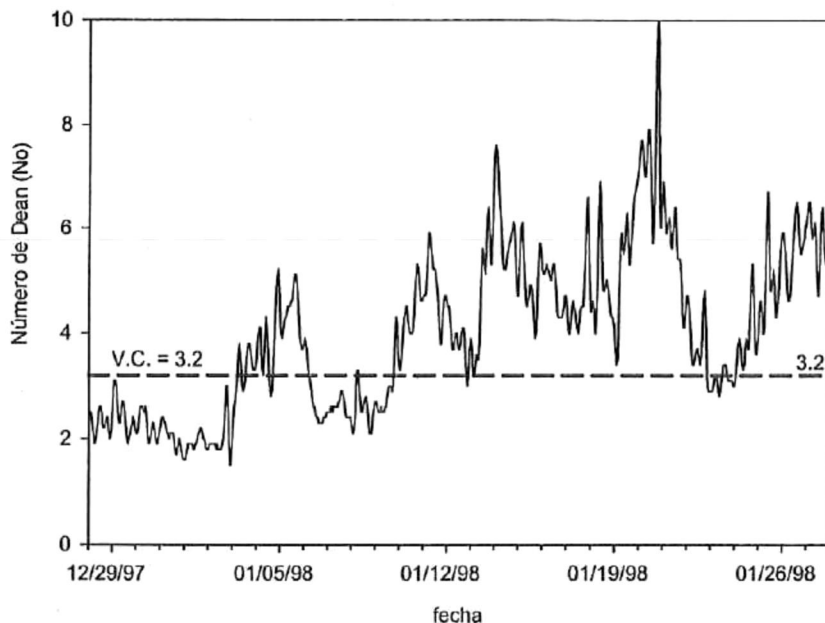


Figura 20. El valor del número de Dean por arriba del valor crítico (V.C. =3.2) indica un proceso continuado de erosión de la playa a partir del 10 de enero de 1998.

La estimación cuantitativa del volumen de arena que se mueve en sentido paralelo a la playa es, hasta este momento, incierto, ya que los modelos para estimarlo son sensibles al ángulo que forman las olas rompientes con la línea de playa. Por tanto, es de esperarse que los cambios de dirección en el viaje de las olas inducidos por la compleja topografía submarina y la presencia de las Islas Coronado puedan inducir variaciones incluso entre puntos a lo largo de la playa separados en tan sólo algunas decenas de metros, haciendo necesario tener una mejor caracterización del oleaje, y sobre todo de su ángulo de aproximación, a lo largo del litoral de Rosarito.

Por otra parte, la elevación del nivel del mar (marea + set up) que determina la mayor o menor incursión de las olas hacia la parte posterior de la playa y la potencial erosión/acreción de la misma, no es determinante para la mayoría de los perfiles hacia el sur del rompeolas. Esto se debió a que la altura de la cresta de la berma fue ligeramente superior al nivel alcanzado por el nivel

del agua (2.7 m) evitando el rebase de las olas hacia la parte interior de posplaya y la erosión de la misma. Sin embargo, la erosión en la cara de la playa posibilitaría un impacto mayor de las tormentas que se sucedieron en los siguientes días.

6.1.3.3.- Periodo del 28 de enero al 27 de febrero de 1998.

En la figura 21 se presenta el cambio de volumen en cada uno de los puntos de control para el periodo del 28 de enero al 27 de febrero de 1998. Se puede notar que en este periodo ocurrió la más severa erosión de playa en todos los perfiles de playa, excepto en el S12. La remoción máxima de arena de la playa subaérea osciló entre 90 y 110 m³/m en los perfiles N11 al N07, en el norte del rompeolas, y en el BN10 y BN11, al sur del mismo. Es interesante hacer notar que estos perfiles en particular no están limitados hacia tierra por estructuras o cantiles que interaccionen con el oleaje.

La erosión en los perfiles ubicados más al norte (BN01 al BN04) ocasionó la remoción total de arena haciendo emerger una plataforma rocosa (ver figura 26b), expuesta en marea baja, y depósitos de canto rodado previamente cubiertos por arena. El descubrimiento del fondo rocoso y la presencia de canto rodado indica que la altura total de la playa, esto es, el espesor del depósito arenoso es alrededor de sólo 3 m. De aquí que se puede concluir que la capacidad de almacenaje de arena por la playa no sólo está limitada por la presencia de muros costeros, que evitan la contribución al sistema litoral de material proveniente de los cantiles, sino que también está limitada por la presencia del fondo rocoso en estas playas. Por esta razón, a pesar de la ocurrencia de oleaje altamente erosivo en estos puntos de control, la reducción de volumen de arena sólo fue de entre -20 y -30 m³/m.

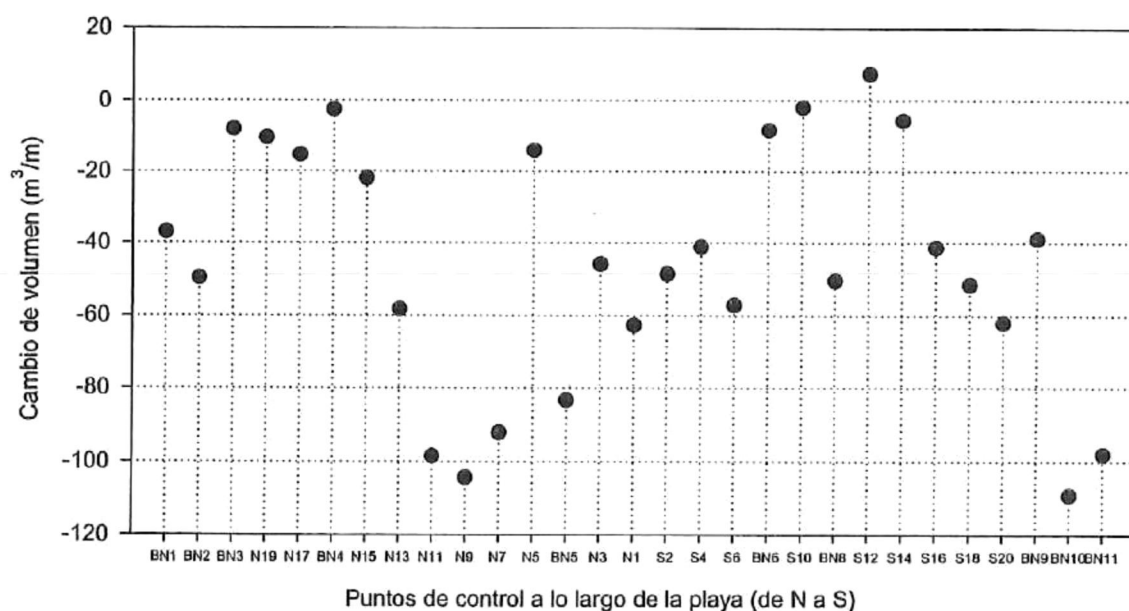


Figura 21. Cambio de volumen del 28 de enero al 26 de febrero de 1998 en todos los perfiles de playa.

Como se muestra en la figura 22, el ancho de playa también mostró un patrón similar al del volumen y se puede observar claramente que en este periodo los puntos de control en donde se registraron las mayores disminuciones del ancho de playa fue en aquellos en donde también se registraron los mayores volúmenes de erosión (N11, N09, N07, BN10 y BN11). Es importante hacer notar que en seis de los perfiles se observó un aumento del ancho de playa, lo cual pudiera ser una consecuencia de la redistribución de arena, desde la posplaya hacia la anteplaya o inclusive a la terraza de baja marea, que se ve reflejado también en una pendiente más suave del perfil de playa como se ilustra en la figura 23, donde también se muestra que el aumento del ancho de playa no necesariamente indica el aumento de volumen de arena en la playa.

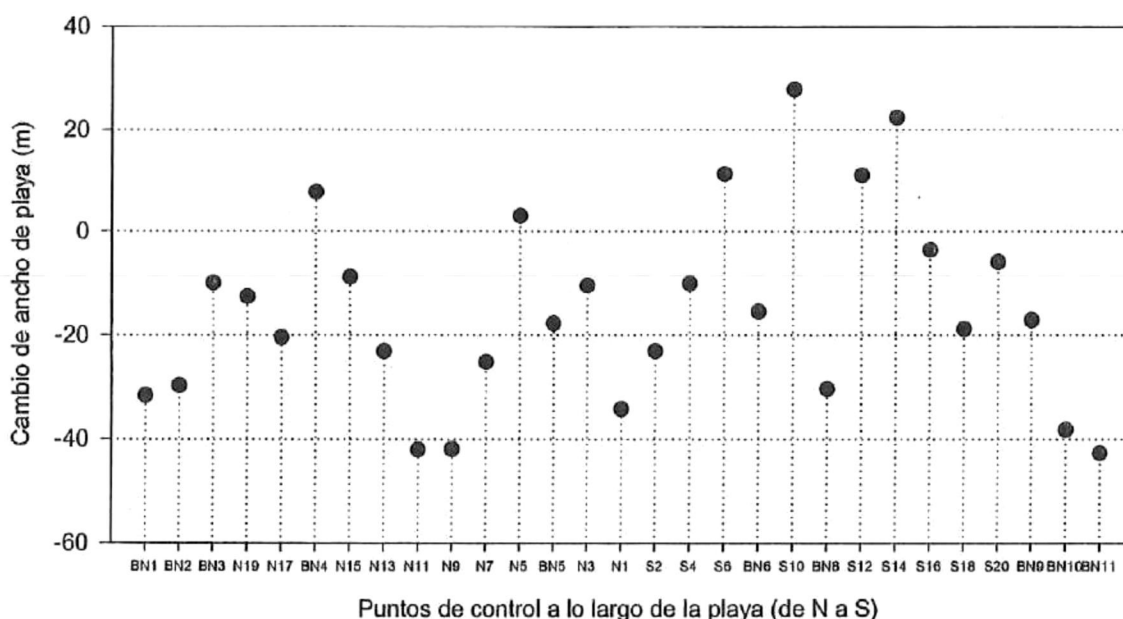
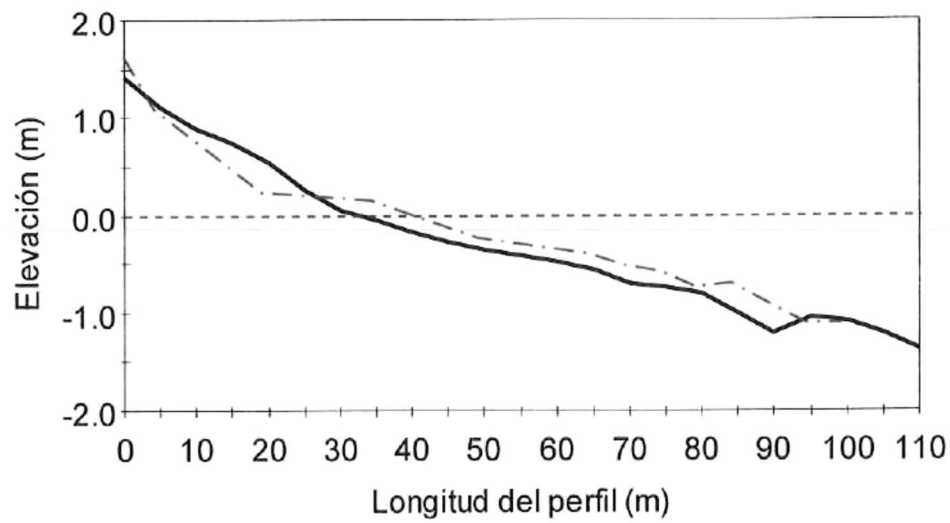
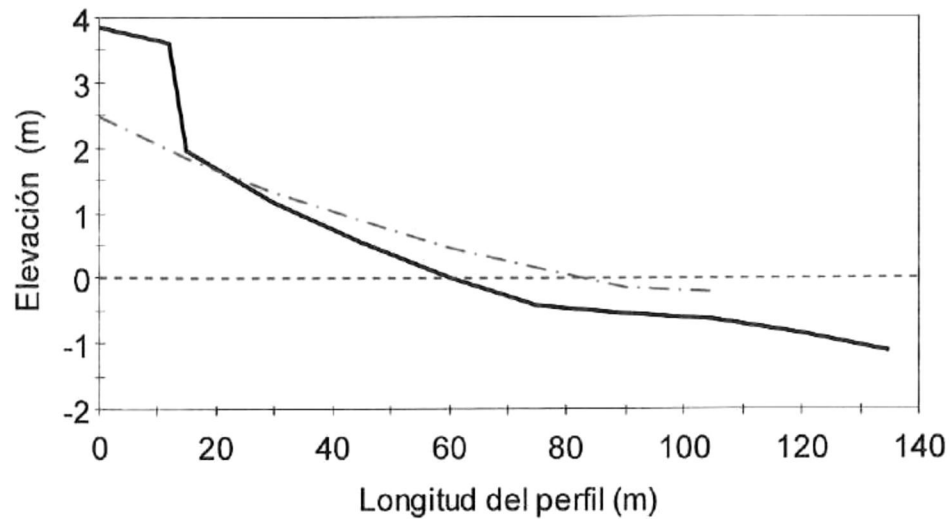


Figura 22. Cambio del ancho de playa del 28 de enero al 26 de febrero de 1998 en todos los perfiles de playa.

Los valores mínimos de volumen y ancho de la playa subaérea que se registraron en este periodo están asociados a la ocurrencia de eventos de oleaje extremo. Las condiciones excepcionales de oleaje se ilustran en la figura 24 para el periodo del 28 de enero al 28 de febrero de 1998. En esta figura se pueden diferenciar nueve eventos de tormenta, los cuales se enlistan en la tabla 4 donde se muestra su correspondiente altura máxima (H_s), duración (d) y periodo promedio (T_z). De excepcional intensidad y duración resultó ser la tormenta del 16 de febrero, que mantuvo 72 horas de ataque continuo con olas cuya altura promedio fue de 3.6 m. La inclusión de la curva del nivel del mar en la figura permite observar que las tormentas de los días 30 y 31 de enero y las del 8 y 24 de febrero coincidieron con mareas vivas; por el contrario, las tormentas del 3 y 16 de febrero ocurrieron durante el periodo de mareas muertas. La influencia de estas combinaciones de altura de ola y nivel de marea sobre el perfil de playa se discute a continuación.



(a)



(b)

Figura 23. Aumento del ancho de playa asociado a la contribución de arena proveniente de la posplaya observados en los perfiles BN04 (a) y S14 (b) entre el 26 de enero (línea continua) y el 27 de febrero de 1998 (línea punto línea).

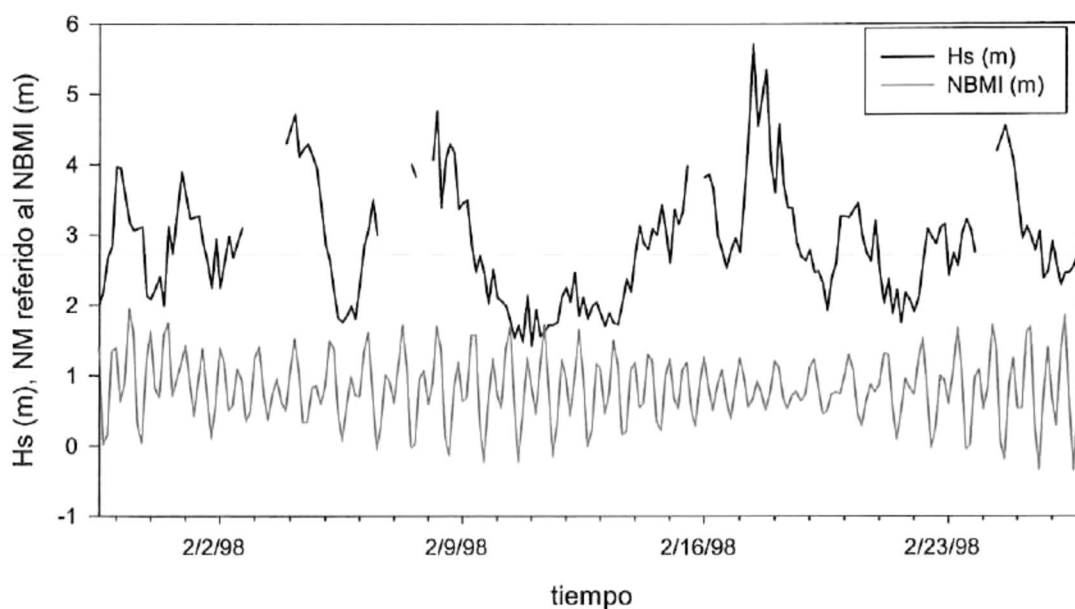


Figura 24. Oleaje y marea medidos en Rosarito del 28 de enero al 28 de febrero de 1998

Tabla 4. Eventos identificados como excepcionales durante el mes de febrero de 1998

Fecha	Hs max	Duración (h)	Tz prom
30-Jan-98	3.97	24	14.0
31-Jan-98	3.89	27	14.1
04-Feb-98	4.71	30	11.8
06-Feb-98	3.5	9	10.3
07-Feb-98	4	3	12.0
08-Feb-98	4.76	27	12.5
14-Feb-98	3.98	36	11.7
16-Feb-98	5.71	72	13.0
24-Feb-98	4.54	30	11.8

Durante los días 30 y 31 de enero de 1998 las olas con altura superior a 3 m coincidieron con niveles elevados del mar (entre 1.5 y 1.9 m sobre el NBMI) por lo menos durante 7 horas consecutivas; aunque olas con 3.7 m de altura coincidieron con marea de 1.4 m de amplitud con respecto al NBMI. Por otro lado, se estimó que la sola influencia de las olas produjo sobre-elevaciones del nivel del

mar sobre la cara de la playa de entre 0.7 y 1.25 m, que al combinarse con la elevación máxima de la marea, tuvo como consecuencia que el nivel absoluto del mar rebasara, en tres ocasiones en dos días consecutivos, los 2.5 m, como se indica en la figura 25 en la que se muestra el nivel del mar resultante de la combinación de el nivel de la marea y la sobre-elevación inducida por las olas.

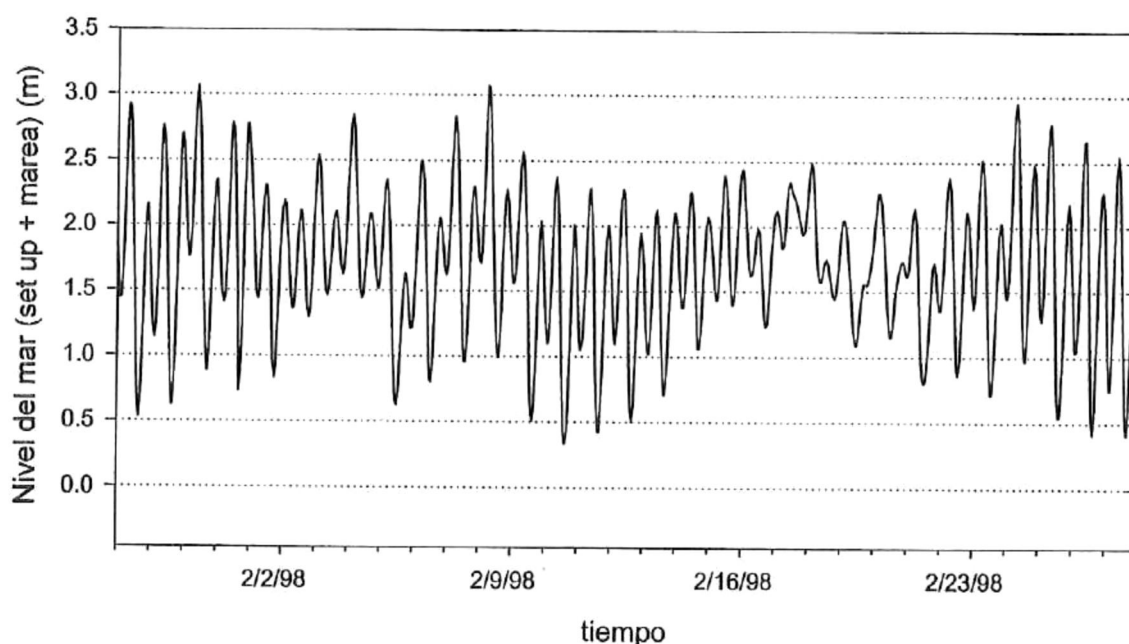


Figura 25. Elevación estimada del nivel del mar bajo condiciones extremas de oleaje en Rosarito durante el mes de febrero de 1998.

Como se puede observar, la reducción del volumen de arena, ancho de playa y elevación del perfil inducida por las condiciones de oleaje previas al 28 de enero 1998, se agudizaron debido a la combinación de marea viva y sobre-elevaciones considerables durante las tormentas de finales de enero de 1998. En otras palabras, niveles del mar por arriba de los 2.5 m dieron lugar a que la(s) berma(s) que resistieron las tormentas anteriores fueran rebasadas y destruidas en esta ocasión por las olas rompientes, facilitando su incursión hacia regiones más internas de la posplaya, teniendo como consecuencia daños a la infraestructura costera. En la figura 26 se ilustra como (a) la incursión de las olas alcanza la parte más interna de la playa de manera que inunda las vialidades y residencias en la localidad y (b) el desplazamiento del muro de protección de una

propiedad, ocasionado por el oleaje de altura extrema, y la consecuente destrucción de la residencia. De igual manera, la reducción de la altura del perfil, hasta de 3.5 m, dejó al descubierto voluminosos desechos de la industria energética y afloramientos rocosos en la parte norte del área de estudio, como se ilustra en la figura 27 (a y b).

En la figura 28 se presenta el número de Dean durante el periodo del 28 de enero al 27 de febrero de 1998. Es evidente que no sólo no existió un sólo día en este periodo en el que fuera probable la acreción de arena en la playa subaérea, sino que también es evidente que el valor crítico de N_0 es ampliamente excedido por la intensidad de la energía de las olas. De los altos valores del número de Dean se puede inferir que se presentó una intensa erosión, no sólo de la anteplaya sino desde la parte más interior de la posplaya; de esta manera, es de esperar que la arena removida se acumulara en la parte cercana a la costa, atrás de la zona de rompiente. Esto fue verificado, circunstancialmente por Ramos et al (2001) quienes encontraron que en estos días hubo una rápida acumulación de arena de hasta 1.15 m de altura a 18 m de profundidad, donde se ubicó un sensor para el registro de olas el cual fue cubierto en su totalidad por la arena en esa posición. Esta acumulación de arena también fue constatada por el grupo de mantenimiento de tuberías marinas de la CFE.

En la figura 29 se presenta la comparación del cambio de volumen de arena (a) y ancho de playa (b) entre octubre y diciembre de 1997; entre octubre de 1997 a enero de 1998 y entre octubre de 1997 a febrero de 1998. El segmento de playa entre los puntos de control N13 y N07, así como en el BN11, se presentó el máximo volumen de erosión de arena, alrededor de 150 y 180 m³/m, mientras que la máxima disminución del ancho de playa fue entre 70 y 74 m en el N11 y BN11 respectivamente. En la figura 30 se ilustra como las diferencias significativas en los cambios de volumen se presentaron entre octubre 1997 y diciembre 1997, entre octubre 1997 y febrero 1998 y entre enero 1998 y febrero

1998. Las diferencias significativas en los cambios del ancho de playa siguieron un patrón similar al del volumen.



(a)



(b)

Figura 26.- Efecto de oleaje de tormenta en febrero de 1998 en la costa de Rosarito: (a) inundación de infraestructura costera adyacente y (b) destrucción de residencias ubicadas sobre la playa misma.



(a)



(b)

Figura 27.- El alto nivel energético de las tormentas de febrero de 1998 dieron lugar: (a) al descubrimiento de desechos de la industria energética y (b) la remoción total de la arena de la playa descubriendo el lecho rocoso en playas cercanas al BN03, hacia el norte del rompeolas.

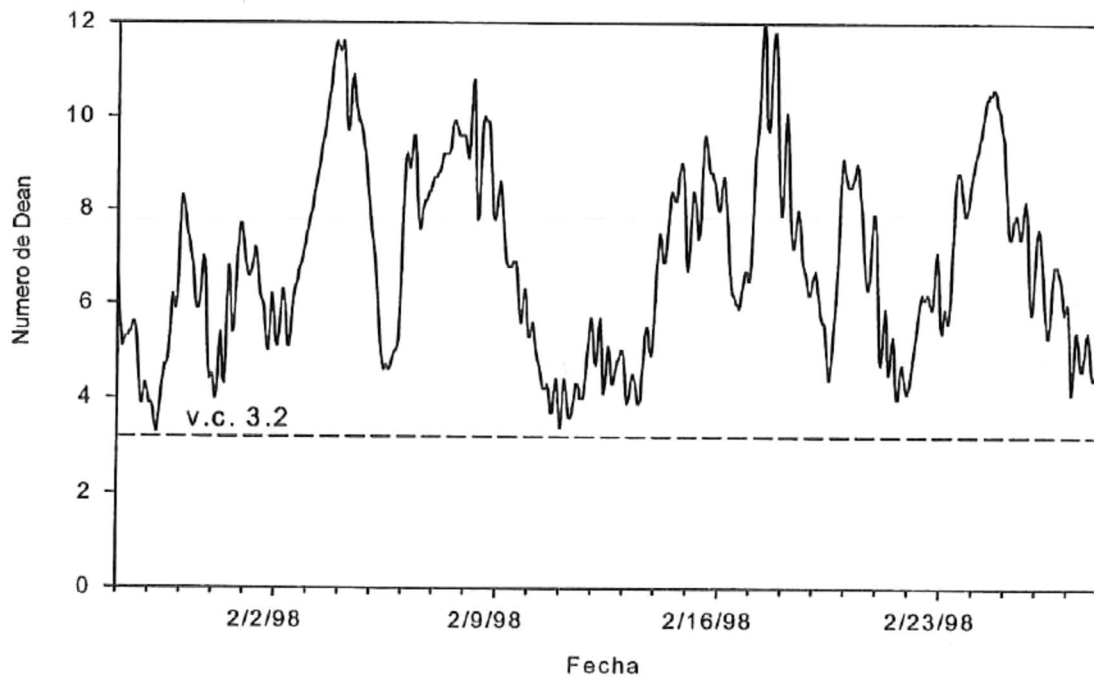
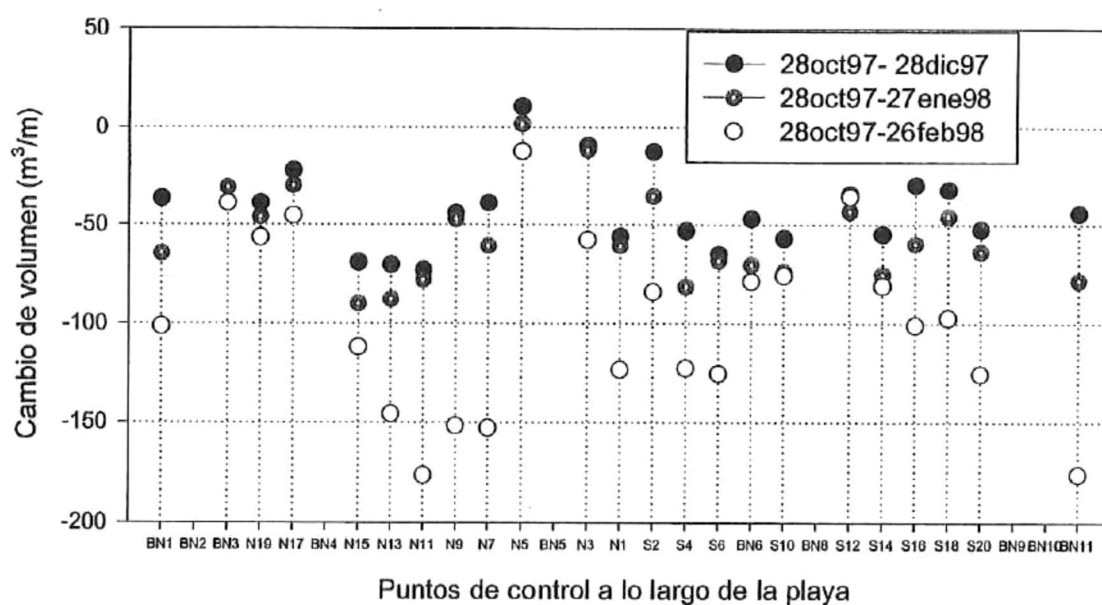


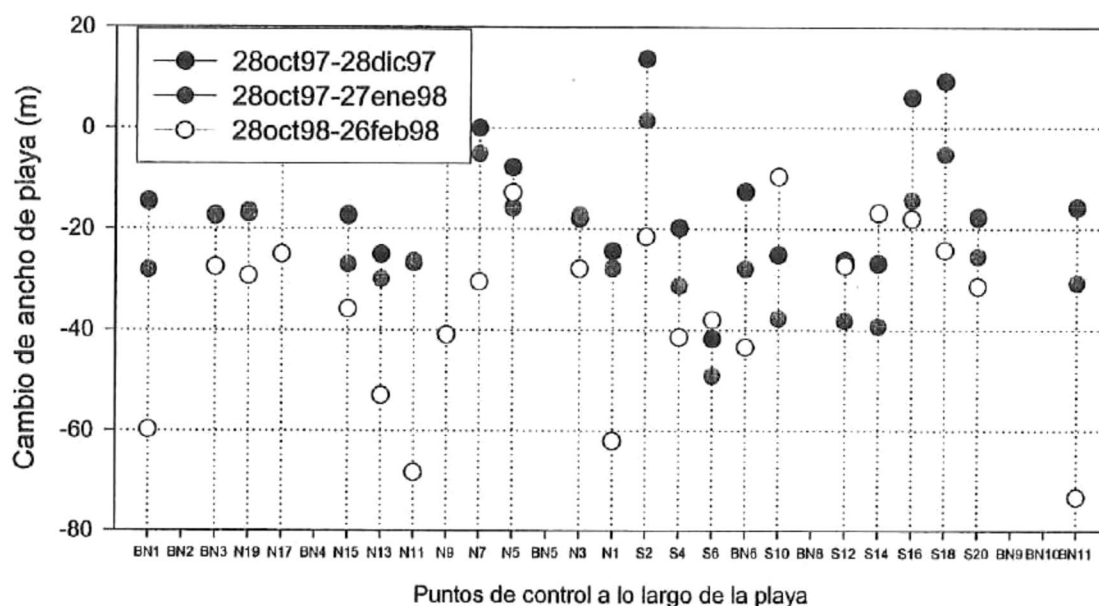
Figura 28.- Variabilidad del número de Dean durante el periodo del 28 de enero al 27 de febrero de 1998. Conforme al valor crítico (3.2) propuesto por Larson y Kraus (1989), todos los valores de N_0 exceden este valor, indicando una alta probabilidad de erosión de la playa.

De nueva cuenta, en esta figura 29 (a y b) también se hace evidente la poca variabilidad del volumen y del ancho de playa en los puntos de control que tienen muros costeros al pie del cantil (BN02 al BN04) o frente a muros que regularmente interaccionan con las olas (S06, BN06 y S12). Este comportamiento hace evidente que la erosión de la playa, como respuesta al arribo de tormentas excepcionales, es simultánea, aunque de diferente magnitud, a lo largo de la playa bajo estudio.

Una revisión de los levantamientos quincenales de perfiles de playa de la base de datos de la UABC muestra que durante el periodo del 28 de enero al 10 de febrero de 1998 se presentaron las mayores tasas promedio diarias de cambio del volumen y ancho de playa, independientemente de su ubicación con respecto al estructuras costeras de la CFE, con valores de $-3.2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{día}$ y de $-1.4 \text{ m}/\text{día}$ respectivamente. Para ilustrar la rapidez de estos cambios, en la tabla 5 se



(a)



(b)

Figura 29.- Cambio acumulado de volumen de arena (a) y ancho de playa (b) con respecto al 28 de octubre de 1997.

presentan las tasas de cambio inmediatamente posteriores al 10 de febrero de 1998. Las tasas obtenidas comparando los datos mensuales sólo indican una tasa de de cambio de volumen de $-1.5 m^3/m/día$ y de $-0.5 m/día$. De lo anterior se

desprende que las condiciones excepcionales de olas y niveles del mar del periodo del 28 de enero al 10 de febrero de 1998 ocasionaron la más intensa erosión de playa en Rosarito y que para determinar con mayor nitidez la influencia de eventos extremos sobre la playa subaérea es conveniente reducir el intervalo temporal de muestreo de perfiles de playa. La tabla 5 también muestra que a partir del 26 de febrero de 1998 se inicia lentamente el proceso de reconstrucción de la playa.

Tabla 5.- Tasas de cambio de volumen y ancho de playa para los diez perfiles de playa de la base de datos de la UABC con intervalo de muestreo de 15 días.

Periodo	Tasa de cambio de volumen promedio ($\text{m}^3/\text{m}/\text{día}$)	Tasa de cambio de ancho de playa promedio ($\text{m}/\text{día}$)
27enero al 10 febrero 98	-3.23	-1.42
10 febrero al 26 febrero 98	-0.48	-0.3
26 febrero al 10 marzo 98	+0.22	+0.05

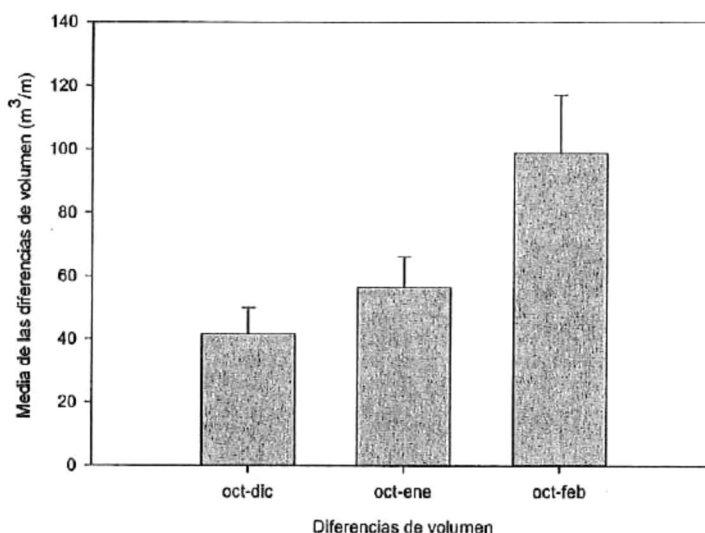


Figura 30. Los cambios de volumen entre octubre-diciembre con respecto a octubre febrero así como las diferencias entre octubre-enero y octubre-febrero indican cambios significativamente diferentes al 95%. Los cambios no significativos corresponden a los que se observan entre octubre-diciembre y octubre-enero.

6.1.4. Conclusiones.

Con base en lo anterior, se puede concluir que la ocurrencia consecutiva de tormentas desde finales de diciembre de 1997 hasta finales de febrero de 1998 constituyó un evento excepcional que influyó sustancialmente en la morfología y características de las playas de Rosarito. En particular, el oleaje de las tormentas de los últimos días de enero y los primeros diez días de febrero de 1998 fue el factor responsable de las más grandes transformaciones de las playas en Rosarito para el periodo de enero de 1996 a diciembre de 2002.

Por otro lado, fue posible observar que la respuesta espacial de la playa es simultánea, aunque no de la misma magnitud a lo largo de Rosarito, incluyendo las playas cercanas al rompeolas y espigones de la CFE, así como a playas frente a muros costeros que protegen el pie del cantil o la propiedad.

La capacidad de almacenamiento de arena en las playas de la región norte del área de estudio (BN01 al BN04) es menor que la de las playas al sur del rompeolas de la CFE. En las primeras, el espesor máximo del depósito arenoso no es mayor de 3 m debido a (a) la presencia de muros costeros, que no permiten intercambio de material sedimentario entre el cantil y la playa y (b) la presencia de plataformas rocosas subyacentes que actúa como frontera inferior del depósito arenoso. En contraste, las playas al sur son playas más anchas y aunque existe la presencia de numerosos muros costeros, éstos prácticamente no tienen interacción con las olas, facilitando así la formación de posplayas amplias.

Por otra parte, el descubrimiento de depósitos de grava y canto rodado durante la época invernal constituye un importante factor de protección a la propiedad ya que presentan una mayor acumulación sobre la playa cuando ocurren olas altas y son un efectivo dissipador de energía de las olas rompientes; es necesario profundizar en el estudio de estos depósitos.

El número de Dean resultó ser un buen predictor de la remoción/acreción de arena de la playa subaérea en base a las condiciones de oleaje. La excedencia del valor crítico del número de Dean indicó claramente que los efectos del transporte de arena desde la playa hacia la zona de rompiente resultó ser más marcado que el transporte de arena en sentido paralelo a la playa. Derivado de la acumulación de arena por atrás de la zona de rompiente ocasionado por las tormentas excepcionales se puede estimar que la profundidad de movimiento activo de sedimentos es, por lo menos, un poco mayor de 18 m.

En base a la información analizada en este trabajo la sobre-elevación del mar inducida por las olas en combinación con estadios de marea alta fueron los responsables de inundaciones costeras con consecuentes daños a la infraestructura. Por primera vez se documenta el impacto de tormentas excepcionales en la región de Rosarito cuyos efectos dieron lugar a la remoción de hasta $180 \text{ m}^3/\text{m}$ de arena en un periodo de tan sólo dos meses, retrocesos del ancho de playa de hasta 70 m y reducciones hasta de 3.5 m en la altura del perfil de playa. Las tasas de cambio de volumen de arena y ancho de playa ocasionadas por eventos excepcionales pueden alcanzar valores hasta de $3.2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{día}$ y disminuciones del ancho de playa hasta de 1.4 m/día. Estos resultados son de suma importancia ya que aportan por primera vez información valiosa, e inexistente la mayoría de las veces, para el diseño de estructuras costeras, como muros o andadores turísticos, que dicho sea de paso existe evidencia de que se planean desarrollar en el corto plazo en Rosarito.

6.2.- Cambios de playa de mediano plazo.

Los cambios de playa de mediano plazo están asociados a episodios cíclicos o recurrentes de erosión y acreción que ocurren en intervalos de tiempo más o menos regulares y cuya periodicidad depende en gran medida de la periodicidad del agente forzante. El cambio cíclico de mediano plazo más común es el anual y responde, en lo general, al régimen estacional de oleaje. La estacionalidad está asociada regularmente a períodos en los que arriban olas de altura baja versus periodos en los que las olas son de mayor altura, como en el verano e invierno respectivamente.

Los cambios cíclicos interanuales pueden estar asociados a comportamientos diferentes de un mismo factor forzante, por ejemplo, la variabilidad de la precipitación pluvial de un año a otro, con consecuencias en la cantidad de arena que es incorporada al sistema litoral, o el número y severidad de las tormentas que ocurren de un año a otro, etc. y cuya periodicidad puede ser del orden de algunos años o bien una combinación de estos y otros factores.

Para estudiar la variabilidad en escala de mediano plazo, estacional e interanual y los principales periodos de recurrencia, la herramienta de análisis espectral es la más adecuada ya que tiene la ventaja de distinguir claramente las periodicidades más significativas en los datos. Actualmente no se tiene conocimiento de la importancia relativa de los factores que inducen los cambios de las playas en el mediano plazo en la región de Rosarito. Sin embargo, los cambios de corto plazo pueden tener una influencia relevante en los cambios de mediano y de largo plazo (Fenster et al., 2001).

Para facilitar la presentación de los resultados y discusiones de los cambios de mediano plazo, el área de estudio se dividió en cuatro segmentos de playa como se señalan en la figura 31. Esta división responde a diferencias morfológicas y de uso de suelo que pueden influir en los procesos de

erosión/acreción y que de manera sucinta se indican a continuación: el *segmento de playa norte*, caracterizado por la presencia de extensos muros costeros que protegen el pie del cantil y material formador de playa constituido por gravas y arenas; el *segmento de playa intermedio norte*, que se caracteriza por tener una playa relativamente ancha con un pequeño campo de dunas en la parte posterior de posplaya; el *segmento de playa intermedio sur*, caracterizado por la presencia intercalada de residencias sobre la posplaya y en algunos casos, hasta la cara de la playa a lo largo de la zona de estudio, y por último, el *segmento de playa sur*, que presenta las playas relativamente más anchas y, además, existen escasos muros de protección los cuales usualmente no interactúan con las olas.

Para cada uno de estos cuatro segmentos se identificaron y analizaron los puntos de control que incluyen y para facilitar la ubicación de los mismos, en la figura 31 sólo se etiquetan algunos de ellos. Para cada punto de control se presenta la serie temporal de volumen y las principales frecuencias o periodos de recurrencia. También se estima la magnitud de la contribución al cambio de playa de los principales periodos de recurrencia y se explican los factores forzantes asociados. A continuación se discuten los resultados para cada uno de los segmentos.

6.2.1 Segmento de playa norte:

El segmento de playa norte comprende desde San Antonio del Mar (BN01), en el límite norte del área de estudio, hasta el N15 a 1500 m al norte del rompeolas de la CFE (figura 31). La serie temporal del cambio de volumen y su respectiva transformación al dominio de frecuencia para cada uno de los perfiles comprendidos en este segmento de playa se muestran en la figura 32.

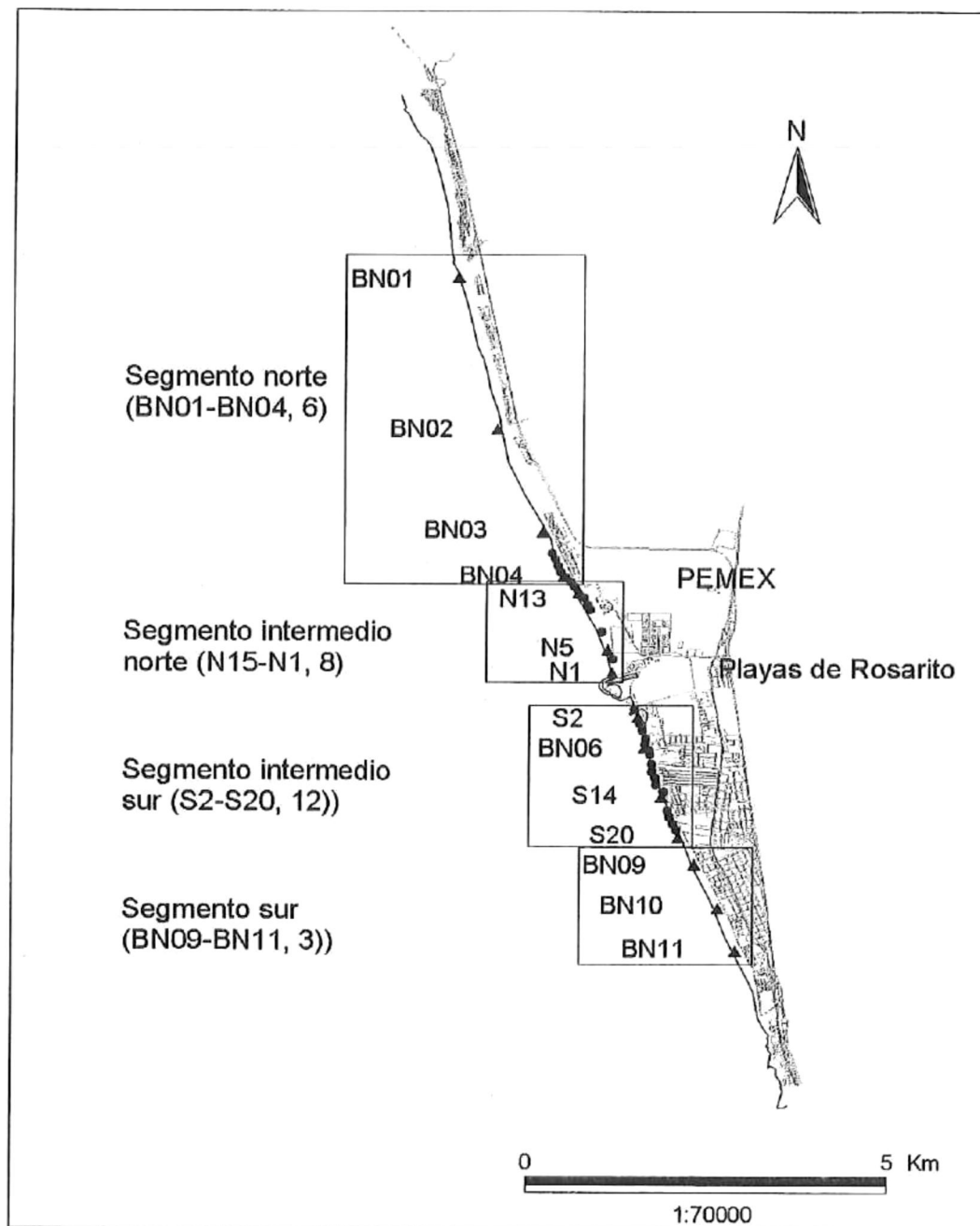


Figura 31. Definición de segmentos de playa y los puntos de control que los componen a lo largo de la zona de estudio. Para facilitar su ubicación, sólo se etiquetan algunos puntos de control.

De las series temporales de volumen que se muestran en la figura 32a, se observa una bien definida secuencia de valores máximos y mínimos; estos valores presentan variaciones en tiempo y magnitud. Por ejemplo, en algunos perfiles el máximo volumen de arena puede ocurrir en un año al inicio del verano, por ejemplo julio, mientras que al siguiente año puede ocurrir a finales del verano, o incluso inicios del otoño (por ejemplo octubre). De manera análoga, la amplitud del cambio estacional puede ser diferente de una localidad a otra y también a través del tiempo para una misma localidad.

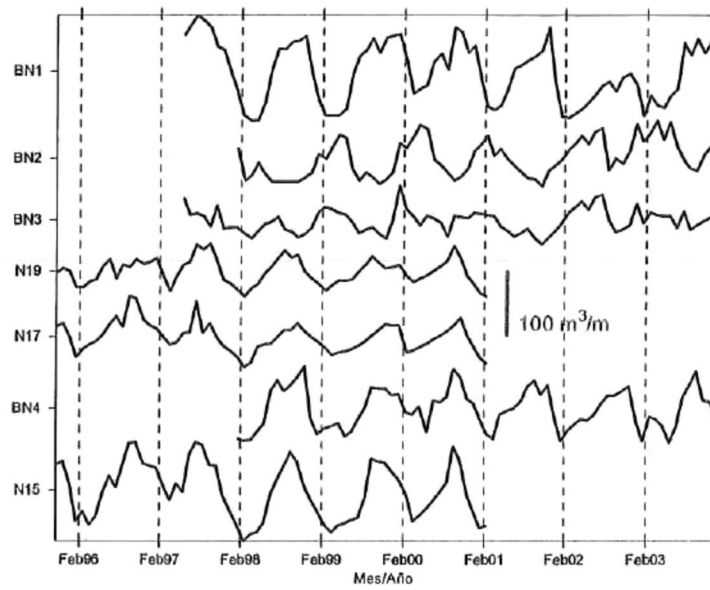
Es importante hacer notar que los perfiles de playa correspondientes a los puntos de control BN02 y BN03 mostraron en general un patrón diferente de cambio de volumen de arena que al resto de los perfiles en toda la playa (figura 32a) ya que en el invierno los perfiles muestran que la playa contiene un mayor volumen de arena comparado con el que tiene durante el verano. Es importante resaltar que este tipo de comportamiento, mayor volumen de arena en invierno en comparación a la cantidad de volumen de arena en verano, no es algo que sea común a todas las playas. Mucho menos es común que se presente de manera simultánea en una playa extensa con un alto grado de exposición al oleaje (Masselink y Pattaratchi, 2001).

La respuesta temporal observada en estos perfiles (BN02 y BN03), muestra que el ciclo “normal” de playa se encuentra invertido con respecto al resto de los perfiles a lo largo de la zona de estudio, y que es durante el verano que la playa en estas localidades contiene un menor volumen de arena. Considerando que las condiciones de oleaje al acercarse a la costa son similares, por lo menos a las que ocurren en la cercanía de los perfiles inmediatos al sur y que no muestran este comportamiento, es razonable hipotetizar que en algunas playas de Rosarito no siempre la estacionalidad en el régimen de oleaje explica en su totalidad la regularidad del ciclo estacional en el perfil de playa como lo señalan Masselink y Pattiaratchi (2001) lo que indica que pueden intervenir otros factores, como la morfología local de la playa y el transporte litoral, que integrados

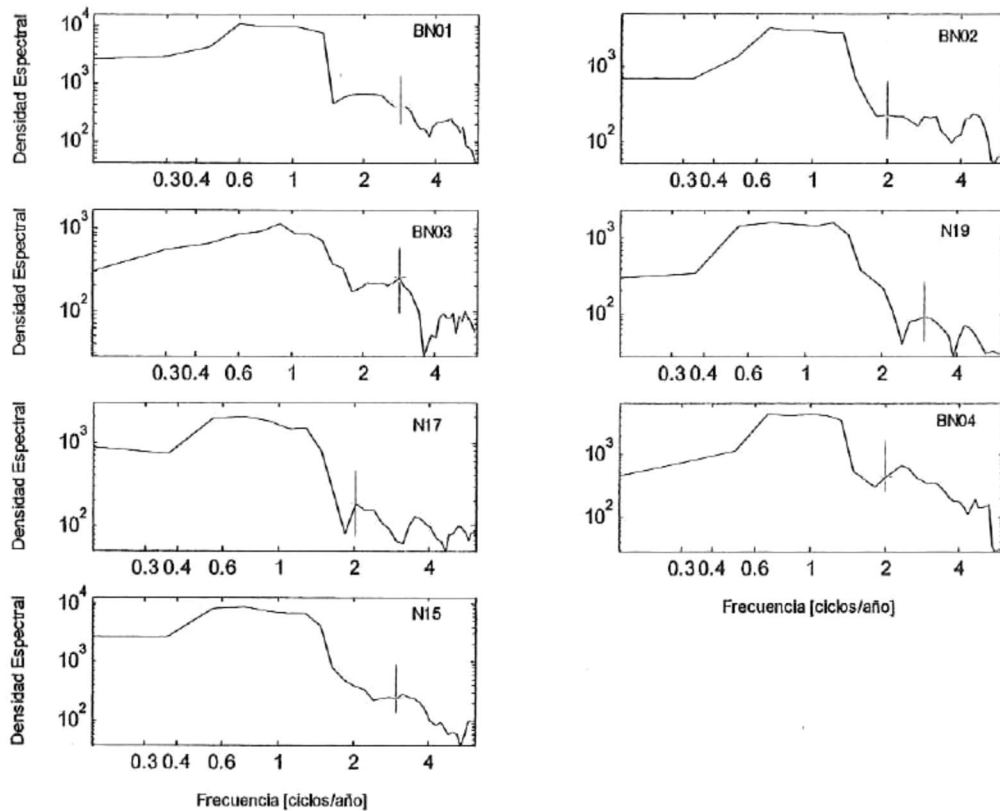
pueden ocasionar este comportamiento. Más adelante en esta misma sección se discutirá y se hará una prueba a esta hipótesis.

El hecho de que por primera vez se esté documentando este comportamiento para algunas playas de Rosarito le da una relevancia particular a este trabajo, ya que son pocas las playas en el mundo que lo presentan (Masselink y Pattiaratchi, 2001). Además, este comportamiento debe ser cuidadosamente evaluado y considerado en segmentos de playa en los que se pretenda ampliar, mejorar o construir obras de protección costera en las playas de Rosarito ya que su diseño y respuesta de la playa a estas condiciones pueden variar la funcionalidad de protección y recreación de las playas.

En todos los perfiles de este segmento de playa se observó que el volumen de arena varió alrededor de $120 \text{ m}^3/\text{m}$, con excepción de los puntos de control BN01 y N15, donde el volumen varió entre 150 y $200 \text{ m}^3/\text{m}$. Estas diferencias tan marcadas en los volúmenes de arena sobre la playa está asociada al hecho de que los puntos de control BN02, BN03, N19, N17 y BN04, son los que tienen menos arena en la playa, presentan un muro construido a lo largo de la playa con el objeto de proteger la propiedad y, además, presentan playas rocosas que afloran cuando hay una erosión intensa de la arena de la playa; adicionalmente, en las cercanías de los puntos de control BN02 y BN03 se encuentran grandes depósitos de canto rodado que reducen la cantidad de arena sobre la playa. La combinación de todos estos factores dan lugar a que la capacidad de almacenamiento de arena en la playa esté limitada. Con base a la comparación de perfiles dentro de este segmento en diferentes temporadas se puede concluir que el grosor de la playa arenosa en esta zona no es mayor de 3 m.



(a)



(b)

Figura 32. Serie temporal (a) y espectro (b) del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento norte de Rosarito. En el espectro de volumen de cada punto de control se indica el intervalo de confianza al 95%.

Es importante señalar que los picos correspondientes a la frecuencia anual en los espectros obtenidos de las series temporales de volumen de este segmento de playa son los más sobresalientes con respecto a los otros segmentos de playa. De menor amplitud, pero presentes en varios perfiles, se observan oscilaciones con periodos de 1.8 años (22 meses) en los puntos de control BN03 y N17 y 3 años (36 meses) en los puntos de control BN01, BN03 y N19. Conviene señalar que debido a que el número de datos con los que se elaboró el análisis espectral no fue mayor de 82 valores, la resolución en frecuencia (Δf) no permitió detectar con certeza los picos espectrales para determinadas frecuencias; por esta razón se consideró que un pico espectral con periodo de 11 o 13 meses, corresponde al periodo de 12 meses. De manera similar, los picos con periodo de 32 o 42 meses que se observan en algunos espectros, se consideran representativos de un periodo de 36 meses. La discusión y explicación de los cambios de playa en el mediano plazo con referencia a los picos espectrales de 12 meses y 36 meses (3 años) se presenta a continuación.

6.2.1.1.- Oscilación periódica anual

Para caracterizar el comportamiento de volumen de arena asociado al ciclo estacional definido en el espectro de volumen se eliminó la tendencia lineal de los datos y se utilizó la técnica del mejor ajuste por cuadrados mínimos para determinar la amplitud y fase correspondiente a cada uno de los principales modos de oscilación identificadas en el espectro. Con el propósito de evitar repeticiones innecesarias, en la figura 33 solamente se ilustra el ajuste de un seno con frecuencia anual para el BN01, ya que este patrón es similar para el resto de puntos de control en este segmento de playa. Los valores negativos de cambio de volumen en esta figura resultan de la eliminación de la tendencia lineal.

Para medir que tan bien se ajusta el seno con frecuencia anual a los datos se determinó el coeficiente de determinación (R^2) a partir de la relación

$$R^2 = SSR/SST$$

donde SSR es la suma de cuadrados de la regresión, esto es, la cantidad de varianza que se explica por el ajuste del modelo de regresión, y SST es la suma de cuadrados con respecto de la media, lo cual describe la varianza de los datos. De esta manera, mientras mayor sea el valor de R^2 mejor es el ajuste a los datos y por tanto explica un mayor porcentaje de la varianza de los datos.

En la tabla 6 se enlista la amplitud de la oscilación anual y el coeficiente de determinación correspondiente con el intervalo de confianza al 95% para cada uno de los puntos de control en este segmento de playa norte. Para el punto de control BN01 que se presenta en la figura 33, la componente anual del cambio de volumen es muy importante ya que explica el 58% de su variabilidad total y el volumen total de arena que es movido bajo la influencia de esta oscilación es de 91 m³/m. La menor contribución de este ciclo anual se presenta en el punto de control BN03, correspondiendo a un cambio de volumen total de aproximadamente 23 m³/m y sólo explica el 21% de la varianza total de los datos. Por el contrario, la mayor influencia se presenta en el punto de control N15, con un volumen total de 95 m³/m y explica el 64% de la varianza total de los datos.

En la tabla 6 se puede observar que las fechas en las que ocurren los valores máximos y mínimos de volumen de arena en los puntos de control BN02 y BN03 se invierten con respecto al resto de los puntos de control en este segmento de playa; la inversión estacional en el contenido de volumen de arena en estas playas no ha sido reportada con anterioridad para ningún segmento de playa en Rosarito o alguna otra playa de Baja California, por lo que su discusión y explicación se hará con detalle más adelante.

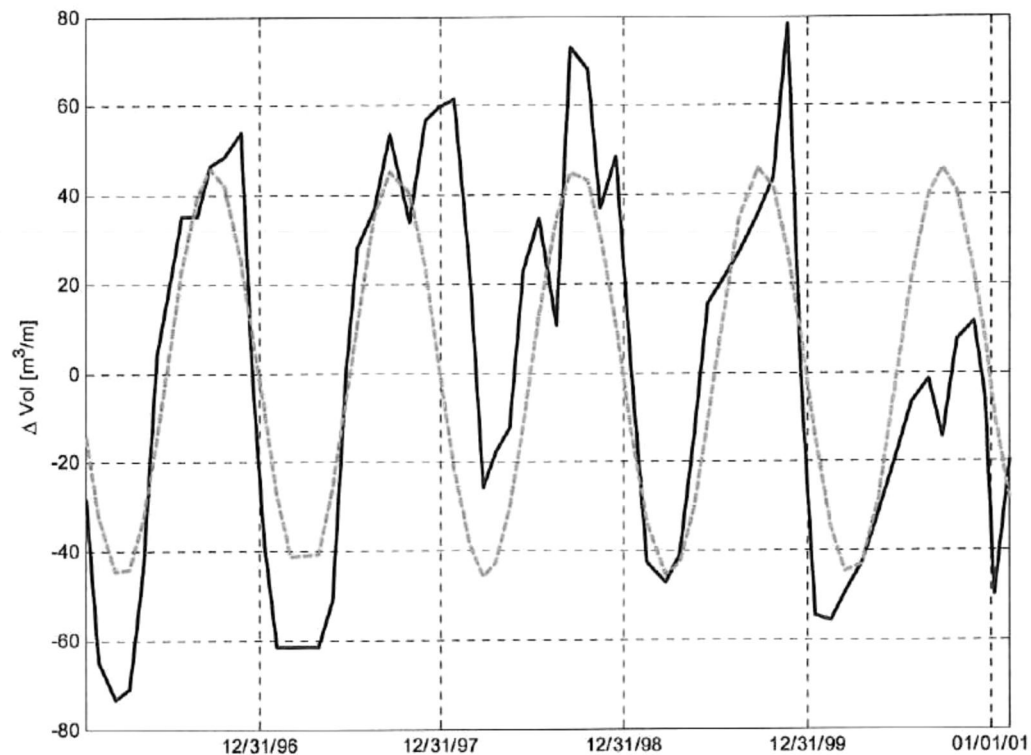


Figura 33. Ajuste por cuadrados mínimos de la componente anual (línea quebrada) y el cambio del volumen de arena sin tendencia lineal (línea llena) para el punto de control BN01.

Tabla 6. Características de la oscilación anual del volumen de arena para los puntos de control del segmento norte de Rosarito.

Punto de control	Amplitud (m ³ /m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor min.	R ²
BN01	45.8 ± 10.1	15 sep	27 mar	0.58 ± 0.16
BN02	25.7 ± 6.6	24 mar	18 sep	0.51 ± 0.18
BN03	11.3 ± 5.7	27 mar	19 sep	0.21 ± 0.17
N19	22.3 ± 4.5	28 ago	03 mar	0.62 ± 0.15
N17	22.3 ± 5.4	15 sep	03 mar	0.53 ± 0.17
BN04	32.5 ± 7.1	18 sep	24 mar	0.58 ± 0.16
N15	47.3 ± 9.1	19 sep	25 mar	0.64 ± 0.15

El cambio periódico en el volumen de arena como una respuesta al régimen estacional de oleaje ha sido señalado por varios autores (Thompson, 1987; Jiménez et al, 1997; Lacey y Peck, 1998; Short et al., 2000, entre otros). Debido a que esta asociación entre el cambio de volumen de arena y el oleaje se ha sugerido pero nunca probado para Rosarito, (Marmolejo-Lara, 1985, Rivera-Lemus, 2004). A continuación se trata de establecer si dicha relación verdaderamente existe en Rosarito, para lo cual se analiza primero la variabilidad estacional del oleaje.

6.2.1.1.1.- Estacionalidad del oleaje.

En la figura 34 se presenta el registro de olas obtenidos frente a la CFE (junio de 1994 a enero de 1999) en la que se observan vacíos de datos por lapsos hasta por un poco más de tres meses. Se puede apreciar la ocurrencia de olas más altas en los inviernos que en los veranos, sin embargo, debido a los lapsos en los que faltan datos no es posible el uso de la técnica de análisis espectral para determinar los principales periodos de recurrencia de la altura de las olas. Es de esperar que el patrón regional de oleaje en mar profundo frente a Rosarito se asemeje al que se mide en mar profundo por el CDIP (<http://cdip.ucsd.edu>) frente a la costa del sur de California. Por esta razón, para verificar la presencia de la oscilación anual de las alturas de ola, se analizaron estos últimos.

En la figura 35 se presentan los datos de altura de ola, prácticamente ininterrumpidos, medidos en mar profundo desde octubre de 1995 a diciembre de 2003 frente a Punta Concepción, California. En esta figura es evidente que, como en los registros frente a la CFE en Rosarito, las olas presentan mayor altura durante los meses de invierno (diciembre-marzo) y menor altura en los meses de verano (julio-septiembre). Aplicando la técnica de análisis espectral a la serie de alturas, se obtiene el espectro que se muestra en la figura 36, donde es evidente la fuerte presencia del ciclo anual. Este régimen está asociado a la permanencia o

desplazamientos de centros de alta y baja presión atmosférica como se explica a continuación.

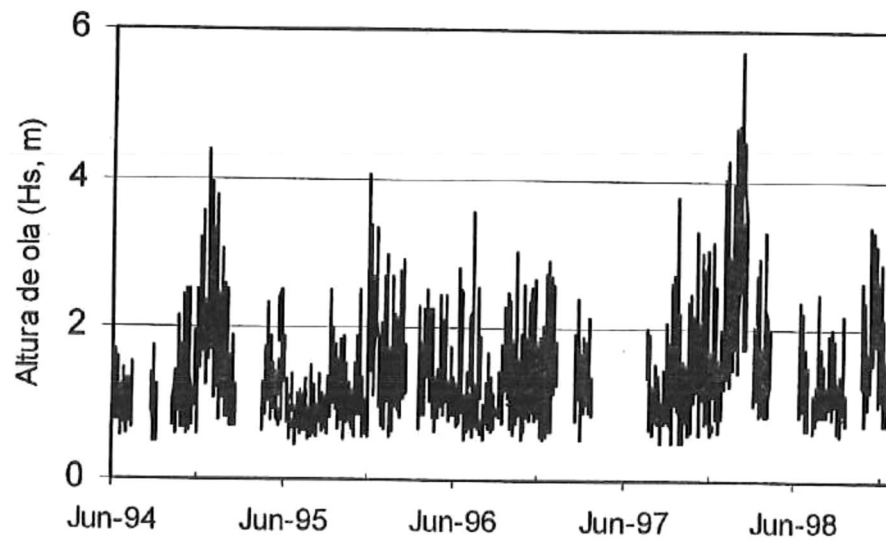


Figura 34. Registros de altura de olas frente a las instalaciones de la CFE en Rosarito para el periodo de junio 1994 a enero 1999.

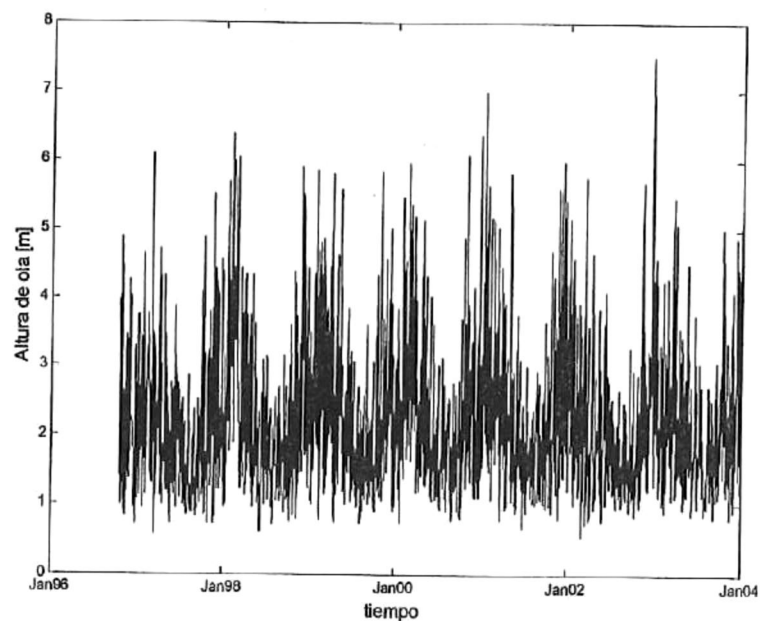


Figura 35. Altura de ola de octubre 1996 a diciembre 2003 registrada frente a Punta Concepción, California, EUA..

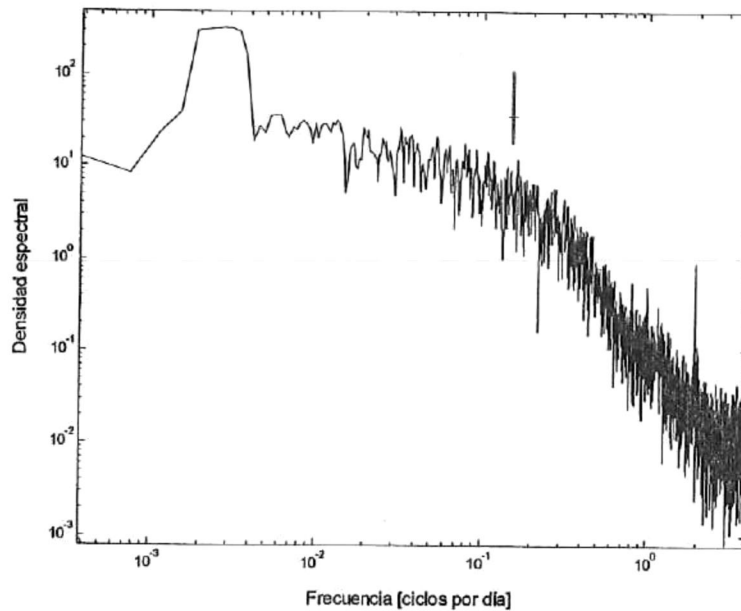


Figura 36. Espectro de la altura de ola registrada durante siete años frente a Punta Concepción, EUA. Se indica el intervalo de confianza al 95%.

6.2.1.1.2.- Condiciones de invierno.

Durante el invierno (noviembre-marzo), bajo condiciones “normales” (no Niño) en el Pacífico Norte, se presenta la relativa permanencia de un centro de alta presión en la región del Golfo de Alaska e Islas Aleutianas y un centro de baja presión en el sureste de Alaska y oeste de Canadá (Storlazzi y Griggs, 2000). La distribución de estos centros de presión generan ciclones que producen olas hasta de $H_s = 8$ m (Seymour, et al, 1984), que normalmente arriban a la costa oeste de Estados Unidos y noroeste de México, con direcciones entre 55°N y 30°S a partir de una línea perpendicular a la costa. Los ángulos de rompiente determinan la dirección en la que se lleva a cabo el transporte paralelo a la playa, y en términos locales pueden influir sustancialmente en la forma del perfil. Si bien el intervalo máximo de periodos que se registran es entre 5 y 20 s, los periodos entre 6 y 12 s son los que predominan. Esto indica que la contribución tanto del oleaje local (sea) como el del oleaje distante (swell) es importante (CCTWS, 1991).

En la región de Rosarito la transformación de las características del oleaje de mar profundo a las características en aguas cercanas a la rompiente es compleja debido a la presencia de las Islas Coronado, al NW de la zona de estudio, y a la irregular topografía submarina entre éstas y la costa (Martínez-Díaz-de-León et al., 2002). Los procesos de someramiento, difracción y refracción del oleaje por los factores arriba señalados dan lugar a la reducción de la altura de las olas, cuya frecuencia de ocurrencia considerando sólo olas que arriban durante la temporada de invierno se muestra en la figura 37. En esta figura se puede observar que aproximadamente 23% del total del oleaje de los inviernos (1995 a 1998) tiene una altura superior a 2.5 m mientras que olas con alturas superiores a 5 m presentan una frecuencia de ocurrencia del 0.2%.

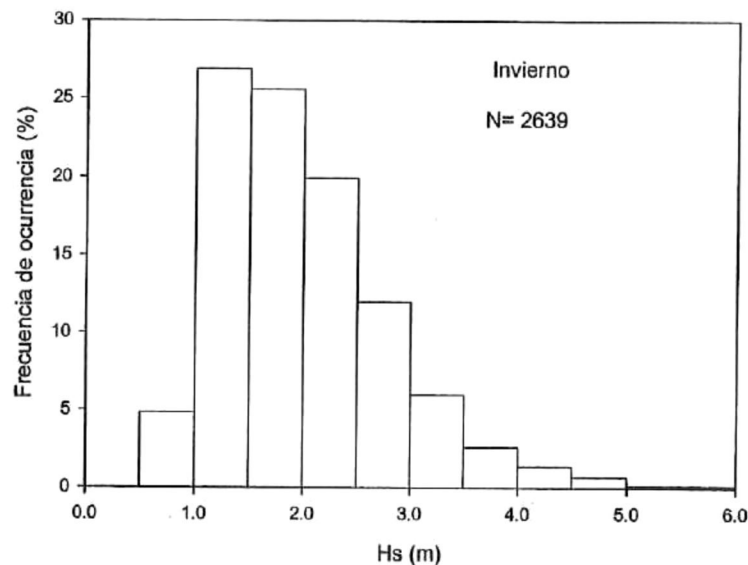


Figura 37. Frecuencia de ocurrencia (%) de alturas de ola durante los inviernos de 1995 a 1998 frente a Rosarito. En estas temporadas, cerca del 23% del total del registro de olas presentan una $H_s \geq 2.5$ m.

La acción de estas olas para generar erosión o acreción de la playa subaérea se puede inferir calculando el número de Dean (N_0) conforme al criterio de Larson y Kraus (USACE, 1992), que señala que si:

$N_0 < 2.4$	la acreción es altamente probable,
$N_0 < 3.2$	la acreción es probable,
$N_0 \geq 3.2$	la erosión es probable,
$N_0 > 4.0$	la erosión es altamente probable

En la figura 38 se presenta el valor promedio de N_0 en cada uno de los inviernos y primaveras desde 1995 a 1998 calculado a partir de los registros de oleaje de la CFE. Durante los inviernos N_0 es claramente superior a 4, indicando la alta probabilidad de erosión de la playa subaérea y formación de barras en la zona de rompiente; durante la primavera, dado que N_0 no excede el valor de 4, la erosión de la playa subaérea es probable y por tanto la preferencia a la formación de las barras en la zona de rompiente no es tan marcada como en el invierno.

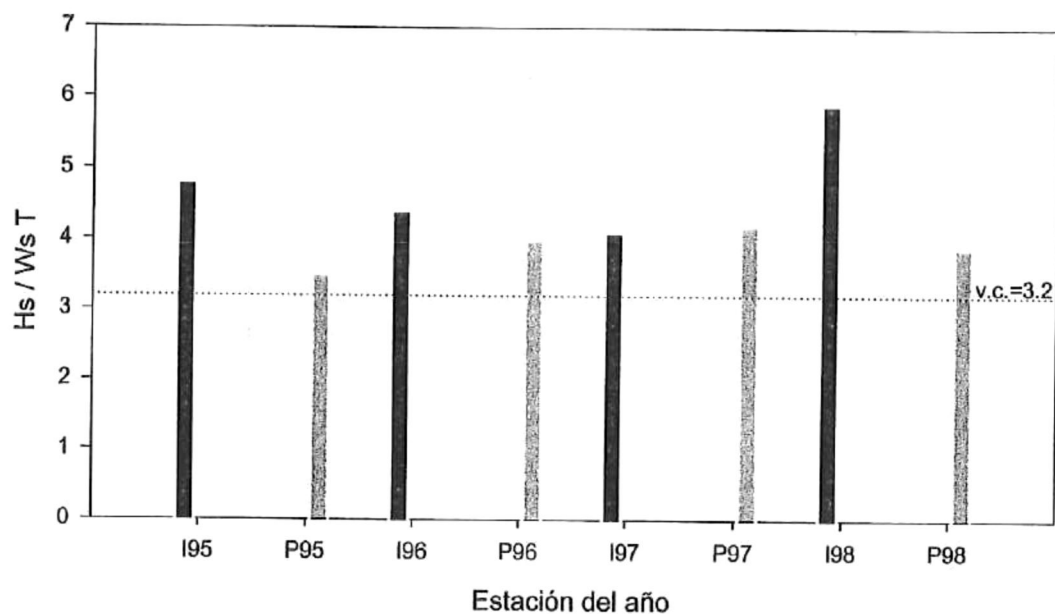


Figura 38. El valor de $N_0 > 4$ durante los inviernos indica la alta probabilidad de erosión de la playa subaérea y formación de barras en la zona de rompiente. Durante la primavera, la formación de barras en la zona de rompiente es menos favorecida ya que N_0 es mayor que el valor crítico (3.2) pero menor de 4.

Relacionando este resultado con las series temporales de volumen correspondientes a los puntos de control del segmento de playa norte (figura 32a), se observa claramente la coincidencia de la disminución del volumen en los

meses de invierno, cuando se registran valores de tan sólo $11 \text{ m}^3/\text{m}$ y $20 \text{ m}^3/\text{m}$ de arena, y en algunos casos, inclusive, la práctica desaparición de la playa arenosa.

La falta de información sobre el comportamiento del perfil de playa en la zona de rompiente y hacia el mar no permitió verificar la formación de las barras arenosas paralelas a la playa como producto de la depositación de arena proveniente de la playa subaérea. Reconociendo la importancia que tiene el intercambio de sedimento en sentido perpendicular a la playa se hace evidente la necesidad de ampliar las mediciones de perfiles en tiempo y espacio, para verificar y cuantificar el transporte de arena en esa dirección así como el balance de sedimentos entre la playa subaérea y la playa adyacente hacia el mar.

6.2.1.1.3.- Condiciones de verano.

La presencia del centro de alta presión en el NW del Pacífico y la ubicación del centro de baja presión hacia el este de Canadá y Estados Unidos durante los meses de verano (Storlazzi y Griggs, 2000), inducen condiciones de relativa calma y generan olas de baja altura. Sin embargo, tormentas lejanas, frente a Nueva Zelanda, Centro o Sur América, generan olas que arriban a la costa de California y Baja California con poca altura pero con periodos largos, hasta de 20 segundos. En general, como se ha señalado con anterioridad, los periodos más frecuentes de las olas medidas en Rosarito son entre 11 y 12 segundos.

La energía de las olas de verano está más restringida en cuanto a dirección de arribo se refiere, ya que el ángulo con que se acercan con respecto a la línea normal a la costa es de 11° a 30° S (CCTWS, 1991), siendo para Rosarito, frente a la CFE, el oleaje más frecuente el que proviene del SW (Marichal-González, 2001).

La frecuencia de ocurrencia de la altura de oleaje que arriba a Rosarito para todos los veranos (1994 a 1998) se muestra en la figura 39 donde es

evidente que la altura de ola más frecuente (~79%) varió entre 1 y 1.5 m. Prácticamente no se registraron olas mayores de 2.5 m de altura, ya que representan sólo un poco menos del 2%. En el verano el intervalo de variación de la altura de ola es menor comparado con el rango en invierno y la altura promedio de las olas varió entre 0.99 ± 0.4 a 1.34 ± 1.5 m, aunque ocasionalmente se registraron olas mayores de 3 m, particularmente en el verano de 1996, oleaje que correspondió a una de las tormentas excepcionales señaladas en el apartado correspondiente a los cambios de corto plazo.

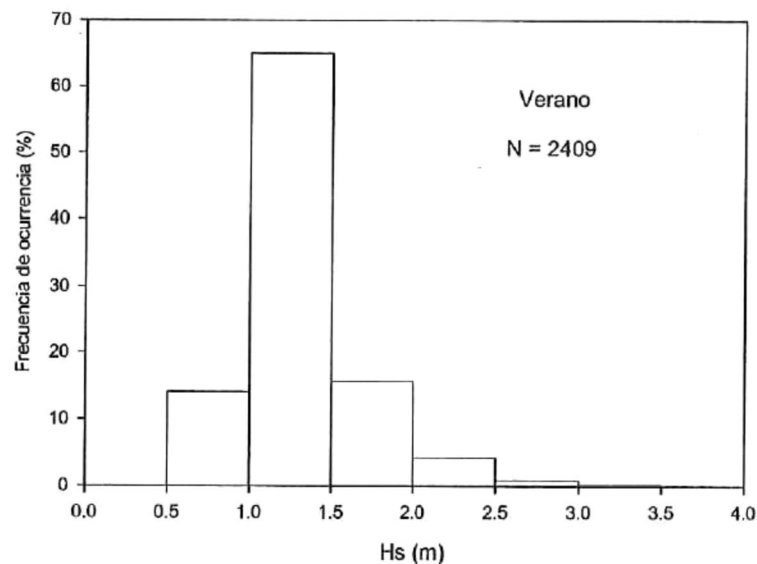


Figura 39.- Frecuencia de ocurrencia de alturas de ola durante los veranos de 1994 a 1998 frente a Rosarito. En estas temporadas el 98.9% del registro total de las olas presentó $H_s < 2.5$ m y sólo el 1 % correspondió a olas de mayor altura.

El oleaje estacional correspondiente al verano, debe favorecer conforme a las características señaladas, el transporte perpendicular a la playa en sentido hacia la playa. El comportamiento del número de Dean permite verificar la preferencia de un proceso acrecional o de reconstrucción de la playa subaérea.

En la figura 40 se presenta el valor promedio de N_0 para cada verano en el registro de olas de la CFE. De esta figura se desprende que es probable la acreción de la playa subaérea ya que N_0 no excede el valor crítico de 3.2,

indicando la posibilidad de que las barras de arena en la zona de rompiente se desplacen hacia la cara de la playa aumentando el volumen de arena en la misma. Este proceso debe reflejarse en el incremento del volumen de arena contenido en la playa lo cual se puede verificar en la serie temporal de volumen (figura 32a) en donde se muestra claramente que el contenido arenoso de la playa alcanza volúmenes hasta de $130 \text{ m}^3/\text{m}$ dando lugar a playas de mayores dimensiones en este periodo.

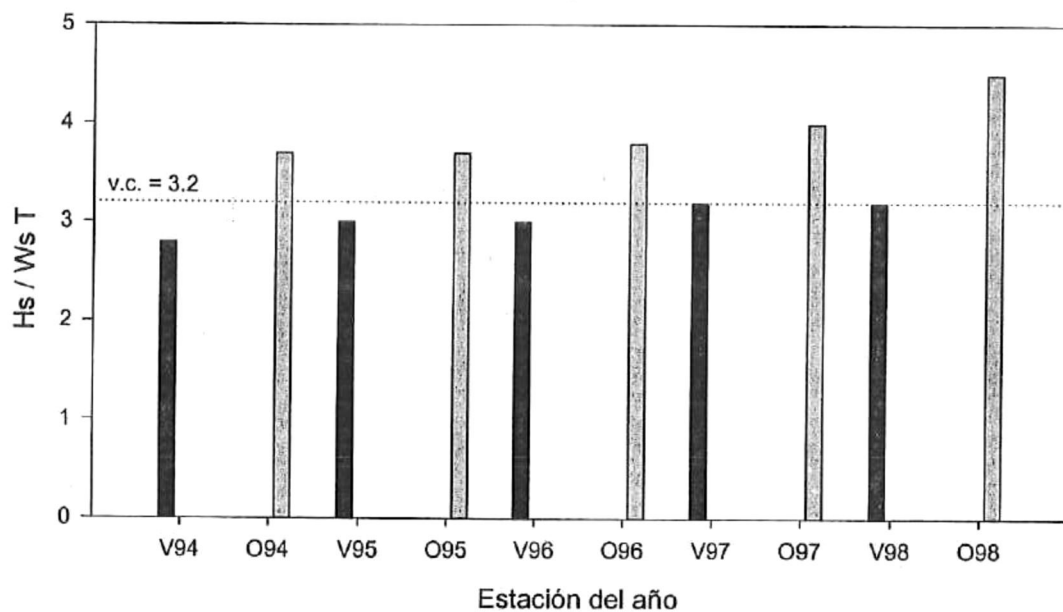


Figura 40. Valor promedio de N_0 obtenido a partir de los registros de oleaje de la CFE. Durante los veranos, el valor de $N_0 < 3.2$ indica la probabilidad de acreción de la playa subaérea y la probable desaparición de las barras de arena en la zona de rompiente. Durante los otoños, se favorece la probable erosión de la playa subaérea ya que N_0 es mayor que el valor crítico (3.2) y por tanto se favorece también la formación de barras en la zona de rompiente.

Al igual que en la primavera, el oleaje del otoño muestra su característica transicional entre el oleaje de baja altura de verano al oleaje más alto de invierno, favoreciendo la erosión de la playa subaérea, como lo indica el número de Dean cuyo valor resultó entre 3.2 y 4 excepto en el otoño de 1998. En la figura 32a se puede observar claramente el incremento de volumen de arena en todos los

puntos de control excepto en el BN02 y BN03 de este segmento norte de playa, condiciones que a continuación se discuten.

6.2.1.1.4 Ciclo de playa invertido.

Un análisis más detallado de los ciclos estacionales permitió detectar un desfase del ciclo estacional en los puntos de control BN02 y BN03. Este desfase se ejemplifica la figura 41 en donde sólo se compara la serie de tiempo de los volúmenes de arena entre el punto de control BN02 y BN04. El comportamiento temporal del volumen en el BN04 puede considerarse como "normal", puesto que presenta sus máximos y mínimos en verano e invierno respectivamente; por el contrario en el BN02 el volumen de arena es máximo en invierno y mínimo en verano, señalando una inversión del ciclo de playa esperado. Este comportamiento no había sido reportado con anterioridad para ningún segmento de playa a lo largo de la zona de estudio e incluso para playas abiertas en las costas de México, aunque si se ha observado en playas de bolsillo debido a que el ángulo que forman las olas rompientes con la orientación de la playa arenosa son, por lo general, contrarios en uno y otro extremo de la playa de bolsillo (Short et al., 2000).

Considerando que el ciclo estacional erosión/acreción sólo se presenta de manera invertida en los dos puntos de control señalados, es posible hipotetizar que el desfase puede estar asociado a la ocurrencia de procesos litorales en escalas espaciales de algún centenar de metros. Estos procesos pueden estar controlados por cambios menores en la morfología de la playa, cambios en la orientación de la playa o incluso cambios pequeños en el ángulo de ataque de olas al llegar a la playa, que a su vez controlan la dirección de flujo de la corriente litoral inducida por las olas.

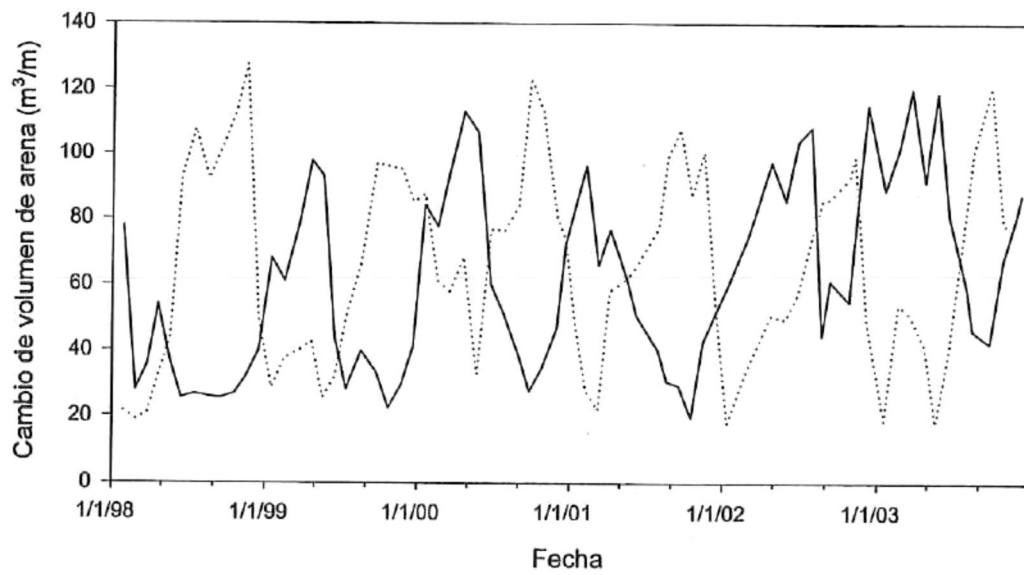


Figura 41. Series temporales de volumen de arena con desfase en el ciclo de erosión/acreción. El ciclo "normal" de erosión en invierno y acreción en verano está representado por la serie del punto de control BN04 (línea punteada), mientras que el BN02 (línea continua) representa el ciclo "invertido" de erosión en verano y acreción en invierno.

Para probar esta hipótesis se analizaron fotografías aéreas tomadas durante el otoño del año 1985 para el BN03 y del 2002 para el BN02. La playa en ambos puntos de control es angosta y tienen un muro en la parte posterior de la playa para proteger de la acción de las olas el pie del cantil.

En la figura 42 se presenta la ubicación del punto BN02 y se observa que la línea de costa es arqueada, donde el límite sur del arco (extremo derecho de la fotografía) está formado por un afloramiento rocoso a manera de saliente. Esta saliente actúa como un obstáculo a la corriente litoral, inducida por las olas, que puede fluir tanto hacia el sur como hacia el norte dependiendo de la dirección con la que arriban las olas.



Figura 42.- Morfología arqueada de la línea de playa en la que la playa frente al punto de control BN02 (triángulo) encara hacia el noroeste. Hacia el extremo derecho de la fotografía se encuentra la saliente rocosa que queda expuesta en marea baja.

La predominancia a lo largo del año de oleaje proveniente del SW permite inferir que el transporte litoral de arena acarreado por la corriente litoral fluye de sur a norte. Sin embargo, ligeras variaciones en el ángulo de incidencia de las olas en combinación con la forma y orientación de la línea de playa pudieran ser las responsables del desfase del ciclo estacional, a saber: las mediciones de oleaje frente al punto de control BN02 en el periodo de septiembre del 2002 a junio del 2003 (figura 43) muestran que el ángulo de incidencia de las olas durante la primavera, verano e inicios de otoño varía desde 200 a 250 grados de azimut, con un promedio de 230 grados, dando lugar a que las olas se aproximen a la playa con un ángulo de -17 grados con respecto a la normal a la playa (figura 44), lo que en teoría genera una corriente litoral de sur a norte.

Esta corriente litoral, al actuar con el obstáculo formado por el afloramiento rocoso en la parte baja de la playa, ocasiona el depósito de arena en la playa

inmediatamente al sur del obstáculo y la remoción de arena de la playa en la parte norte del obstáculo como se esquematiza en la figura 45.

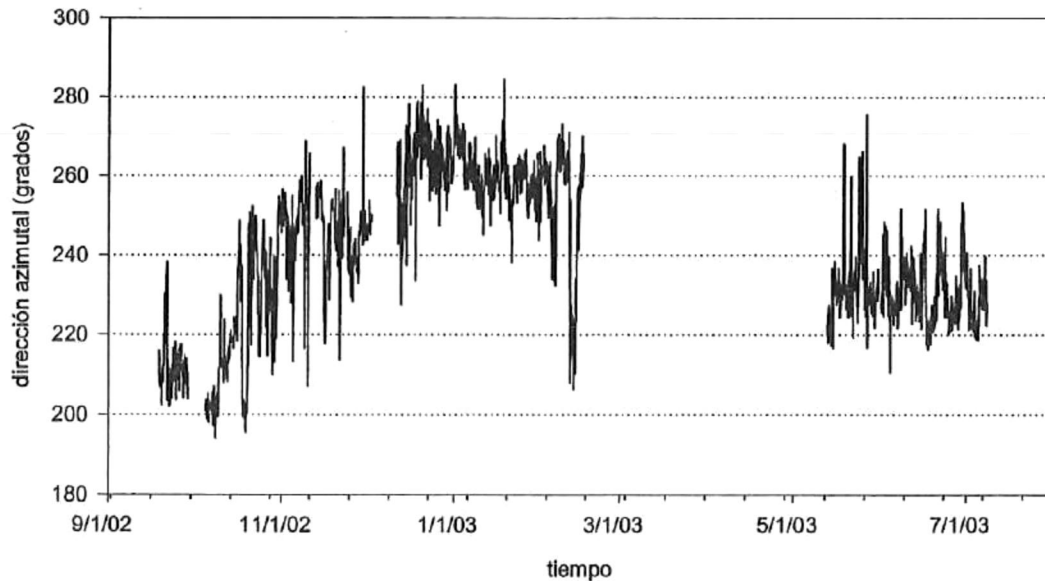


Figura 43.-Cambios en la dirección de viaje de las olas frente al Oasis (punto de control BN02).

Por el contrario, desde finales de otoño y durante el invierno la dirección de las olas incidentes frente al punto BN02 es en promedio de 260 grados, aunque se presenta en una ventana que va de los 250 hasta cerca de los 280 grados de azimut (ver figura 43). Al acercarse a la costa las olas se aproximan con un ángulo de $+13^\circ$ con respecto a la normal de la playa, esto es, son provenientes del noroeste con respecto de la normal a la playa pero provienen del SW con respecto al norte geográfico (figura 44). Es de esperar que estos ángulos disminuyan al acercarse a la línea de rompiente aunque se mantenga la dirección de proveniencia. La forma de la línea de playa sugiere la generación de una corriente litoral de norte a sur, de manera que produce la depositación de arena frente al BN02 y ocasiona que la playa en esta estación del año adquiera un mayor volumen de arena y un mayor ancho de playa. Este comportamiento se esquematiza en la figura 46.

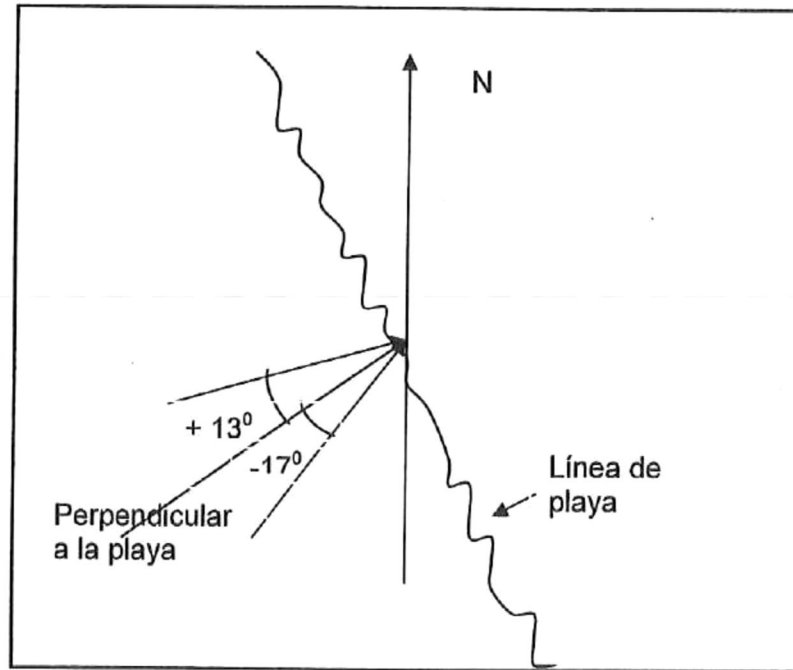


Figura 44. Esquema del ángulo de arribo de las olas respecto de la perpendicular a la línea de playa. Nótese que el oleaje proveniente del NW con respecto a la perpendicular a la playa corresponde a oleaje proveniente del SW con respecto al norte geográfico.

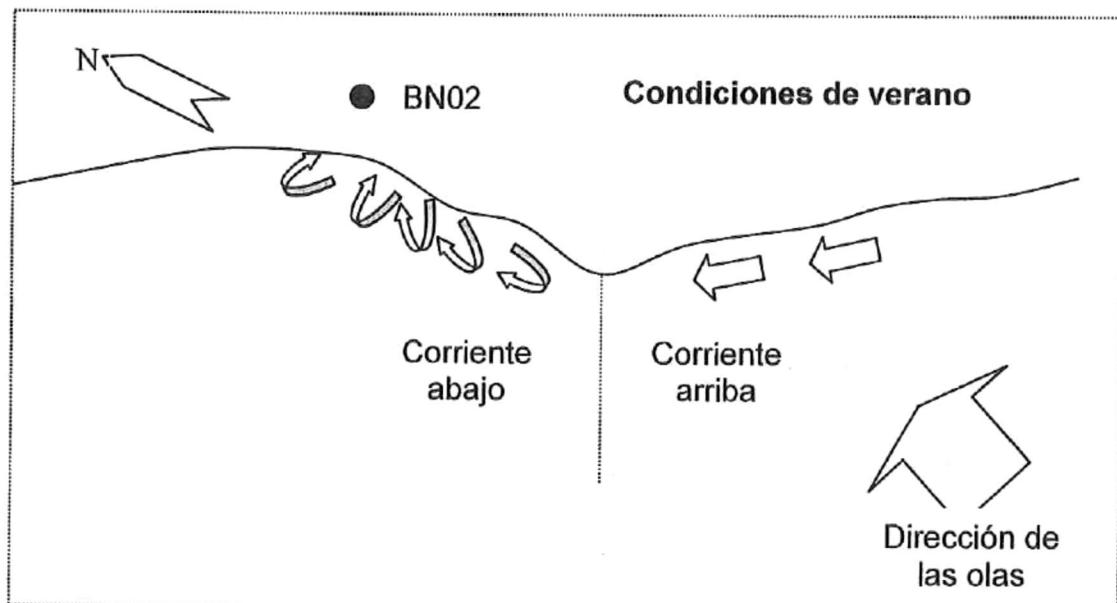


Figura 45. Esquema de la dirección de transporte de arena paralelo a la playa inducido por el arribo de oleaje del SW, respectu de la norma a la playa durante el verano.

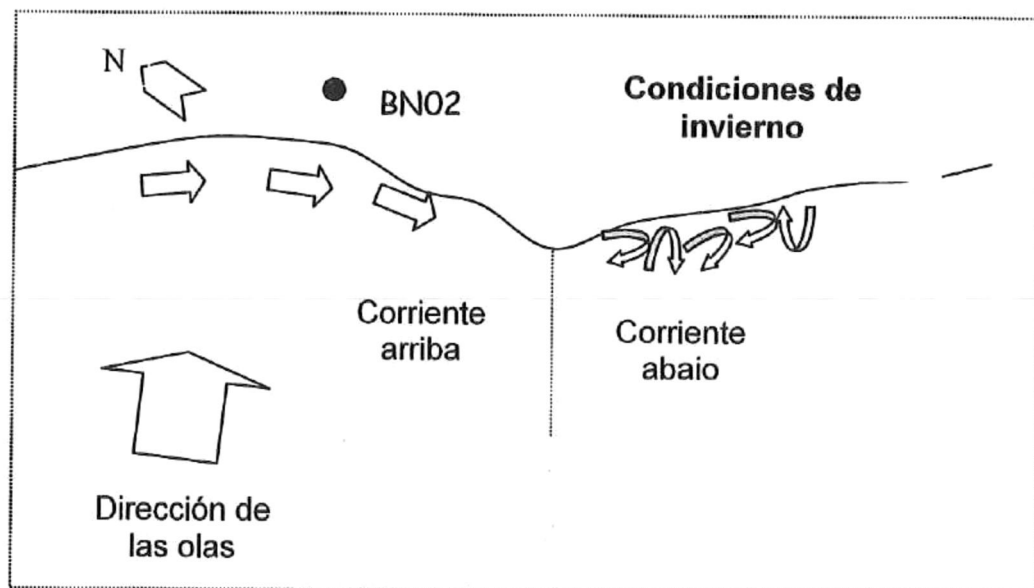


Figura 46. Esquema de la dirección de transporte de arena paralelo a la playa inducido por el oleaje del NW, respecto de la normal a la playa durante el invierno.

En la figura 47 se presenta un patrón morfológico de la playa similar al discutido en el punto anterior pero para la localidad del BN03. Considerando que el oleaje en esta localidad se comporta de igual manera que en el punto BN02, estas condiciones sugieren una explicación similar a la anterior, esto es, erosión en verano y acreción en invierno. De esta manera, estos dos perfiles coinciden con la estación en la que ocurre la mayor depositación de arena (invierno) y la mayor erosión (verano), pero el ciclo anual es invertido con respecto al resto de los perfiles de playa que componen las bases de datos de la CFE y de la UABC.

Por otra parte, el hecho de que la playa en el BN03 esté conformada de arena, grava, grava gruesa y canto rodado hace que se comporte de manera diferente a las playas estrictamente arenosas. Esta diferencia se debe a que los mecanismos de transporte son diferentes. Mason y Coates (2001) señalan que la mezcla en diferentes proporciones de arena, grava gruesa y canto rodado en una playa induce cambios en la conductividad hidráulica, la infiltración de agua y el umbral de movimiento del material formador del depósito, y por tanto en las características de la berma y pendiente de playa.



Figura 47. Morfología arqueada de la línea de playa en Baja del Mar. La playa sobre la que se marca el punto de control BN03 (punto negro) encara hacia el NW mientras que la playa al norte del mismo encara hacia el SW.

Las diferencias entre la intensidad del lamido (swash) de la ola sobre la playa, las propiedades internas de la cara de la playa y la disponibilidad de arena y gravas gruesas hacia el mar de la berma pueden inducir cambios de erosión/acreción estacionales diferentes a los observados en playas totalmente arenosas (Everts et al, 2002).

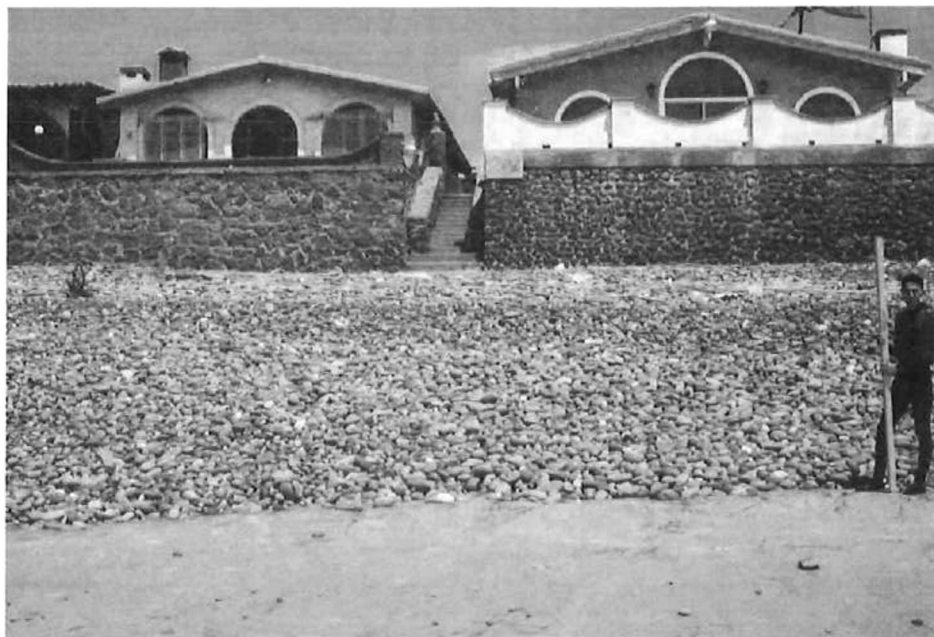
La mayor altura de ola durante invierno promueve la remoción de arena de la cara de la playa pero favorece, de estar presente, la acumulación de canto rodado. Este proceso se debe a que el avance de ola (run up) desplaza la partícula hacia enfrente (hacia arriba de la cara de la playa), pero el lamido de la ola pierde su momento por gravedad, fricción e infiltración y da lugar a un retroceso de ola (backswash) débil con relativamente poca capacidad de desplazar, pendiente abajo, las partículas de sedimento. Por ello, en playas de canto rodado es común la presencia de una o más bermas elevadas y una pendiente alta de la cara de la playa. Por el contrario, las olas de bajo contenido energético del verano, incapaces de remover las grandes partículas de grava

gruesa o canto, transportan la arena desde la rompiente hacia la playa promoviendo el encubrimiento de la grava y del canto rodado.

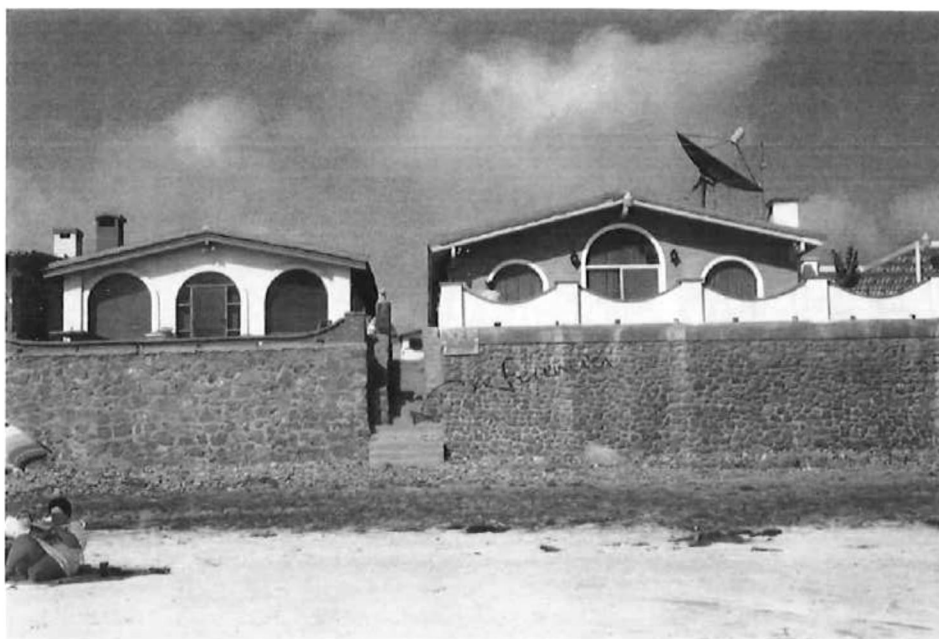
Los mecanismos descritos pueden producir que la playa arenosa y de canto rodado se erosione y deposite de manera desfasada una de otra. Durante el invierno el depósito de canto rodado es de mayor magnitud y la arena sólo ocurre en la plataforma de baja marea; en contraste, durante el verano el volumen de canto rodado decrece y el aumento del volumen de arena induce el cubrimiento del canto rodado. En la figura 48 se ilustra este comportamiento para el punto de control BN03, en donde es notoria la marcada diferencia en la forma y características morfológicas de playa (p.e. pendiente de la cara de la playa, altura de la berma, etc) cuando la playa está compuesta por canto rodado en invierno (figura 48a) y cuando está constituida principalmente por arena en verano (figura 48b).

6.2.1.2.- Oscilaciones de mayor periodo.

Las oscilaciones con periodo mayor que 12 meses en los espectros de volumen de este segmento de playa, son de menor importancia que el pico anual. En la tabla 7 se presentan los valores correspondientes al volumen de arena que es movido por la oscilación correspondiente a los 36 meses, y los valores del coeficiente de determinación (R^2) con un intervalo de confianza al 95%. Es evidente que las contribuciones de este modo son prácticamente nulas como lo indica el bajo volumen de arena que se mueve y la baja varianza que explica al considerar su ajuste por cuadrados mínimos. Al explicar tan poco de la varianza total es de esperar que el intervalo de confianza sea en algunos casos mayor que el estimador.



(a)



(b)

Figura 48. Composición del material playero en el punto de control BN03 durante (a) el invierno, en el que la pendiente de la cara de playa es mayor y (b) el verano en el que la arena ha cubierto el depósito de canto presentando una pendiente más suave.

Tabla 7. Características de la oscilación de 36 meses del volumen de arena para los puntos de control del segmento norte de Rosarito.

Punto de control	Amplitud (m ³ /m)	R ²
BN01	10.9 ± 10.9	0.03 ± 0.08
BN02	10.2 ± 8.6	0.09 ± 0.13
BN03	6.5 ± 5.8	0.08 ± 0.12
N19	8.2 ± 7.2	0.08 ± 0.12
N17	12.2 ± 7.5	0.15 ± 0.16
BN04	2.2 ± 11.2	0.002 ± 0.02
N15	24.5 ± 14.3	0.16 ± 0.16

6.2.1.3. Conclusiones

En virtud de las discusiones anteriores se puede concluir que las playas del segmento norte del área de estudio presentan una variabilidad estacional típica donde la erosión o remoción de arena de la playa subaérea se sucede durante el invierno, mientras que la depositación o acreción de arena es durante el verano. Sin embargo, fue posible determinar por primera vez para las playas de Rosarito que por lo menos en dos localidades este ciclo se presenta de manera invertida; esto es, los valores más bajos del volumen de arena (erosión) son en verano mientras que los más altos (acreción) son en invierno.

La correspondencia entre el número de Dean y la ocurrencia de la erosión o depositación estacional de arena en la playa subaérea indica que las características estacionales en altura de ola son determinantes en estos procesos y se verifica una relación directa entre la altura de las olas y la erosión/acreción de arena en la playa. De acuerdo con la información analizada la inversión del ciclo de playa, erosión en invierno y acreción en verano, se puede deber a la combinación de tres factores: a) cambios en la morfología local de la playa, b) cambios en el ángulo que forman las olas rompientes con la orientación de la

playa, y por último, c) cambios en el tipo de material formador de playa (arena vs canto rodado).

En general, el periodo del armónico que contribuye con la mayor varianza a los datos es el de 12 meses. El volumen de arena que se mueve en la playa subaérea debido exclusivamente al patrón anual de cambio de playa varía entre 22 y 94 m³/m y puede explicar, en algunos casos, hasta un poco más del 60% de la variabilidad del cambio total. Es importante mencionar que el nuevo registro del ciclo de playa estacional invertido en Rosarito, se debe considerar cuando se desee construir obras de protección costera. Por otro lado, es necesario mejorar el conocimiento de la dinámica de los depósitos de grava en esta región ya que juegan un papel importante en la protección natural de la costa y en la industria de recursos pétreos para la construcción y ornamentación.

6.2.2.- Segmento de playa intermedio norte:

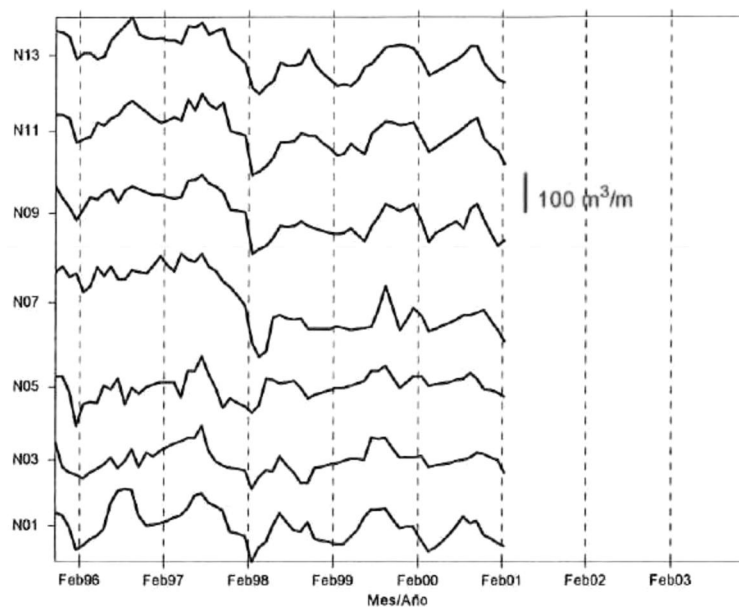
El segmento intermedio norte comprende desde el perfil N13 (inmediatamente al sur del punto N15) hasta el N01, ubicado en el margen norte del rompeolas. Se caracteriza por mostrar una playa más ancha que en el segmento norte y su límite hacia tierra es la base de dunas semi-vegetadas cuya altura es de 1-1.5m.

En el año 2000 se inició una ampliación de las instalaciones de la planta termoeléctrica Juárez y se realizó un amplio relleno desde las inmediaciones del rompeolas hasta aproximadamente 800 m al norte del mismo con una altura aproximada de 8 m, reduciendo el ancho de playa entre 20 y 40 m. Para el estudio de la evolución de la playa en esta sección sólo se utilizan los perfiles de la base de datos de la CFE. No existe ninguna interferencia de estructuras costeras como los muros existentes en el segmento norte, excepto el rompeolas. La extensión litoral de este segmento de playa es de 1,300 m, donde se ubican siete perfiles cuya separación entre ellos es de 200m aproximadamente.

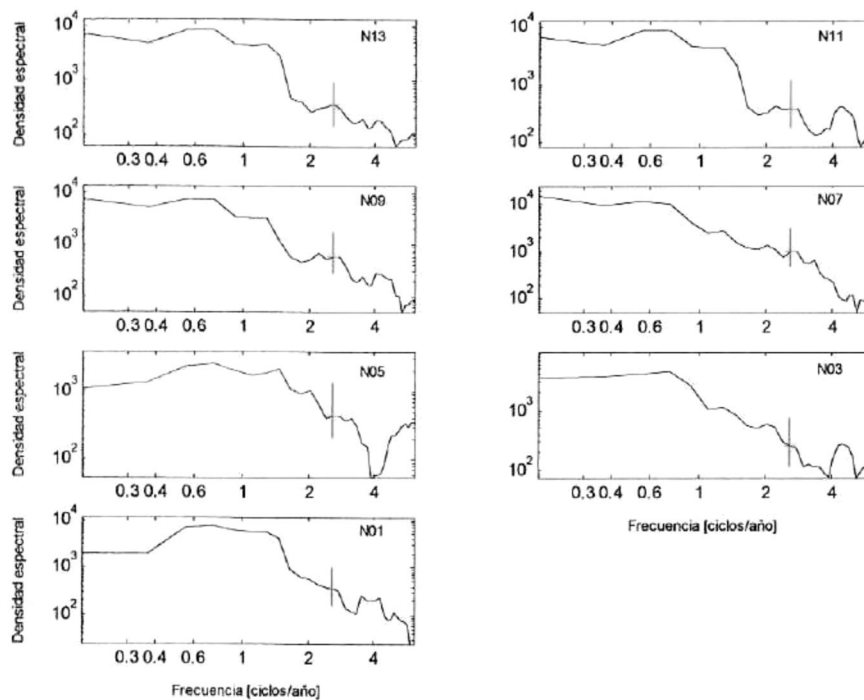
En la figura 49a se presenta la serie temporal de volumen y el resultado del análisis espectral de la serie de volumen de cada uno de los puntos de control en este segmento de playa se presenta en la figura 49b. En esta figura se observa que el pico espectral con periodo de 12 meses está presente en todos los perfiles de esta sección de playa. Sin embargo, el pico espectral de 36 meses presenta una amplitud igual o mayor que el del periodo anual en todos los puntos de control. Sólo en el N01 el ciclo anual presenta mayor amplitud que el de 36 meses.

6.2.2.1.- Oscilación periódica anual.

Al igual que en el caso del segmento de playa norte, para caracterizar el comportamiento del volumen de arena asociado al ciclo estacional definido en el espectro de volumen, se calculó el mejor ajuste por cuadrados mínimos para determinar la amplitud y fase correspondiente a cada ciclo. En la figura 50 se presenta el ajuste obtenido para el ciclo anual en el punto de control N01 y en la tabla 8 se presenta el volumen de arena que es movido bajo la influencia exclusiva del ciclo anual para cada uno de los puntos de control, volumen que varió entre 13 y 44 m³/m. En la tabla 8 también se puede observar que en lo general el ciclo anual no explica mucho de la varianza total de los datos (R^2) para cada uno de los puntos de control en comparación a la cantidad de varianza que explica para los puntos de control del segmento de playa norte. Esta reducción en el valor de R^2 del segmento de playa intermedio norte con respecto al segmento de playa norte se pudiera explicar en función de la presencia de las estructuras costera de la CFE.



(a)



(b)

Figura 49. Serie temporal (a) y espectro (b) del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento intermedio norte de Rosarito. En el espectro del volumen para cada punto de control se indica el intervalo de confianza al 95%.

Appendini-Albretchen (1995) señala que el área interior que producen el rompeolas y espigones de la CFE da lugar a la acumulación de arena, sobre todo durante los meses invernales, en el canal de toma de agua de la paraestatal. La limpieza del canal se efectúa mediante el uso de dos dragas que extraen la arena y la vierten sobre la playa inmediatamente al norte del rompeolas. Así, la introducción "artificial" de arena alcanza un promedio de 37,000 m³/mes en los meses noviembre, diciembre y enero (Carrillo-Berumen, 1998). Como resultado de ello, la influencia erosiva del oleaje característico de invierno y el comportamiento del ciclo anual pudiera estar enmascarada de manera artificial por el aumento de volumen de playa vertido por las dragas en las playas inmediatas al norte del rompeolas, como se puede observar en el punto de control N03. La excepción a este comportamiento se observa en el punto de control N01, lo que pudiera estar asociado a una rápida remoción de arena de esta playa por complejos patrones de corrientes litorales como los ilustra Carrillo-Berumen (1998).

En la tabla 8 se observa que a partir del punto de control N03 y hacia el norte, el volumen de arena asociado al ciclo anual se incrementa gradualmente. Este incremento de volumen pudiera estar indicando que el rompeolas y la introducción de arena dragada desde el canal de toma de agua, pueden tener una particular influencia sobre el ciclo anual de erosión/acreción en las playas hacia el norte del rompeolas. Esta influencia disminuye gradualmente conforme aumenta la distancia entre los puntos de control y el rompeolas y acentúa el efecto del ciclo anual como se ha señalado anteriormente.

En general la oscilación anual es igualmente explicable en términos del régimen estacional del oleaje discutido en la sección anterior, por lo que enseguida sólo se discute la variabilidad del volumen de arena con periodos de recurrencia de 36 meses (3 años).

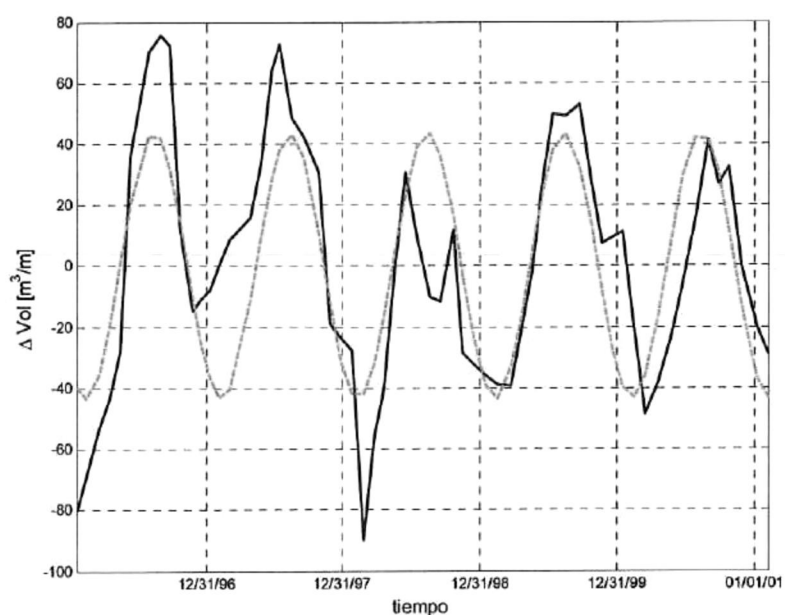


Figura 50. Ajuste por cuadrados mínimos del ciclo anual del cambio de volumen de arena en el punto de control N01.

Tabla 8.- Caracterización del ciclo anual del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio norte con su respectivo intervalo de confianza al 95%.

P. de control	Amplitud (m ³ /m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor mín.	R ²
N13	39.0 ± 11.2	24 sep	25 mar	0.45 ± 0.18
N11	38.4 ± 11.5	19 sep	25 mar	0.43 ± 0.18
N09	29.6 ± 12.6	19 sep	25 mar	0.27 ± 0.18
N07	25.3 ± 16.6	19 sep	21 mar	0.13 ± 0.15
N05	21.7 ± 8.5	28 jul	26 ene	0.30 ± 0.19
N03	13.0 ± 10.4	06 ago	31 ene	0.10 ± 0.14
N01	43.6 ± 8.7	19 ago	26 feb	0.62 ± 0.15

6.2.2.2.- Oscilación periódica de 36 meses (3 años).

Tal como en el numeral anterior, para caracterizar el cambio de volumen con periodicidad de 36 meses se calculó mediante el ajuste por cuadrados mínimos de un senoide a la serie temporal de volumen, como se ilustra en la figura 51 para el punto de control N07. La amplitud de este ciclo y el coeficiente de determinación, para cada uno de los puntos de control se muestran en la tabla 9.

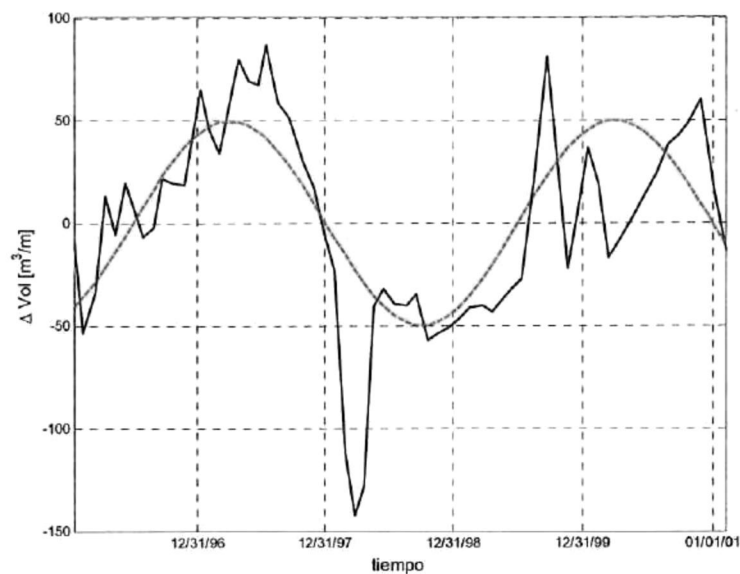


Figura 51. Ajuste por cuadrados mínimos del ciclo de 36 meses del cambio de volumen para el punto de control N07.

Como se observa, la contribución de este ciclo de 36 meses con respecto al cambio total de volumen tiene valores similares a los estimados para la contribución anual. La amplitud de esta oscilación disminuye ligeramente hacia el norte y más notoriamente hacia el sur del punto de control N07; esto no debe sorprendernos debido a que en este punto de control se presentó la mayor erosión de arena en la playa subaérea durante el mes de febrero 1998, periodo que se caracterizó por el evento El Niño de 1998. El coeficiente de determinación entre la serie temporal de volumen y el senoide con periodo de 36 meses explica hasta el 50% de la varianza total en el N07 mientras que en N01 y N05 sólo

explica alrededor del 20% con un intervalo de confianza prácticamente igual que el valor de R^2 .

Tabla 9. Caracterización del ciclo de 36 meses del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio norte con su respectivo intervalo de confianza la 95%

P. de control	Amplitud (m3/m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor min.	R^2
N13	40.2 ± 11.4	Mar-1997	Jul-1998	0.45 ± 0.18
N11	38.7 ± 12.0	May-1997	Sep-1998	0.41 ± 0.19
N09	39.1 ± 11.2	May-1997	Sep-1998	0.45 ± 0.18
N07	49.8 ± 12.9	May-1997	Sep-1998	0.50 ± 0.18
N05	18.6 ± 9.6	Mar-1997	Jul-1998	0.20 ± 0.17
N03	27.8 ± 8.9	Mar-1997	Jul-1998	0.39 ± 0.19
N01	24.2 ± 13.4	Mar-1997	Jul-1998	0.18 ± 0.17

La comparación de los valores de R^2 para la oscilación anual y la de 36 meses muestra que la segunda presenta una mayor contribución de movimiento de arena que la primera. En contraste, la contribución en el movimiento de arena de la oscilación anual es mayor en los puntos de control N13, N11, N05 y N01. Estos comportamientos pueden indicar que la influencia de una u otra oscilación puede ser dominante en diversos segmentos de playa.

Los eventos de erosión/depositación con periodo de recurrencia de 36 meses pueden estar asociados a la variabilidad del régimen inter-estacional del oleaje. La temporalidad e intensidad de las tormentas de invierno a invierno, así como la benignidad de los veranos de un año a otro, debe influir, sin lugar a dudas, en la magnitud del volumen de arena erosionado o depositado en una playa.

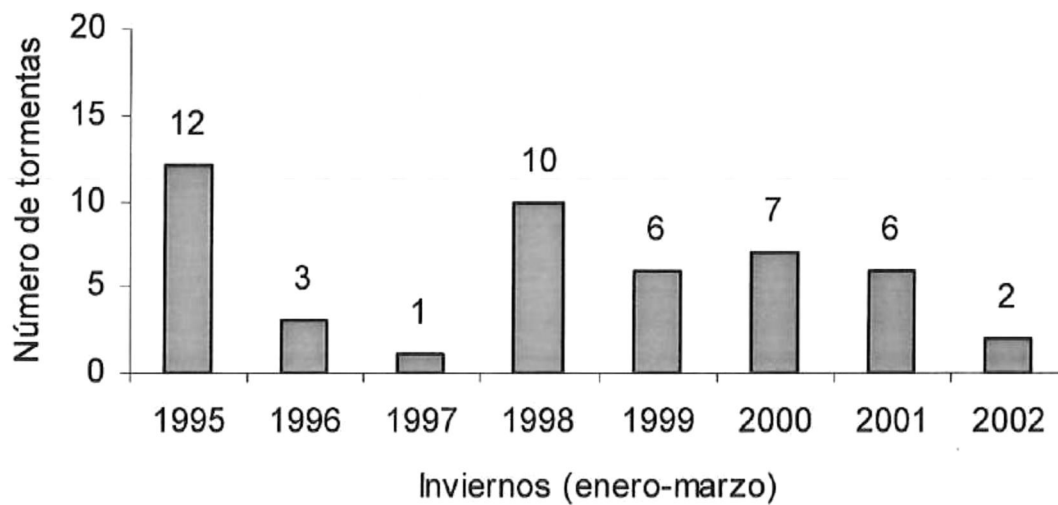
Conviene apuntar que la rigurosidad de los inviernos se puede caracterizar por la duración total de las tormentas, tormentas que pueden ser poco numerosas

pero con olas excepcionalmente altas o muy numerosas pero con olas no tan altas (Dolan y Davis, 1992). Por lo anterior, es razonable hipotetizar que las diferencias en la severidad del oleaje entre un invierno y otro, o a la quietud del oleaje de un verano a otro, es el mecanismo que controla los cambios de volumen de arena en la playa subaérea con oscilaciones de periodo mayor que el anual.

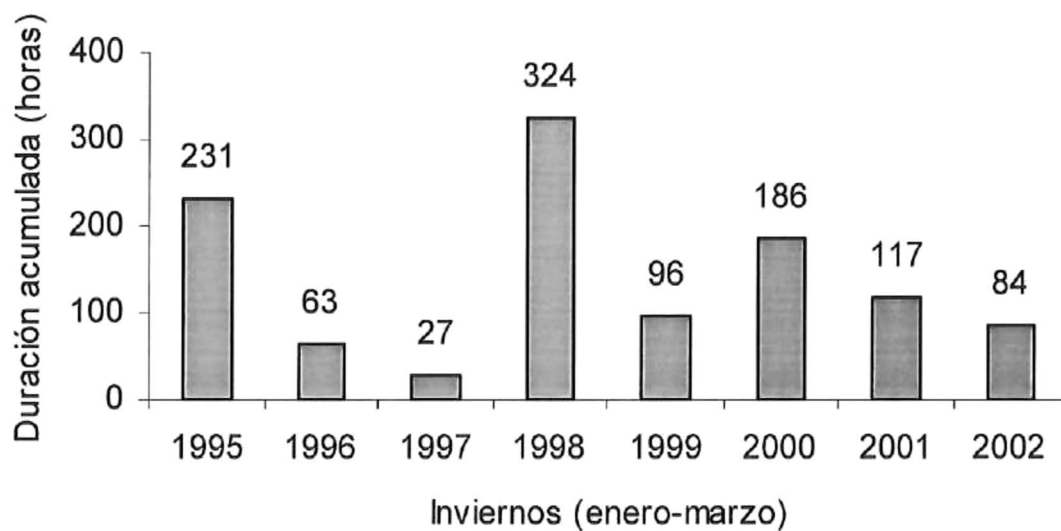
Para investigar la posibilidad de que el régimen de oleaje pudier tener una variabilidad inter-estacional en su contribución energética se analizó el registro de oleaje de mar profundo obtenido frente a Punta Concepción, California (CDIP), así como la base de datos de oleaje obtenida localmente en Rosarito por la CFE.

De la base de datos del CDIP (figura 35) se observa claramente las diferencias de altura de ola entre verano e invierno, sin embargo, es evidente que existen también diferencias muy marcadas entre las alturas del oleaje de un invierno a otro. Para facilitar la identificación de tormentas se utilizó el criterio de Seymour et al (1984), que define una tormenta cuando la altura de olas superan los 4 m por un lapso igual o mayor de 9 horas consecutivas; bajo este criterio, se obtuvo que los inviernos más rigurosos, en orden descendente, fueron los correspondientes a los años de 1998, 1995 y 2000, mientras que los más benignos correspondieron a los inviernos de 1996 y 1997 (figura 52).

En la figura 53 se contrasta la altura de ola entre el invierno más benigno (1997) y el más riguroso (1998). Es evidente que las alturas de olas en el segundo son prácticamente mayores desde mediados de enero hasta mediados de febrero de 1998 siendo significativamente diferentes al 95% de confianza. Para el caso particular de la información de oleaje medida directamente en Rosarito, aunque con algunos vacíos en la información, se observa un patrón relativamente similar al de las olas en Punta Concepción, California.



(a)



(b)

Figura 52. Rigurosidad de los inviernos 1995 a 2002 en términos de número de tormentas (a) y duración (b) conforme a Seymour et al., 1984.

En los inviernos consecutivos de 1995 y 1996 mostraron cierta severidad ya que la altura promedio de las olas fue de 1.6 y 1.8 ± 0.7 m respectivamente. Seguidamente, el invierno de 1997 se mostró como un invierno relativamente calmo, cuya altura promedio de olas fué de 1.3 ± 0.5 m. Este invierno fue seguido por el invierno de 1998 considerado como el más severo durante el periodo de mediciones, cuando se registraron alturas promedio de 2.1 ± 1 m.

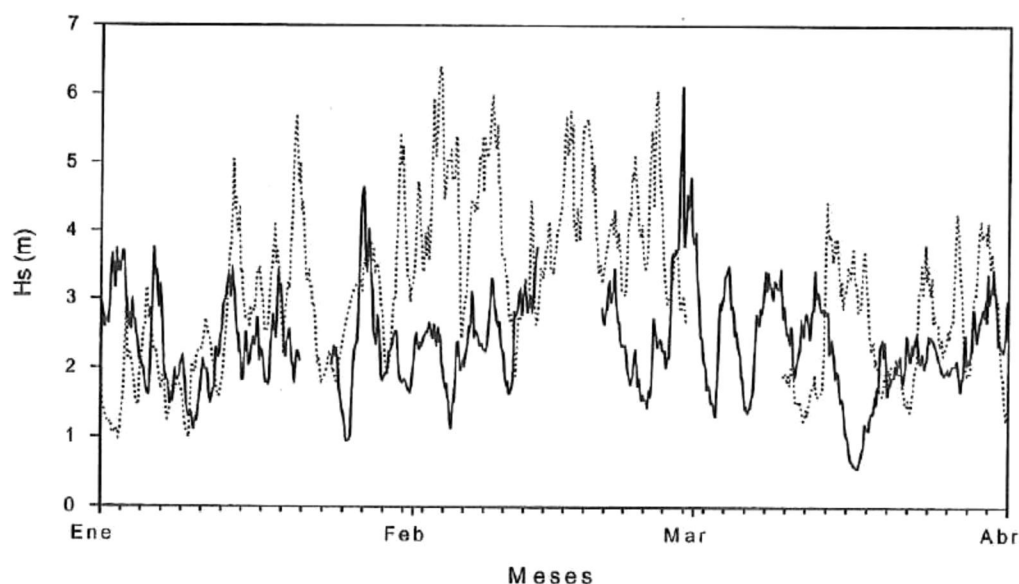


Figura 53. Comparación de H_s entre el invierno de 1997 (línea continua) y el de 1998 (línea punteada). La rigurosidad del segundo es evidente, particularmente a lo largo del mes de febrero.

En contraste los veranos de 1995, 1996 y 1997 fueron relativamente benignos ya que la altura promedio de las olas no fue mayor de 1 ± 0.3 m. Durante los veranos de 1998 y 1999 el oleaje presentó una altura de ola promedio de 1.3 ± 0.4 m. No se dispone de registros de oleaje en Rosarito para los años posteriores a enero de 1999.

Por otra parte, del espectro de oleaje frente a Punta Concepción, California (figura 36) mostró picos en el orden de 5.6 y 2.8 años que coinciden, en particular el segundo, con la oscilación con periodo de 3 años que se obtiene del espectro de volumen de arena sobre la playa en Rosarito. Es obvio que la asociación del

pico de 5.6 años del oleaje no corresponde con ningún pico en el espectro del volumen de arena debido posiblemente a que la serie temporal de volumen sólo comprende un poco más de 5 años. Sin embargo, la oscilación de 3 años está asociada a un proceso de erosión intensa inducida por condiciones de El Niño en el invierno de 1998, como se ha señalado en la sección anterior.

Los cambios inter-inviernos de volumen de arena en la playa subaérea correspondieron con la variabilidad del oleaje entre inviernos. En la figura 54 se ilustran cuatro series temporales de volumen en donde se observa una importante reducción de volumen en enero de 1996, que pudiera ser consecuencia de la relativa rigurosidad del invierno coincidente con un evento ENSO de mediana intensidad (Badán, 2003), en el que se registraron doce tormentas importantes. Seguidamente, la relativa benignidad del verano de 1996 e invierno de 1997 ocasionaron que la playa para el verano de 1997 mostrara su mayor volumen almacenado. Seguido de este proceso constructivo, en el invierno de 1998 ocurrieron las más severas tormentas, que produjeron a su vez, la más severa erosión de playa (~ 150 a $200 \text{ m}^3/\text{m}$) e incluso ocasionaron la pérdida total de arena en algunos segmentos de playa. Posterior a este proceso destructivo la playa muestra una persistente etapa constructiva en los veranos de 1998 y 1999, con un particular incremento de volumen en el N07 y N09 en septiembre y octubre del 2000.

También es importante hacer notar que la arena removida de la playa subaérea durante el riguroso invierno de 1998 (ENSO) no es recuperada en este segmento de playa. En la tabla 10 se señala el volumen promedio de la playa en un lapso de dos años previos al invierno de 1998 y el volumen promedio en un lapso de tres años posterior al mismo evento para los puntos de control indicados. De lo anterior es evidente la pérdida neta de arena, hasta de $126 \text{ m}^3/\text{m}$ asociada a la variabilidad del oleaje inter-invierno.

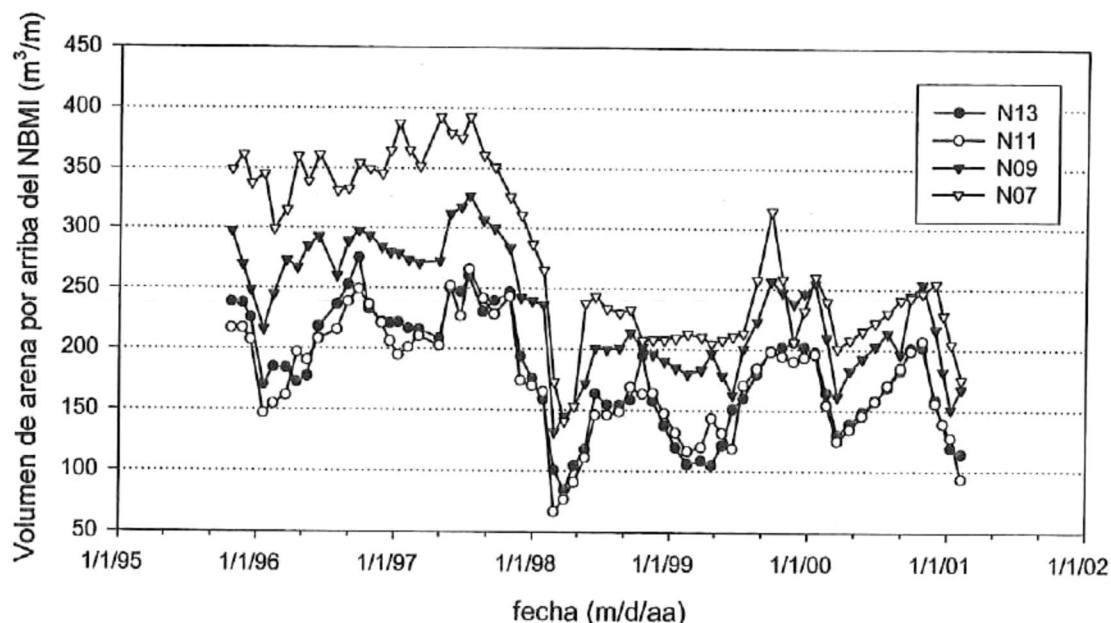


Figura 54.- Reducción del volumen de arena en la playa subaérea en los inviernos de 1996 y 1998.

Tabla 10.- Pérdida de volumen promedio posterior al invierno de 1998. El valor negativo indica una ganancia de arena

Volumen promedio (m³/m)	N13	N11	N09	N07	N05	N03	N1
Ene 1996 a Dic 1997	221	210	279	349	194	226	127
Mar 1998 a Feb 2001	153	151	200	223	207	216	92
diferencia	68	59	79	126	-13	10	35

La intensa erosión de playa en los puntos de control señalados y que se asocian a la variabilidad interanual de los inviernos, también puede estar relacionada con un comportamiento "atípico" de convergencia de energía del oleaje al acercarse a la playa. Komar (1998) señala que este mecanismo puede producir la erosión intensa en localidades específicas, que define como "puntos calientes" los cuales son comunes en la cercanía de entradas a estuarios y en puntos de playa con determinadas características morfológicas. Estas

eventualidades también están asociadas a la concentración de energía de las olas por efecto de la refracción o cambios en la composición del material del fondo marinos adyacente (Moore y Griggs, 2002).

Para investigar la posible presencia de puntos calientes en las playas de Rosarito se analizaron los registros de oleaje frente a Punta Concepción, California generados por el CDIP. De estos registros se obtuvieron las características representativas de las olas en cuanto a altura, periodo y dirección de viaje en mar profundo de manera que empleando un programa de refracción de oleaje se obtuviera el campo de olas en la región cercana a la playa (Martínez Díaz de León, et al., 2002). El resultado de este análisis muestra que oleaje de mar profundo proveniente de los 289° - 300° de dirección azimutal y periodos entre 13 y 15 s al llegar a la costa los rayos que definen el viaje de la ola tienden a juntarse, produciendo de esta manera algunos puntos de convergencia que solamente se presentan en otoño e invierno.

En las figuras 55a y 55d se observan varios puntos de convergencia de energía del oleaje que se ubican en las cercanías de la CFE y en Punta La Paloma, aproximadamente a 6 km hacia el sur del rompeolas. El punto de convergencia cercano a la CFE se encuentra algunas centenas de metros al norte del rompeolas cercano a la ubicación de los puntos de control N07 y N09. Esta situación coincide con el hecho de que en estos puntos de control se presentaron los mayores volúmenes de erosión en el invierno de 1998. La correspondencia en ambos procesos, convergencia de oleaje-erosión intensa de la playa puede indicar entonces la existencia de un punto caliente en este segmento de playa cuya posición se indica con un círculo en las figuras 55a y 55d.

Por otra parte, la no ocurrencia de puntos de convergencia de oleaje durante primavera y verano cercanos a la CFE (figura 55b y 55c), indican que la presencia de estos puntos calientes durante invierno puede estar asociados a la variabilidad inter-inviernos y, considerando que la rigurosidad de estos se ha

asociado a eventos ENSO, es posible señalar que la ocurrencia de los puntos calientes pudieran estar influenciados con la periodicidad de los eventos ENSO.

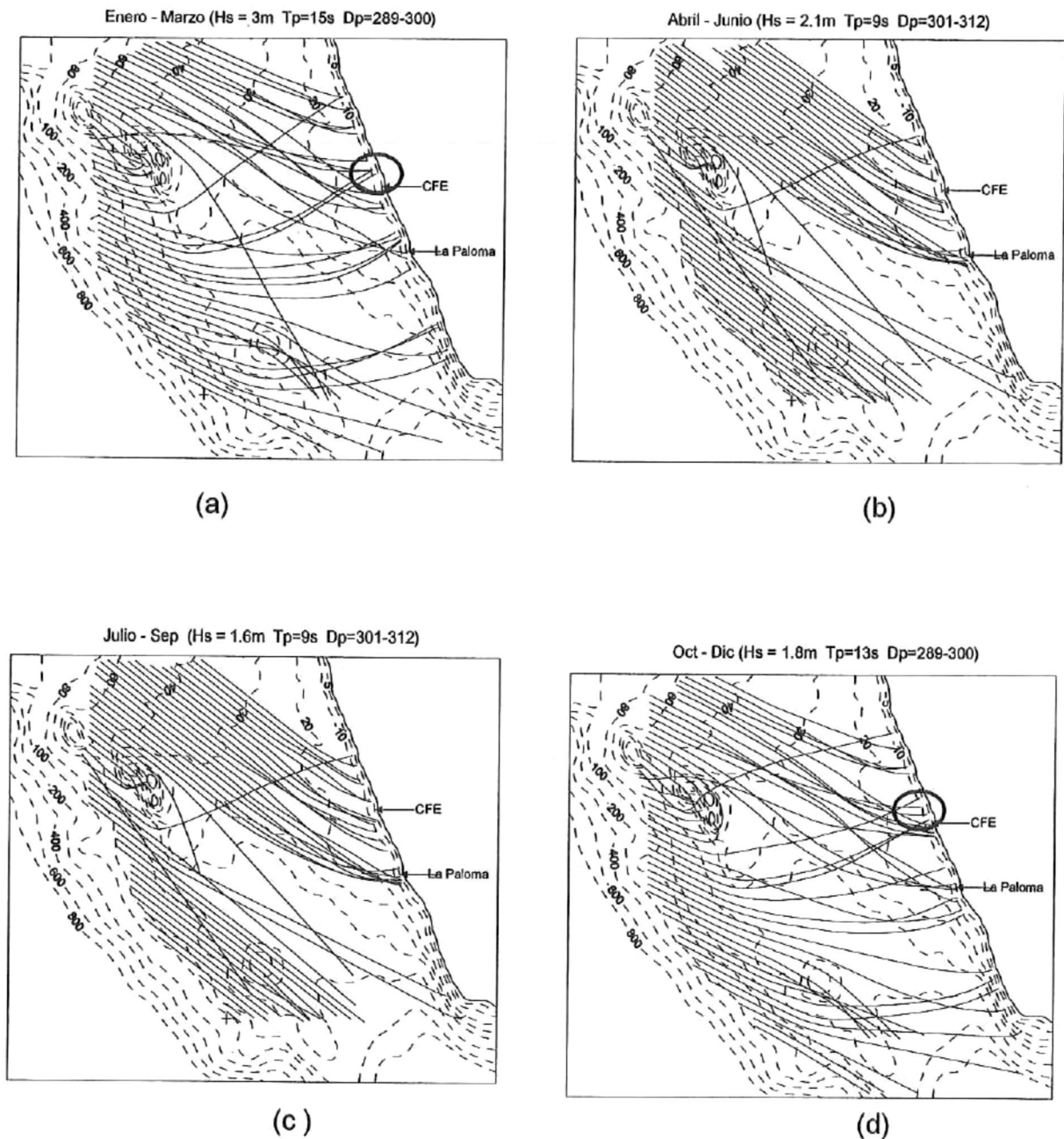


Figura 55. Concentración de energía del oleaje que generan "puntos calientes" en las cercanías de la CFE durante las épocas de invierno y otoño (a y d). Durante primavera y verano el punto caliente se localiza hacia el sur del rompeolas de la CFE frente a Punta La Paloma (b-c).

6.2.2.2.1.- Efectos de eventos ENSO.

Hasta ahora los cambios de volumen de arena de la playa se han explicado en términos del régimen estacional de las olas pero no en términos de cómo es el origen de la estacionalidad. La variabilidad del régimen de oleaje en escalas de mediano y largo plazo se ha asociado a eventos climáticos como El Niño o la Oscilación del Sur las cuales sólo han sido estudiadas recientemente (Seymour et al, 1984; Seymour et al, 1996; Short et al, 2000; Allan y Komar, 2002, entre otros).

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es el fenómeno acoplado océano-atmósfera más importante que produce una variabilidad climática global en escala temporal interanual (Badan, 2003). El Niño es la componente oceánica del sistema ENSO y consiste en el calentamiento del Océano Pacífico Ecuatorial entre Sur América y el meridiano 180; la Oscilación del Sur es la componente atmosférica del sistema y se define como la diferencia de presión atmosférica al nivel del mar entre Tahiti y Darwin, Australia. Ambos componentes están altamente relacionados de manera que se ha definido un índice numérico el cual si es positivo, indica el enfriamiento del Pacífico Este Tropical (condición La Niña) y si es negativo, indica el calentamiento del océano en la misma región (condición El Niño) (Desser y Wallace, 1987).

Asociado a la ocurrencia de un evento ENSO se observa por ejemplo, que en el Atlántico hay una reducción en el número de tormentas tropicales y huracanes, mientras que en el Pacífico aumentan; la circulación atmosférica en el Pacífico NE durante los inviernos cambia sustancialmente debido a que el centro de baja presión de las Aleutianas se desplaza más hacia el sur de lo normal y genera tormentas ligeramente más numerosas y un poco más intensas en la región del Sur de California y México entre otros fenómenos (Pacific ENSO Application Center, 2004).

Con base en registros históricos de procesos atmosféricos, oceanográficos y de diversa naturaleza en la región costera oeste del norte de Sur América y las aguas adyacentes del Pacífico, Quinn et al (1987) elaboró la historia de eventos ENSO y sus intensidades relativas desde el siglo XVI. Estimó que considerando la totalidad de eventos desde 1803 a 1987 el periodo promedio de ocurrencia de este evento es de 3.8 años. Otros autores estiman que el periodo varía entre 2 y 7 años (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>). Para evaluar el impacto de eventos en áreas específicas del mundo Wolter (2004) recomienda la construcción de índices ENSO que se adecúen a las condiciones de interés locales.

Storlazzi y Griggs (2000) estimaron un índice de intensidad ENSO para evaluar la influencia de estos eventos en la evolución de la costa central de California. Para su estimación consideraron las fluctuaciones en la actividad de ciclones en su temporada, precipitación, nivel del mar sin tendencia, altura de olas, temperatura de la superficie del mar y presión barométrica a nivel del mar que ocurren frente a California, E.U.A.

Con base en este índice de intensidad relativa ENSO, los autores definen la ocurrencia de cinco eventos ENSO de alta intensidad (valor de intensidad 4 a 6) y 17 eventos de baja intensidad (valor de 1-3) durante el periodo de 1910 a 1995. En el periodo de 1940 a 1970 se registró un clima benigno en el que sólo se registraron cuatro eventos de intensidad relativa mayor de dos, mientras que al inicio de siglo y en los últimos 30 años se registra una mayor frecuencia de ocurrencia de eventos ENSO de alta intensidad (valores de 4 a 6).

En general, el promedio de ocurrencia de un evento de alta intensidad es del orden de 17 años sin embargo, si se excluye el periodo de relativa calma (1940-1970), el promedio es de 12.3 años. En contraste, los eventos ENSO de baja intensidad ocurren cada 2.6 años. Considerando la totalidad de los eventos conforme al índice de intensidad relativa de estos autores, el periodo de retorno de los eventos ENSO de todas las intensidades es de 2.1 años. La periodicidad

de los eventos de baja intensidad muestra una correspondencia cercana con el periodo de recurrencia de 3 años que se obtiene de el análisis espectral del volumen de arena en la mayoría de los perfiles de playa en la zona de Rosarito y es razonable concluir que la periodicidad en la ocurrencia del fenómeno El Niño es un forzante importante que influye en el ciclo interanual de cambio del volumen de arena contenido en la playa subaérea en Rosarito.

6.2.2.3.- Conclusiones.

El comportamiento de la playa a lo largo del segmento intermedio norte presentó un patrón definido de cambio con periodicidad anual, ue explica hasta 45% (60% sólo en el N01) de la varianza de los datos. También, y por primera vez detectado para la región de Rosarito, se identificó la presencia de un cambio cíclico en el volumen de arena con periodicidad de 36 meses (3 años). La amplitud del cambio de volumen de arena asociado al ciclo de 36 meses resultó ser de hasta 50 m³/m, un poco mayor que la amplitud asociada al cambio de volumen con periodicidad anual; aún más, el ciclo de 36 meses contribuyó a explicar hasta en 50% la varianza de los datos como se observa en los puntos de control N09, N07 y N03.

El ciclo anual de cambio de volumen de arena, como en el segmento de playa norte, está controlado por la estacionalidad invierno-verano del oleaje. Por otra parte, se concluye que la presencia del ciclo de 36 meses está relacionada con la variabilidad interanual en la rigurosidad de los inviernos y a su vez a la periodicidad de eventos ENSO.

En este segmento de playa en particular, la erosión intensa alrededor de los puntos de control N09 y N07 asociado a procesos de convergencia del oleaje pueden indicar la presencia e influencia de un punto caliente en esa localidad. La presencia del rompeolas de la CFE parece enmascarar los cambios periódicos, anuales o de 36 meses en las playas cercanas al rompeolas. En contraste, las

playas más alejadas del rompeolas, los cambios de volumen con las periodicidades señaladas son más evidentes.

6.2.3 Segmento de playa intermedio sur

El segmento intermedio sur comprende desde el perfil inmediato al espigón sur (S02) hasta Quintas del Mar (S20), y cubre una distancia de 2000 m hacia el sur del rompeolas de la CFE. La característica sobresaliente de esta playa es la irregular ubicación de infraestructura habitacional residencial y turística; residencias y aún hoteles se encuentran sobre la playa misma, que bajo condiciones de tormenta están sometidos al ataque directo de las olas; los cantiles son bajos y se han modificado para dar lugar a asentamientos urbanos y turísticos.

Algunos de los doce perfiles medidos mensualmente en esta sección, con separación entre ellos de 200 m, se encuentran sobre muros que están muy cercanos al mar y el registro del perfil corresponde principalmente a la cara de la playa; otros, se encuentran en sitios más hacia tierra por lo que es común la presencia de la berma en la mayor parte del tiempo. Es conveniente señalar que a pesar de estas diferencias, el perfil medido corresponde exclusivamente a la playa arenosa ya que hacia tierra del punto de control (banco de nivel) existen rasgos fijos como estructuras costeras o unidades habitacionales.

En la figura 56a se presentan las series temporales del volumen y en la figura 56b su transformación al campo de frecuencia para todos los puntos de control a lo largo de este segmento de playa. Del análisis espectral de la serie de volumen se observa cierta recurrencia en la predominancia del ciclo anual (estacional) sobre el pico espectral de 36 meses (3 años).

6.2.3.1 Oscilación periódica anual

En la figura 56b se puede observar que si bien todos los espectros de volumen de los perfiles en este segmento de playa muestran una clara presencia del pico espectral anual, la amplitud de este ciclo es más notoria en las playas

cercanas al rompeolas de la CFE, esto es, desde el punto de control S02 hasta el punto BN08 aproximadamente a 1100 m del rompeolas. En la playa más alejada del rompeolas, hacia el sur del punto de control BN08, los picos espectrales de 36 meses son relativamente similares en cuanto a amplitud. La predominancia del ciclo anual responde claramente al régimen estacional de oleaje como se explicó con anterioridad. En la figura 57 se ilustra como la amplitud del ciclo anual es cercana a los 80 m³/m a 400 m (S04) del espigón sur, explicando el 61% de la variabilidad del volumen de arena en la playa subaérea.

Esta porción de playa muestra las mayores amplitudes del ciclo anual a lo largo de los 11 km de playa bajo estudio como se indica en la tabla 11 y además, muestra una creciente acumulación de arena a lo largo del periodo de estudio (ver series temporales de volumen en S02, S04 y S06). Este comportamiento es debido muy posiblemente a que el espigón sur de la CFE actúa como trampa de la arena que es acarreada desde el sur por la corriente paralela a la playa inducida por las olas que provienen desde el SW a lo largo de todo el año y, desde atrás de la zona de rompiente por el oleaje de baja altura en el verano. La respuesta de la playa al régimen estacional del oleaje a lo largo de este segmento de playa es relativamente homogénea en cuanto a que en invierno se observa un proceso erosivo generalizado aunque de diferente magnitud para cada localidad. Esta oscilación anual ayuda a explicar hasta en un 60% la variabilidad del volumen de arena en la playa subaérea.

El pico espectral anual está presente al sur del espigón (hasta el BN08) y entre los 1600 y 1800 m desde el mismo espigón (S16 y S18). En estos puntos de control también se hace presente el pico alrededor de 22 meses (1.8 años), cuyo forzante no se ha podido identificar aunque también pudiera estar asociado a la ocurrencia periódica promedio de eventos ENSO.

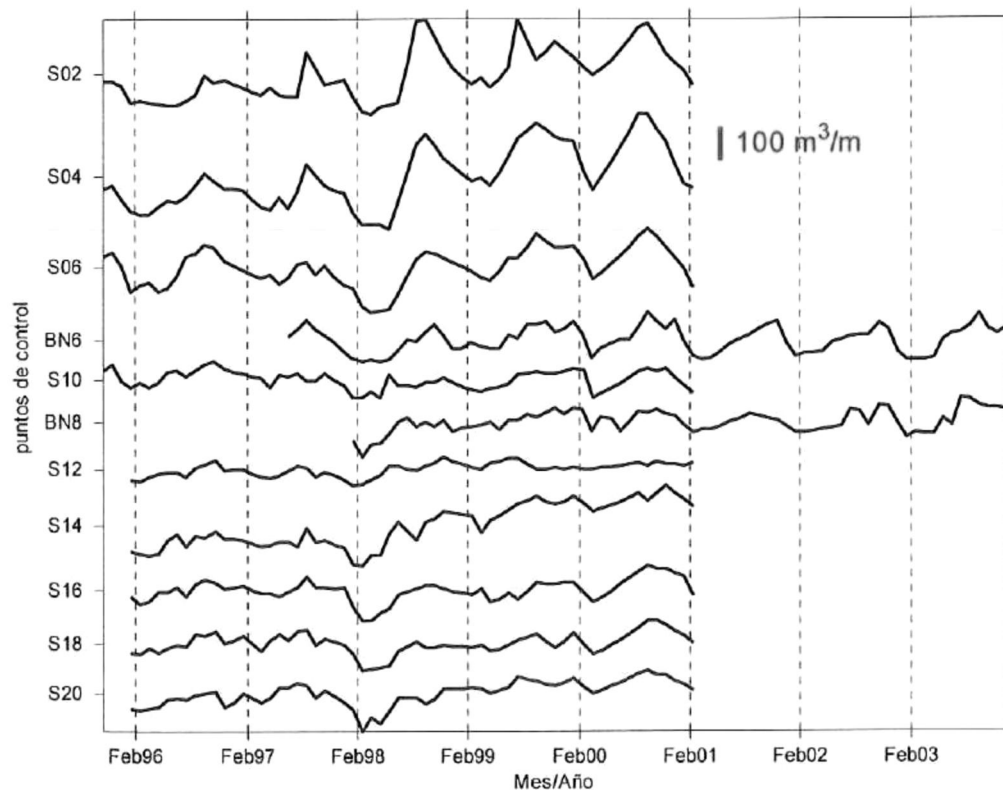


Figura 56a. Serie temporal del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento intermedio sur de Rosarito

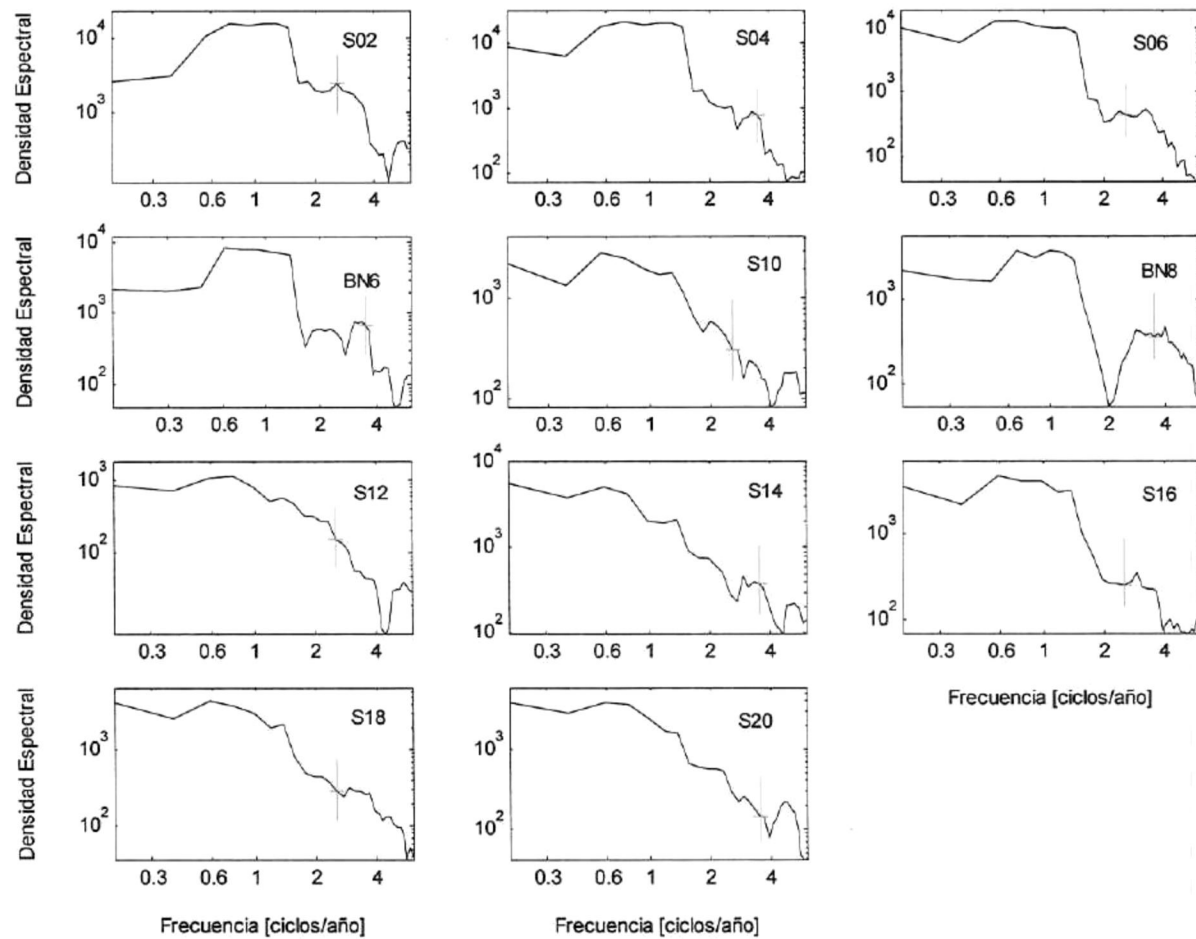


Figura 56b.- Análisis espectral del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento intermedio sur de Rosarito. En cada espectro se indica el intervalo de confianza al 95%.

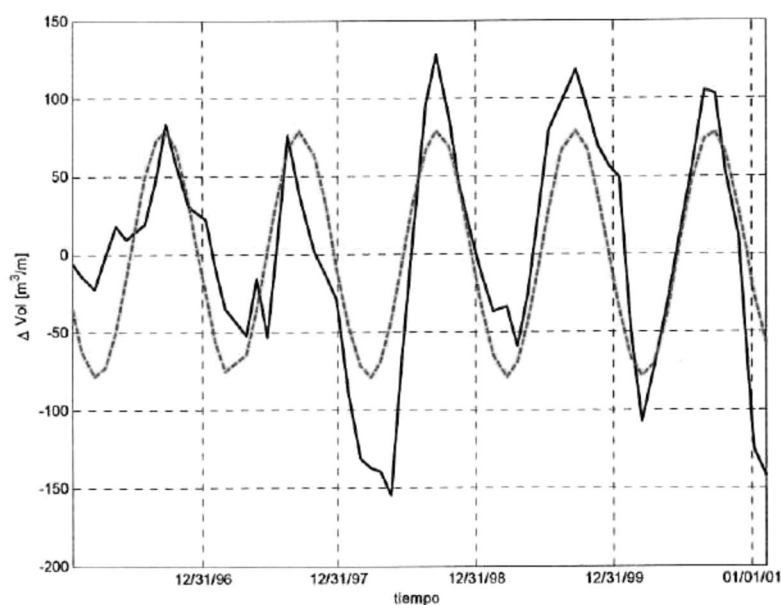


Figura 57.- Ajuste por cuadrados mínimos del ciclo anual del volumen de arena para el punto de control S04

Tabla 11.- Caracterización del ciclo anual en el cambio de volumen de arena para los perfiles de playa del segmento intermedio sur.

P. de control	Amplitud (m ³ /m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor min.	R ²
S02	62.5 ± 15.6	15 sep	25 mar	0.52 ± 0.17
S04	78.8 ± 16.3	19 sep	25 mar	0.61 ± 0.15
S06	59.3 ± 13.0	19 sep	25 mar	0.58 ± 0.16
BN06	43.8 ± 9.5	14 sep	23 mar	0.59 ± 0.16
S10	24.0 ± 7.7	19 sep	25 mar	0.39 ± 0.19
BN08	25.3 ± 9.0	18 sep	24 mar	0.35 ± 0.19
S12	10.0 ± 5.5	24 ago	18 feb	0.18 ± 0.17
S14	21.9 ± 11.1	10 sep	3 mar	0.21 ± 0.17
S16	31.2 ± 8.7	01 oct	28 mar	0.46 ± 0.18
S18	26.9 ± 9.0	19 sep	25 mar	0.38 ± 0.19
S20	20.5 ± 9.3	28 ago	27 feb	0.24 ± 0.18

6.2.3.2 Oscilación periódica de 36 meses (3 años)

En la figura 56b la oscilación del volumen de arena con periodo de 36 meses es más evidente en los perfiles cercanos al rompeolas de la CFE (del S02 al BN08) mientras que la oscilación de doce meses tiende a ser más prominente en la playa hacia el sur del punto de control BN08. Este comportamiento parece estar asociado a la diferencia de volumen que puede ser almacenado en el lado sur del espigón de la CFE bajo condiciones ENSO.

En la tabla 12 se presenta la amplitud y cantidad de varianza que es explicada por el modo de oscilación de 36 meses. En esta tabla se puede notar que la amplitud promedio del cambio de volumen con esta periodicidad es de $21.5 \text{ m}^3/\text{m}$, la cual es menor que la amplitud de la misma oscilación en el segmento intermedio norte ($34 \text{ m}^3/\text{m}$) lo que indica una menor influencia de este ciclo en este segmento y, en general, solo explica alrededor del 20% de la variabilidad del volumen de arena en este segmento de playa.

En la figura 58 se ilustra el ajuste del armónico de 36 meses para el punto de control S04 que, aunque sólo explica el 17% de la variabilidad del cambio de volumen, representa la segunda mayor amplitud, $40 \text{ m}^3/\text{m}$, que es influenciada por este componente en el segmento de playa intermedio sur. La mayor amplitud de la oscilación también se encuentra en la parte inmediata sur del rompeolas como se observa para la oscilación anual (tabla 11) por lo que se estima que la respuesta en el cambio de volumen está asociada a la acreción de arena en la parte corriente arriba del rompeolas.

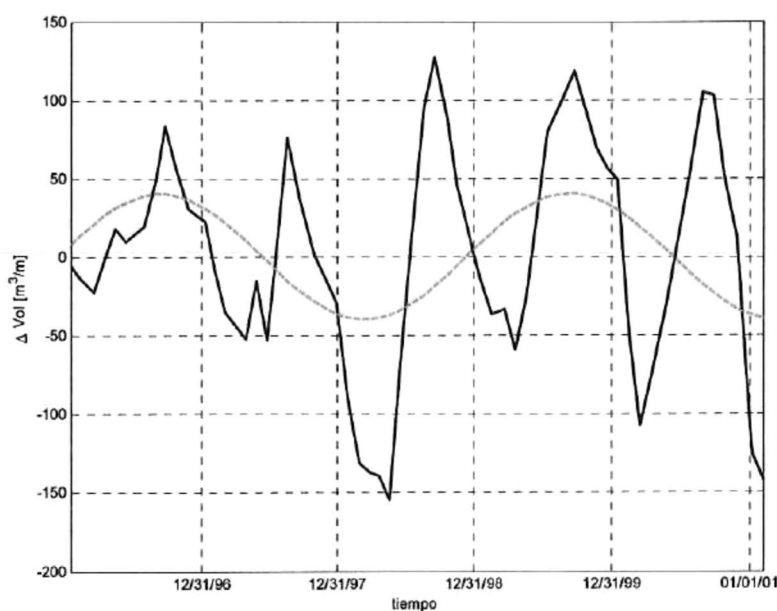


Figura 58.- Ajuste por cuadrados mínimos de la oscilación de 36 meses del volumen de arena para el punto de control S04.

Tabla 12.- Caracterización del ciclo de 36 meses (3 años) del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio sur.

P. de control	Amplitud (m ³ /m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor min.	R ²
S02	16.2 ± 21.3	20 oct 96	04 feb 98	0.04 ± 0.09
S04	40.0 ± 23.2	20 nov 96	07 mar 98	0.17 ± 0.16
S06	41.0 ± 17.2	22 dic 96	21 abr 98	0.27 ± 0.18
BN06	11.8 ± 13.5	03 feb 96	12 may 98	0.05 ± 0.10
S10	19.6 ± 8.8	09 feb 97	22 may 98	0.25 ± 0.18
BN08	12.6 ± 10.0	28 may 99	03 oct 01	0.10 ± 0.13
S12	9.6 ± 5.2	28 ago 96	09 dic 97	0.19 ± 0.17
S14	28.1 ± 9.7	26 oct 96	19 feb 98	0.36 ± 0.19
S16	15.2 ± 11.5	18 feb 97	28 may 98	0.10 ± 0.14
S18	19.9 ± 10.5	07 mar 97	05 jul 98	0.19 ± 0.17
S20	22.7 ± 9.2	28 ene 97	28 may 98	0.29 ± 0.19

6.2.3.3 Conclusiones.

El cambio de volumen con periodicidad anual comparado con el de periodicidad de 36 meses muestra una influencia ligeramente mayor en este segmento ya que en algunos casos, el primero explica hasta un 60% de la variabilidad del cambio. Como se ha señalado, el ciclo anual está asociado a la estacionalidad del oleaje invierno-verano y el ciclo de 36 meses a la periodicidad de ocurrencia de eventos ENSO. En las playas del sur, cercanas al rompeolas de la CFE, se presenta la mayor amplitud del volumen de arena, cercano a los 80 m³/m, que es movido bajo la influencia del ciclo anual. La predominancia de un ciclo u otro no es clara y pudiera estar asociada a que estas playas están sometidas a un complejo proceso de interacción entre las estructuras de la CFE, los efectos de refracción de las olas ocasionado por la compleja topografía submarina, la difracción del oleaje inducido por las islas y además por la presencia de estructuras habitacionales (residencias y hoteles) que están a mayor o menor distancia de la línea de playa.

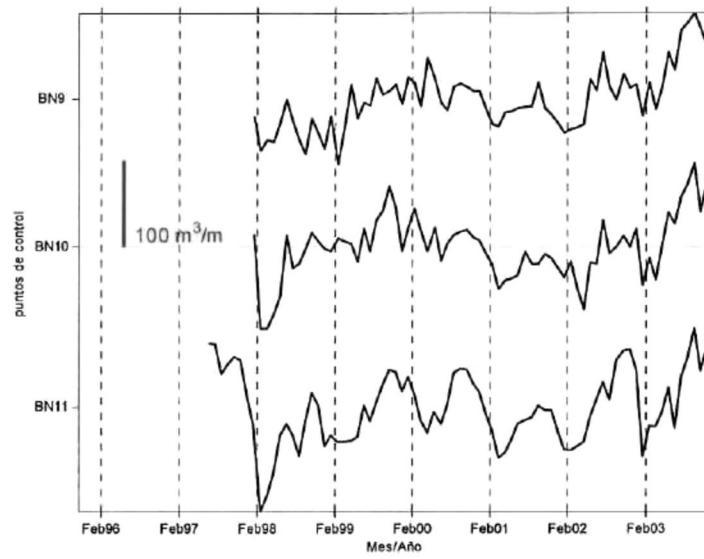
6.2.4 Segmento de playa sur:

El segmento de playa sur comprende desde una centena de metros al sur del Arroyo Guagatay (BN09) hasta el Hotel Rosarito Shores (BN11). Esta es la porción de playas más anchas en la zona de estudio ya que se registran volúmenes hasta de $350 \text{ m}^3/\text{m}$ (series temporales de BN09, BN10 y BN11). La presencia de muros es prácticamente nula a pesar de que en esta zona se encuentran los desarrollos turísticos playeros más importantes de la ciudad.

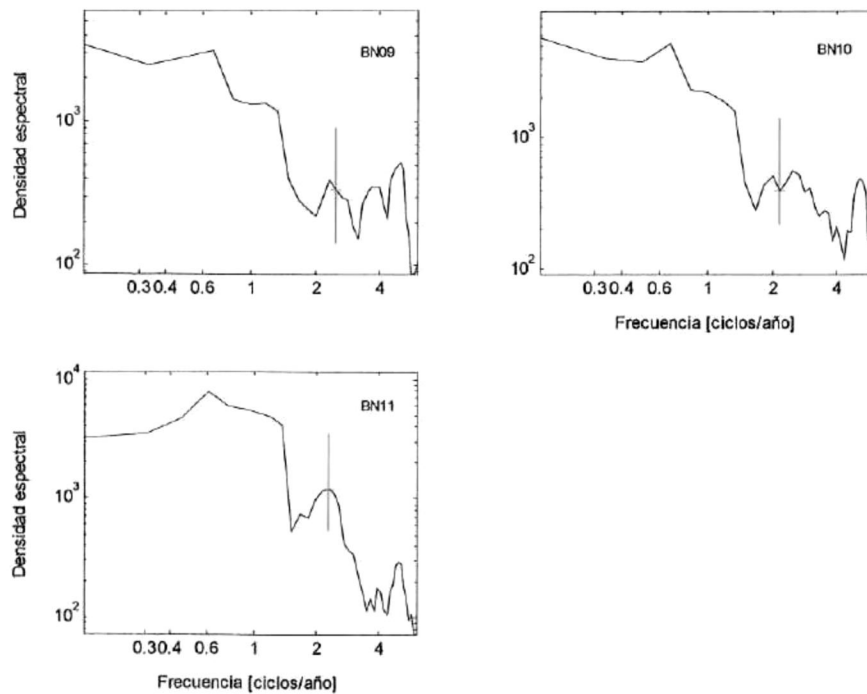
6.2.4.1 Oscilación periódica anual y de 36 meses

En la figura 59a se presenta la serie temporal de volumen de los tres puntos de control que comprenden este segmento de playa y en la figura 59b el análisis espectral de dichas series. Si bien en el primero se observa una mayor variabilidad en el volumen de arena, en el segundo se observa la persistencia de los picos de 12 y 36 meses, aunque también son notorios picos en las altas frecuencias o periodos de recurrencia bajo. En los puntos de control BN09 y BN10 el ciclo de 36 meses parece tener mayor amplitud que el anual mientras que en el punto de control más alejado, hacia el sur del rompeolas, es contrario. La persistencia en la mayor amplitud del pico espectral con el periodo mayor a los 36 meses conforme se avanza hacia el sur del rompeolas a partir del S12 hasta el BN10 con excepción del S16, S18 y BN11, este último a 3800 m del rompeolas, indica probablemente que la contribución de arena por los arroyos Guagatay y Rosarito, conforme a las variaciones interanuales de precipitación asociadas a eventos ENSO, tienen un papel importante como se discute en detalle en el siguiente apartado.

La caracterización del ciclo anual y del ciclo de 36 meses (tabla 13 y 14) muestran una amplitud relativamente menor comparada con la amplitud estimada en los segmentos intermedio sur e intermedio norte; de igual manera, el coeficiente de determinación indica que solamente en el BN11 el modo anual



(a)



(b)

Figura 59.- Series temporales (a) y espectros (b) del cambio de volumen de arena en los perfiles de playa del segmento sur de Rosarito. En cada espectro se indica el intervalo de confianza al 95%.

explica una parte importante de la variación. La baja contribución del cambio de volumen que es inducido por las oscilaciones de periodo anual y de 36 meses, como se desprende de los bajos valores de los coeficientes de determinación (R^2), puede indicar que existen otros procesos de mayor periodo que influyen en el volumen de arena contenido en la playa.

Tabla 13.- Caracterización del ciclo anual del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento intermedio sur.

P. de control	Amplitud (m ³ /m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor min.	R^2
BN09	12.0	09 ago	13 feb	0.12
BN10	21.7	28 sep	03 abr	0.23
BN11	32.9	14 sep	23 mar	0.42

Tabla 14.- Caracterización del ciclo alrededor de 36 meses del cambio de volumen de arena para los perfiles de playa en el segmento sur.

P. de control	Amplitud (m ³ /m)	Fecha de ocurrencia valor máx.	Fecha de ocurrencia valor min.	R^2
BN09	20.3	29 ene 98	24 mar 99	0.35
BN10	28	26 dic 97	6 jul 99	0.39
BN11	26.4	19 ago 97	26 dic 98	0.28

La tendencia a la disminución gradual de la amplitud el pico anual y el aumento en la amplitud el pico de 36 meses en esta extensión de playa (hacia el sur desde el S20 hasta el BN10) también puede estar asociada a patrones de transformación de las olas similares a los descritos para los "puntos calientes" del segmento intermedio norte indicados en la figura 55. De esta figura 55 se puede apreciar que la playa entre el punto de control S10 y BN10, aproximadamente a 1 km del norte de Punta La Paloma, se localiza una zona en la que los rayos de las olas muestran una clara divergencia que está flanqueada por dos zonas de convergencia. Esta zona de "calma" (figura 55a-d) cubre una mayor extensión de

playa en las estaciones de invierno y otoño y se reduce en extensión durante las estaciones de primavera y verano (figura 55b-c).

Es evidente que la posición y desplazamiento de estos puntos de divergencia-convergencia está controlada fundamentalmente por la dirección de viaje de las olas al romper, sin embargo, la menor protección que otorgan las Islas Coronado a esta sección de playa y la existencia de mayores profundidades cercanas a la costa dejan a este segmento de playa ligeramente más expuesto a las condiciones de oleaje de mar abierto.

En general se considera que los forzantes que inducen la periodicidad del cambio de volumen en la playa subaérea se puede explicar en términos del régimen de oleaje estacional, de la intensidad y número de tormentas invernales como se describió para el segmento intermedio sur e intermedio norte, pero también en términos de la contribución de arena por los arroyos Guagatay y Rosarito

6.2.4.2. Conclusiones

En este segmento de playa el volumen de arena movido bajo la influencia de la oscilación anual y de 36 meses resultó ser muy similar, sin embargo, el porcentaje de la varianza total que explicó la oscilación de 36 meses fue ligeramente superior al porcentaje de la varianza total que explicó la oscilación anual. La periodicidad de 36 meses parece estar asociada a la contribución de arena por los arroyos Guagatay y Rosarito en su componente interanual, a condiciones de oleaje con una menor influencia de los procesos de refracción y difracción producida por las Islas Coronado y a la posible presencia y desplazamientos de "puntos calientes", como se señaló para el segmento de playa intermedio sur.

6.3.- Cambios en la línea de playa a largo plazo.

Hasta ahora se han analizado los cambios de playa de corto y mediano plazo en términos del volumen de arena removido o depositado en la playa subaérea. Sin embargo, para estudiar los cambios de playa en el largo plazo es de mayor utilidad analizar la variabilidad en la posición de la línea de playa (PLP), ya que ésta representa el continuo espacial de la posición horizontal de la interfase agua-tierra. El desplazamiento hacia tierra o hacia el mar de la PLP es el reflejo de la predominancia de procesos erosivos o acrecionales respectivamente en un determinado lapso de tiempo.

Para lograr establecer la variabilidad de la PLP ésta se digitalizó de las fotografías aéreas de 1972, 1985 y la imagen satelital de 2002 para luego calcular las tasas de cambio de la PLP entre dichos periodos. La tasa de cambio se calculó en 50 transectos perpendiculares a la playa, que se definieron desde algunos metros al norte del punto de control BN03 hacia el sur hasta el Hotel Rosarito (BN11, que corresponde aproximadamente al transecto número 46). En todos los casos valores positivos de la tasa de cambio indican un cambio en la PLP en dirección hacia el continente (retroceso), mientras que valores negativos indican un cambio de la PLP en dirección hacia el mar (avance). Se escogió una separación entre cada transecto de 150 m, de manera que el calculo de la variabilidad espacial de la tasa de cambio de la PLP a lo largo de la playa resultara confiable al 95% (Dolan, Fenster y Holme, 1992).

Es de señalar que la tasa de cambio en la PLP hacia el norte del BN03, que incluye los puntos de control BN02 (Rancho del Mar) y BN01 (San Antonio del Mar), no se estimaron debido a que las fotografías e imagen no tienen la suficiente cobertura, por lo que sólo se estimó el retroceso o avance de la PLP en el largo plazo desde el punto de control BN03 (transecto 2) hacia el sur hasta el último transecto (transecto 50) que se encuentra a 600 m al sur del punto de control BN11 (Hotel Rosarito).

En la figura 60 se presenta la tasa de cambio en la PLP durante los periodos 1972 a 1985, 1985 a 2002 y 1972 a 2002 y su posición con referencia a los puntos de control. Se observa que la PLP muestra tasas de cambio contrarias en las playas hacia el norte del rompeolas en comparación a las tasas de cambio observadas en las playas hacia el sur del rompeolas. Los avances o retrocesos más sobresalientes corresponden a pequeñas playas que se formaron entre al interior del rompeolas y entre éste y los espigones, como se ilustra con mayor detalle más adelante. El comportamiento más notorio en el cambio de la PLP es la alternancia en el avance que predomina en las playas al sur del rompeolas y el predominio de los procesos erosionales en las playas al norte del mismo durante el periodo de 1972 a 1985 y el comportamiento contrario para el periodo de 1985 a 2002.

La alternancia temporal en el avance y retroceso de la PLP pudiera explicarse como una resultante de la contribución de sedimentos por los arroyos Rosarito y Guagatatay, localizados a 2000 y 4000 m al sur del rompeolas de la CFE, la interacción de las estructuras costeras de la CFE (rompeolas, espigones y canal de desfogue) con el transporte paralelo a la playa inducido por el oleaje y la posible presencia de "puntos calientes" como se discute a continuación.

La cantidad de precipitación es un indicador que guarda una relación directa con el volumen de sedimento que se drena de las cuencas hidrológicas (Langbein y Schumm, 1958) y que finalmente ingresa al sistema litoral (Komar, 1998). De los registros de precipitación obtenidos en la Presa Abelardo Rodríguez, un poco al norte de Rosarito, se define una marcada estacionalidad como se ilustra en la figura 61, donde la mayor precipitación ocurre durante los meses invernales, y por tanto, es durante estos meses cuando pudiera esperarse el mayor ingreso potencial de sedimentos al sistema litoral.

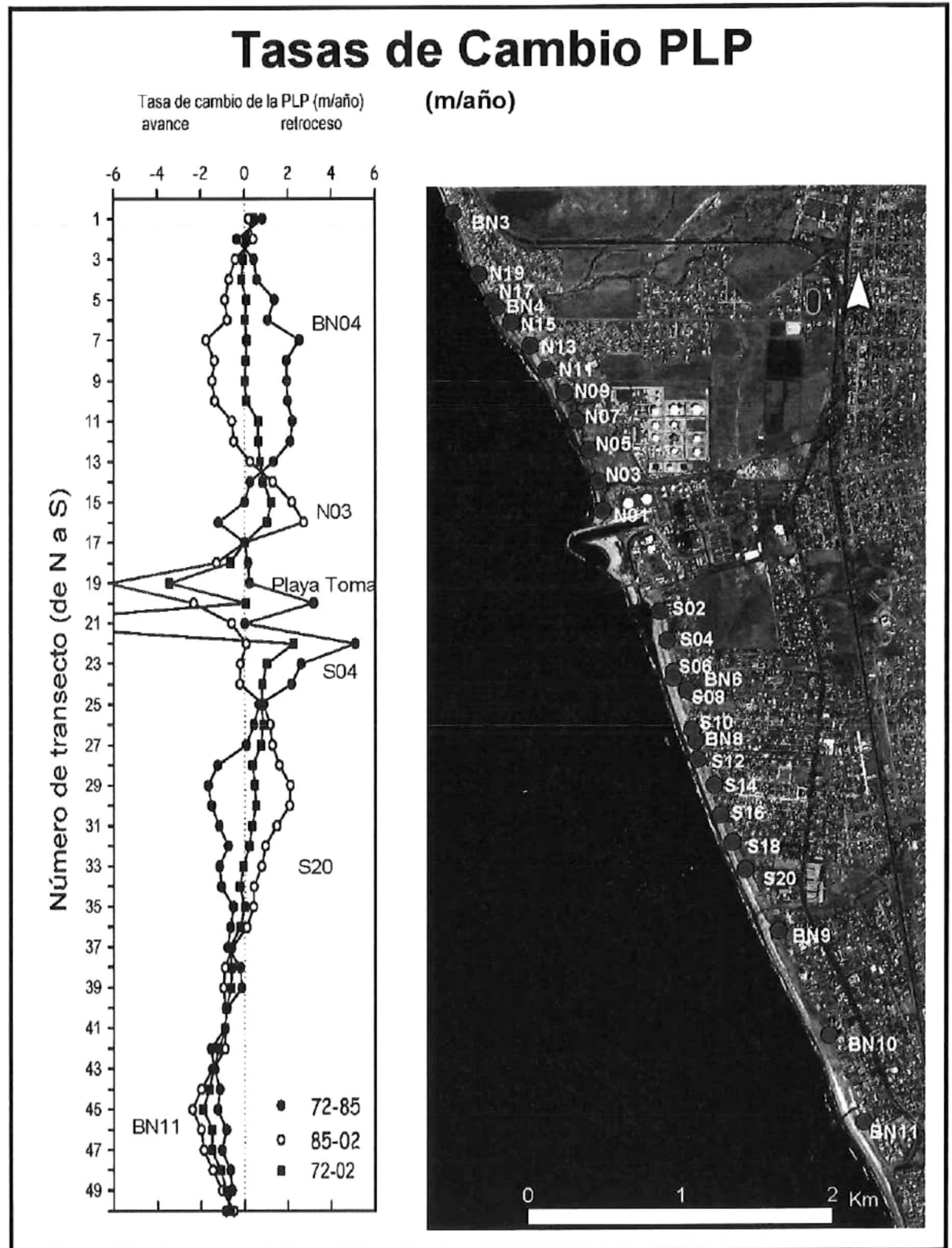


Figura 60.- Tasas de cambio de la PLP a lo largo de la playa de Rosarito estimadas a partir del análisis de dos fotografías aéreas de los años 1972 y 1985 y una imagen satelital del año 2002.

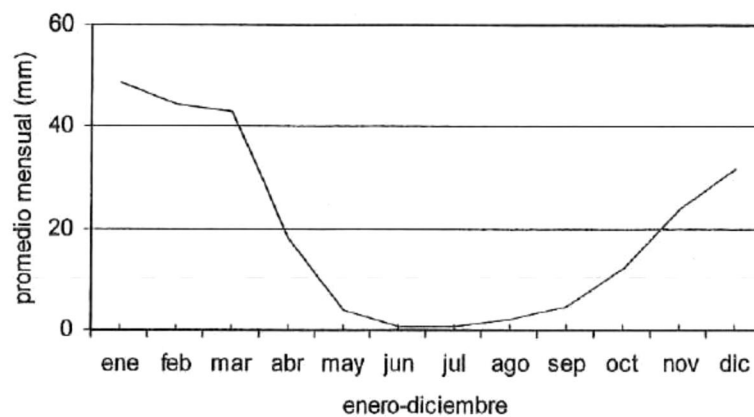


Figura 61.- Promedio mensual de la precipitación para el periodo de 1948 a 2002 en la localidad de la Presa Abelardo Rodríguez, Tijuana, B.C.

La precipitación promedio mensual de 1948 a 2002 muestra un patrón definido por una época de sequía y una húmeda que ha sido descrito para toda la Baja California (Reyes-coca y Troncoso Gaytán, 2004; Minnich, et al, 2000). La diferenciación entre estas épocas se puede observar a partir de la anomalía de precipitación invernal (noviembre-abril) como se muestra en la figura 62. El periodo de sequía es evidente de 1948 a 1972, en el que el promedio de precipitación fue de sólo 167 mm y la anomalía promedio de precipitación invernal de -41 mm. Considerando que los flujos y descargas de los arroyos no están documentados es de suponer que la contribución de sedimentos al sistema litoral por los arroyos de la zona fue baja y posiblemente tuvieron poca influencia en los cambios morfológicos de la playa y en la PLP.

En contraste, en la figura 62 se observa que a partir del invierno de 1972/1973 se inicia un periodo de mayor precipitación de manera que hasta el invierno 2001/2002 se considera como una época húmeda. La precipitación promedio invernal para el periodo de 1972-1985 fue de 250 mm mientras que para el periodo de 1985-2002 de 236 mm, dando lugar a anomalías positivas promedio de 42 y 32 mm respectivamente.

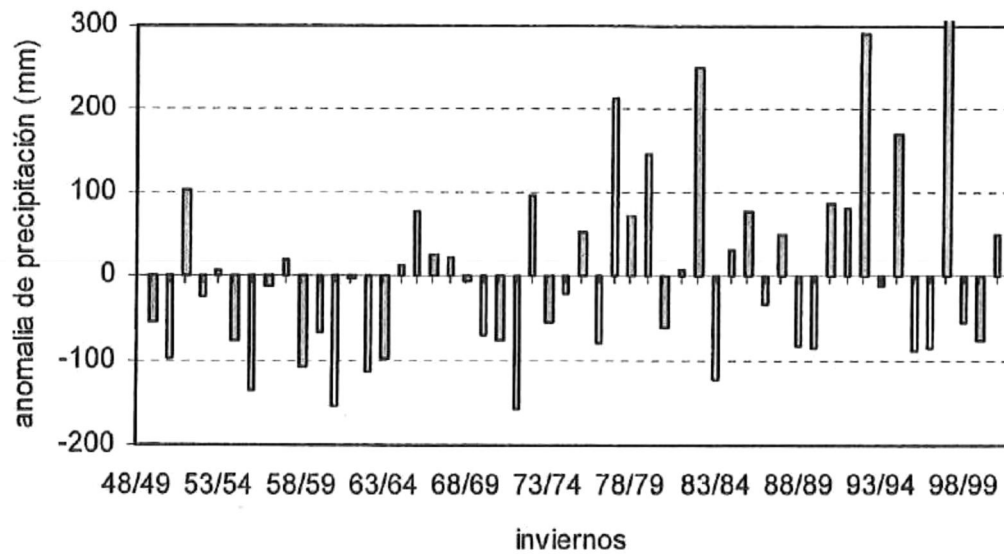


Figura 62.- Anomalia de la precipitación invernal (noviembre-abril) en los inviernos 1948/1949 a 2002/2003 en la localidad de la Presa Abelardo Rodríguez, Tijuana, B.C.

Es de esperar, por tanto, que importantes volúmenes de sedimento hubieran sido suministrados en esa época por los arroyos Guagatay y Rosarito y que a pesar de las ligeras diferencias, hayan tenido una importante influencia en las tasas de cambio de la PLP en dichos periodos como se discute a continuación.

Una vez ingresado al sistema, el sedimento es redistribuido a lo largo de la playa por las corrientes litorales que son generadas por el oleaje con dirección predominante hacia el NW, según lo muestran la estadística de oleaje medido frente a las estructuras costeras de la CFE. En la figura 63 se presentan con detalle el arreglo de espigones y rompeolas de la CFE que se encuentran hacia el norte de las desembocaduras de los arroyos y que actúan como obstáculo al paso de la corriente litoral que fluye hacia el NW, pero también se puede observar como el canal de desfogue de la CFE modula el patrón de erosión/depositación de arena cercano a ellas.



Figura 63.- Características de las playas cercanas a las estructuras de la CFE y en particular en la desembocadura del canal de desfogue.

Como respuesta a la presencia del espigón sur, la arena acarreada por la corriente litoral en dirección norte debería ser depositada en el lado inmediatamente al sur del espigón sur (S02 al S06). Sin embargo esto no sucede ya que el agua de enfriamiento de las turbinas de la planta termoeléctrica se conduce a la playa por un canal de desfogue (figura 60) cuyo flujo se prolonga a lo largo de la playa por algunas centenas de metros hacia el sur del espigón sur. Este flujo de agua del canal de desfogue actúa como un “espigón virtual” o “barrera dinámica” ya que mientras mayor sea la intensidad de flujo del agua desfogada mayor será su capacidad para disminuir la velocidad de la corriente litoral en sentido NW, y por tanto favorecer la deposición de arena en la zona en la que interactúan los dos flujos. De esta manera, la posición de la PLP inmediatamente al sur del espigón sur, en vez de avanzar hacia el mar, presentó un retroceso de hasta 5 m/año en el periodo de 1972 a 1985 mientras que la acumulación inducida por el “espigón virtual”, dió como resultado el avance hacia el mar de la PLP con una tasa de 1.7 m/año hasta aproximadamente 750 m al sur de la boca del canal de desfogue.

La deposición de arena corriente arriba del canal de desfogue (hacia el sur del espigón sur), que se señaló anteriormente, redujo el volumen de arena que se traspasa desde la parte sur hacia la parte norte del rompeolas ocasionando la erosión de la playa en el lado norte del rompeolas. Este cambio se observa en la figura 60 (periodo 1972-1985) en donde, entre los 600 m y 1350 m al norte del rompeolas (transectos 7 al 12), la tasa de retroceso máxima de la PLP fue de 2.5 m/año y pudo haberse debido fundamentalmente a que la arena proveniente del sur, que debería llegar a esta playa, no lo hizo ya que se depositó aproximadamente entre los 300 y 600 m al sur del espigón sur, donde interactúan el agua del canal de desfogue y la corriente litoral.

En el periodo de 1985/2002, se produce un patrón contrario al observado en el periodo 1972/1985 (figura 60): retroceso de la PLP en el lado sur del rompeolas y barrera dinámica y avance de la PLP en la parte norte del rompeolas.

Esto parece indicar una predominancia de oleaje proveniente del NW y una corriente litoral que transporta arena hacia el SW; sin embargo, el registro de olas en la zona de Rosarito (1994-2001) no indica un cambio en este sentido, esto es, la dirección de arribo de las olas fue del SW produciendo una corriente litoral hacia el NW que transporta la arena en el mismo sentido. El efecto inverso en la PLP al norte y sur del rompeolas se puede explicar en términos del “abundante” suministro de arena por los arroyos Guagatay y Rosarito en el periodo de 1985/2002 y la reducción en la capacidad de retención de arena del “espigón virtual” como se explica a continuación.

La precipitación promedio invernal de 236 mm durante el periodo de 1985/2002 es ligeramente menor que la correspondiente al periodo de 1972/1985 (250 mm). Sin embargo, esto implica un continuado suministro de sedimentos por los arroyos señalados durante el periodo de 1985/2002. El transporte de este material hacia el NW, vía corriente litoral, tiende a depositarse en el lado sur del rompeolas y de la barrera “dinámica” debiendo producir un avance de la PLP hacia el mar; sin embargo, el “exceso” de sedimento suministrado por los arroyos sobrepasa la capacidad de almacenamiento que produce el obstáculo “dinámico” en conjunto con el rompeolas, y por tanto, la arena es transferida hacia la parte norte del rompeolas y depositado a lo largo de este segmento de playa.

Por otro lado, la variabilidad de la PLP para los periodos 1972/1985 y 1985/2002 pudiera estar influenciada por efectos de eventos de corto plazo. Algunos de estos procesos están asociados, como se ha señalado, a la contribución excepcional de sedimento por los ríos o arroyos o bien a la migración e intercambio de volúmenes excepcionales entre la playa subaérea y el sistema de barras cercano a la costa y que incluso pueden tener ciclos de hasta una o dos décadas como se ha observado en otras playas del mundo (Larson y Kraus, 1991).

Estos cambios pueden relacionarse con eventos ENSO, por ejemplo, el evento ENSO de 1982/1983, uno de los más intensos en la treintena de 1970 a 2000 en el que se presentaron numerosas y persistentes tormentas con grandes olas en coincidencia con niveles elevados del nivel del mar ocasionando intensos procesos erosivos y destrucción de infraestructura residencial en la costa de California (Griggs y Brown, 1998). Debido a la cercanía y similitud de condiciones entre las playas de Rosarito y la región sur de California, es de esperar que los efectos de erosión intensa también se presentaran en las playas de Rosarito, aunque no existe evidencia de ello.

Partiendo de las condiciones señaladas, es posible que los procesos de re-acumulación y re-distribución de arena que dictan el avance o retroceso de la PLP entre 1972 y 1985 más que ser procesos graduales en uno u otro sentido, parecen estar fuertemente influenciados por las numerosas e intensas tormentas del invierno ENSO de 1983. De igual manera, la PLP en el 2002 pareciera ser resultado de la erosión de playa producida por la crudeza del invierno de 1998 y que a pesar de la relativa calma de los inviernos 1999 al 2002 continúa la redistribución de arena suministrada por los arroyos en el periodo de 1990/1998.

Los cambios de la PLP inducida por eventos excepcionales de tormentas con efectos en el largo plazo se han verificado en varias localidades en la costa W de Estados Unidos (Fenster y Dolan, 1994). Por ejemplo, Fenster et al., (2001) determinaron que la posición de la línea de playa de pre-tormenta (1958) presentó un importante retroceso debido a la excepcional tormenta del Miércoles de Ceniza en 1962 y, sólo hasta seis años después, en 1968 regresó a su posición "original"; después de una tormenta de pequeña magnitud en 1974, la línea de playa recuperó la posición de 1962. Ciclos similares de hasta 10 años de acreción continua se han determinado para estas costas (Douglas y Crowell, 2000).

Una evidencia sobre la gran variabilidad de la PLP en el mediano plazo se puede obtener de los perfiles de playa medidos en Rosarito como se muestran en

la figura 64. En cada punto de control se obtuvo la diferencia del valor del ancho de playa entre el primer y último perfil medido de las bases de datos de la CFE y UABC) y en ellas se contiene el significativo cambio de playa inducido por el invierno Niño 1997/1998. Se estimó que las tasas de avance o retroceso de la PLP son del orden de ± 5 m/año con un avance máximo de 10 m/año en la playa inmediata al sur de espigón sur y un retroceso máximo de 17 m/año a 800 m aproximadamente al norte del rompeolas.

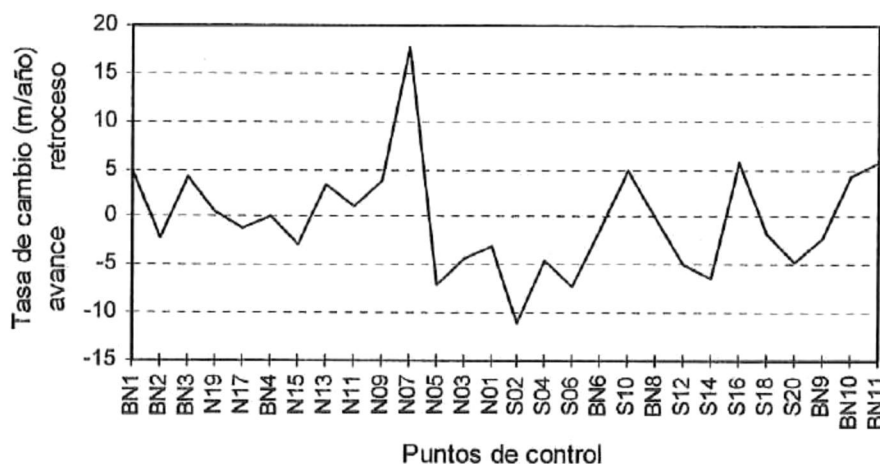


Figura 64.- Tasa de cambio de la PLP estimado de la serie temporal de perfiles de playa

La PLP en el periodo de 1972 a 2002 muestra un patrón de cambios un tanto menos variables que los discutidos con anterioridad (figura 60). La tasa de retroceso es alrededor de 1 m/año para los transectos 11 al 16, que comprenden la playa desde los 300 m hasta los 1000 m al norte del rompeolas y que está controlada por la influencia de la corriente litoral en sentido hacia el norte y por la posible ubicación de "puntos calientes". La tasa máxima de retroceso de 2 m/año sólo se observa en la playa inmediata al sur del espigón sur de la CFE haciendo patente la influencia del canal de desfogue de la CFE en ese segmento de playa. La tasa máxima de avance de playa, cercana a 2 m/año en las playas más alejadas hacia el sur del rompeolas, es similar a la mostrada para cada uno de los periodos de comparación (1972/1985 y 1985/2002) y está asociada, como se ha señalado, al suministro constante y "abundante" de arena por los arroyos

Guagatay y Rosarito. Cuando se considera el lapso total entre comparaciones de la PLP, los efectos de corto plazo se filtran de manera que las tasas de cambios (avance o retroceso) a lo largo de la playa son menores que las obtenidas en el corto plazo como se ha señalado para otras playas (Crowell, et al., 1993; Dolan et al., 1991).

6.3.1 Conclusiones

Los cambios de la PLP que son de menor magnitud (menores de 0.5 m/año) en el lapso total de las fotografías aéreas ocurren en las playas más alejadas hacia el norte y hacia el sur del rompeolas. Los extensos muros costeros ubicados en la parte norte y los cantiles cercano a Punta La Paloma, inhiben el retroceso de playa que pudiera ser inducido por procesos naturales.

Las mayores tasas de cambio de la PLP ocurrieron en las playas hacia el sur del rompeolas con un retroceso máximo de 2.2 m/año en el punto más inmediato al rompeolas, aunque el promedio de retroceso fue de 0.76 m/año en este segmento de playa. Las tasas de avance en el lapso 1972-2002, que en promedio fue de 0.88 m/año, presentaron su mayor magnitud en las playas cercanas a las desembocaduras de los arroyos Guagatay y Rosarito.

La continua contribución de arena por estos arroyos durante la época húmeda en la región ha sido un factor esencial en la evolución de la PLP. Es posible que la influencia de eventos episódicos (corto plazo) de los años Niño 1983 y 1998 hayan dejado su huella al producir mayor variabilidad en la PLP de 1972 a 1985 y de 1985 a 2002, por lo que la comparación de 1972 a 2002 parece reducir esta influencia.

En general, se puede concluir que los cambios de la PLP en el lapso del orden de 10 a 15 años muestran un mayor rango de cambio que cuando se comparan con el lapso de treinta años (1972 a 2002).

7.- CONCLUSIONES GENERALES

7.1 Cambios de playa en el corto plazo.

La ocurrencia de varias tormentas en lapsos cortos de tiempo pueden constituir un evento episódico forzante con efectos erosionales de importancia para la región de Rosarito. La respuesta temporal de la playa a este forzante es prácticamente inmediata. La respuesta espacial es simultánea, aunque no de la misma magnitud a lo largo del litoral bajo estudio y es independiente de la presencia de estructuras costeras como rompeolas, espigones y muros costeros.

Las playas del segmento norte del área de estudio tienen una menor capacidad de almacenamiento de arena debido a la presencia de muros costeros y a la morfología local, caracterizada por la plataforma rocosa de baja marea. En este mismo segmento, los depósitos de grava y canto rodado representan un rasgo que puede proveer de protección a la infraestructura habitacional contra la acción del oleaje.

El número de Dean resultó ser un buen indicador los procesos de erosión/depositación inducido por las olas en la playa subaérea. Se concluye que la influencia de las olas de tormenta excepcionales ocasiona que la profundidad de movimiento activo de sedimentos inducido por las olas sea más allá de los 18 m. El volumen de arena en la playa subaérea se puede reducir hasta en $3.2 \text{ m}^3/\text{m}/\text{día}$, mientras que el ancho de playa se puede reducir hasta $1.4 \text{ m}/\text{día}$ y la elevación del perfil puede disminuir hasta 3.5 m como resultado de eventos episódicos inducidos por tormentas invernales.

7.2 Cambios de playa en el mediano plazo.

A lo largo de las playas en estudio se identificaron dos periodicidades principales asociadas a los cambios de playa: uno anual (12 meses) inducido por

el régimen estacional de olas, que produce la acreción de la playa en verano y erosión en invierno, y otro, por primera vez identificado, de 36 meses, asociado a la variabilidad en la rigurosidad de los inviernos y ésta a su vez a la ocurrencia de eventos ENSO. La caracterización estacional del número de Dean resultó ser un indicador adecuado para predecir la formación de un perfil con berma o un perfil con barras.

El ciclo anual resultó ser el cambio periódico más importante en las playas de Rosarito, ya que la contribución del cambio de volumen de playa atribuible a esta oscilación fue de entre 10 y 80 m³/m, explicando en una tercera parte de todos los perfiles hasta el 64% de la varianza total de la variabilidad.

Los cambios periódicos de 36 meses, si bien están presentes en la mayoría de los perfiles de playa a lo largo de la zona de estudio, sólo contribuyen al cambio total de volumen de arena con 10 a 41 m³/m, la mitad de la contribución del ciclo anual, y en un poco menos de la tercera parte de todos los perfiles explica hasta un máximo de 40% de la varianza total de la variabilidad de los datos.

Por primera vez, y sólo en dos localidades en playas del segmento norte en Rosarito, se registra el ciclo anual de erosión-acreción de forma invertida, esto es, erosión en verano y acreción en invierno. Esta inversión del ciclo se debe a cambios morfológicos de la playa y al ángulo de rompiente de las olas al llegar a la playa.

7.3 Cambios en la posición de la línea de playa en el largo plazo.

Para las playas de Rosarito la tasa de cambio de la PLP fue de hasta 2 m en el lapso de 30 años. Los cambios de la PLP que son de relativa menor magnitud (menores de 0.5 m/año) en el lapso total de las fotografías aéreas ocurren en las playas más alejadas hacia el norte y hacia el sur del rompeolas.

Los extensos muros costeros en la parte norte y los cantiles cercanos a Punta La Paloma inhiben el retroceso de playa que pudiera ser inducido por procesos naturales.

Las mayores tasas de cambio de la PLP ocurren en las playas hacia el sur del rompeolas, con un retroceso máximo de 2.2 m/año en el punto más cercano al rompeolas, aunque el promedio de retroceso es de 0.76 m/año en este segmento de playa. Las tasas de avance en el lapso 1972-2002, con un promedio de 0.88 m/año, presentan su mayor magnitud en las playas cercanas a las desembocaduras de los arroyos Guagatay y Rosarito. La continuada contribución de arena por estos arroyos durante la época húmeda de precipitación en la región, y la interacción con las estructuras de la CFE (rompeolas, espigones y canal de desfogue), han ocasionado que los mayores avances y retrocesos de PLP se presenten en las playas inmediatas a las estructuras.

Aunque no es factible afirmarlo, es probable que la influencia de eventos episódicos (corto plazo) de los años Niño 1983 y 1998 hayan dejado su huella al producir mayor variabilidad en la PLP de 1972 a 1985 y de 1985 a 2002 por lo que la comparación de 1972 a 2002 reduce esta influencia.

8.- LITERATURA CITADA

- Abele, R.W.Jr., 1977. Analysis of Short-Term Variations in Beach Morphology (and Concurrent Dynamic Processes) for Summer and Winter Periods, 1971-72, Plum Island, Massachusetts. U.S.Army Corps of Engineers, *Miscellaneous Report No. 77-5*, 101pp.
- Allan, J., and P. Komar, 2000. Are Ocean Wave Heights Increasing in the Eastern North Pacific?. EOS, Transactions. *American Geophysical Union*. v. 81, n. 47, p. 561-567.
- Anders, F.J., and M.R. Byrnes, 1991. Accuracy of Shoreline Change Rates as Determined from Maps and Aerial Photographs. *Shore and Beach*, v. 59, n.1, p. 17-26.
- Appendini-Albretchsen, C.M. 1995. Aplicación de un Modelo Numérico para la Estimación de Volúmenes de Azolve en la Central Termoeléctrica de Rosarito, B.C. *Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C.*, 94 pp.
- Appendini, C.M., R. Lizárraga-Arciniega, and R. García-Krasovsky, 1997. Modeling Longshore Sediment Transport and Shoaling Assessment. In: *Magoon, O.T., H. Converse, B. Baird, and M. Miller-Hneson (Eds). Conference Proceedings California and the World Ocean' 97, ASCE*, v.2, pp.1682-1693.
- Appendini-Albretchsen, C.M., 1998. Plan de Manejo de la Erosión Costera Para Playas de Rosarito, Baja California, Mexico. *Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias Marinas, UABC.*, Ensenada, B.C., 123pp.

- Aubrey, D.G., 1979. Seasonal Patterns of Offshore/Onshore Sediment Movement. *Journal of Geophysical Research*, V. 84, p. 6347-6354.
- Badan, Antonio, 2003. The Effects of El Niño in Mexico: A survey. *Geofísica Internacional*, v.42, n.3, pp. 567-571.
- Basco, D.R., D.A. Bellomo, J.M Hazelton and B.N. Jones, 1997. The Influence of Seawalls on Subaerial Beach Volumes with Receding Shorelines. *Coastal Engineering*, v.30, p. 203-233.
- Bascom, W., 1964. Waves and Beaches. Science Studies Series, Anchor Books, NY, 267pp.
- Bittencourt, A.C.S.P., E.E.S. Sampaio, and S.F. Farias, 1997. Beach Imaging Trough the Time Evolution of Topographical Profiles. *Journal of Coastal Research*, v. 13, n.4., p. 1141-1149.
- Bird, E.C.F., 1987. The Modern Prevalence of Beach Erosion. *Marine Pollution Bulletin*, v.18, p. 151-157.
- Bokuniewicz, H.J., and S. Tangren, 1985. Volume Requirement for the Subaerial Beach at East Hampton, New York. *Shore and Beach*, v.53, n.1, p.16-18.
- Bokuniewicz, H.J., 1998. Monitoring Beaches: Conditions at the Village of East Hampton, NY. *Shore and Beach*, v.66, n.4. pp.12-17.
- Boothroyd, J.C., M.F. Dacey, J.C. Gibeaut, and J.J. Rosenberg, 1986. Geological Aspects of Shoreline Management: A Summary for Southern Rhode Island, University of Rhode Island, Kingston, Rhode Island, *Unpublished Technical Report No. 6-SRG*, 104 pp.

- Carrillo-Berumen, R.M., 1998. Dinámica Sedimentaria en las Inmediaciones de la Obra de Toma de la Central Termoeléctrica Presidente Juárez en Rosarito, B.C., México. *Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC*, Ensenada, B.C. 134 pp.
- Clark, J.R., 1996. Coastal Zone Management, Handbook. *CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida*, 694 pp.
- Clarke, D.J., and I.G. Eliot, 1988. Low-Frequency Changes of Sediment Volume on the Beachface at Warilla Beach, New South Wales, 1975-1985. *Marine Geology*, v. 79, p. 189-211.
- CCSTWS (Coast of California Storm and Tidal Waves Study), 1991. State of the Coast Report, San Diego Region. *U.S. Army Corps of Engineers*. Los Angeles District. Vol. 1.
- Coria-Mendez, P., 1991. Distribución de Probabilidad de la Altura Significante del Oleaje y Cálculo de Periodos de Retorno para el Puerto de Ensenada, B.C., Mexico. *Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, UABC*. Ensenada, B.C., 40pp.
- Crowell, M., S.P. Leatherman, M.K. Buckley, 1993. Shoreline Change Rate Analysis: Long Term Versus Short Term Data. *Shore and Beach*, v.61, n.2, p. 13-20.
- Dalrymple, R.A., 1992. Prediction of Storm/Normal Beach Profiles. *Journal of the Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v.118, n.2, p.193-200.
- De-Dios-Sanchez, D.R., 2002. Climatología de la Altura Significante del Oleaje Frente a la Costa del Pacífico de Baja California a Partir de Datos del

Altímetro a Bordo del Satélite ERS-2. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C., 66p.

Dean, R.G., 1973. Heuristic Model of Sand Transport in the Surf Zone, *Proc. 1st Australian Conf. on Coastal Engineering*, Engineering Dynamics in the Surf Zone, Sydney, Australia, pp. 209-214.

Desser, C., and J.M. Wallace, 1987. El Niño Events and Their Relation to Southern Oscillation: 1925-1986. *Journal of Geophysical Research*, v. 92, n. C13, p. 14189-14196.

Dolan, R.B., B. Hayden, P. May, and S. May, 1980. The Reliability of Shoreline Changes Measured from Aerial Photographs. *Shore and Beach*, v. 48, p. 22-29

Dolan, R., M.S. Fenster, and S.J. Holme, 1991. Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, v. 7, n.3, p. 723-744.

Dolan, R., MS. Fenster, and S.J. Holme, 1992. Spatial Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, v. 8, n.2, p. 263-285.

Dolan, R., and R.E. Davis, 1992. An Intensity Scale for Atlantic Coast Northeast Storms. *Journal of Coastal Research*, v.8, n.4, pp.840-853.

Douglas, B. C. and M. Crowell, 2000. Long-term Shoreline Position Prediction and Error Propagation. *Journal of Coastal Research*, v. 16, n.1, p. 145-152.

Egense,A.K., 1989. Southern California Beach Changes in Response to Extraordinay Storm. *Shore and Beach*, v. 57, 14-17.

- Eliot, I.G., and D.J. Clarke, 1982. Seasonal and Biennial Fluctuation in Subaerial Beach Sediment Volume on Warilla Beach, New South Wales. *Marine Geology*, v. 48, p. 89-103.
- Eliot, I., and D. Clarke, 1989. Temporal and Spatial Bias in the Estimation of Shoreline Rate-of-Change Statistics from Beach Survey Information. *Coastal Management*, v. 17, pp. 129-156.
- EURA (Espacio Urbano y Arquitectura), 1992. Programa Regional de Desarrollo Urbano del Corredor Tijuana-Ensenada, Baja California. Segunda etapa. No publicado, 145 pp.
- Evert, C.H., C.D. Eldon, and J. Moore, 2002. Performance of Cobble Berms in Southern California. *Shore and Beach*, v.70, n.4, pp.5-14.
- Fenster, M., and R. Dolan, 1994. Large-Scale Reversals in Shoreline Trends Along the U.S. Mid-Atlantic Coast. *Geology*, v.22, p. 543-546.
- Fenster, M.S., R. Dolan, and R.A. Morton, 2001. Coastal Storms and Shoreline Change: Signal or Noise?. *Journal of Coastal Research*, v.17, n. 3, pp.714-720.
- Flick, R.E., and D.C. Cayan, 1985. Extreme Sea Levels on the Coast of California. Proc. of the 19th Coastal Engineering Conference. In: Edge, B.L. (Ed). ASCE Houston, Texas.
- Flick, R.E., and A. Badan-Dangon, 1989. Coastal Sea Levels During the January 1988 Storm Off the Californias. *Shore and Beach*, v. 57, n 4, p. 28-31.

Flick, R.E., and E.H. Sterrett, 1994. "The San Diego Shoreline". *Shoreline Erosion Assessment and Atlas of the San Diego Region, Vol.1*. Sacramento, California: California Department of Boating and Waterways, 135pp.

Gómez-Morín, F.L., A. Escofet, I. Espejel, J.L. Fermán, G. Torres, R. Guardado y L. Cupul, 1993, Evaluación Ecológica para Usos Múltiples. Programa Regional de Desarrollo Urbano Turístico y Ecológico del Corredor Costero Tijuana-Ensenada. *Informe Técnico Final*. UABC-Gobierno del Estado de B.C.-SAHOPE, Mexicali, B.C. 58pp.

Griggs, G.B., and K.M. Brown, 1998. Erosion and Shoreline Damage Along the Central California Coast: A Comparison between the 1997-98 and 1982-83 ENSO Winters. *Shore and Beach*, v.66, n.3, pp. 18-23.

Hicks, D.M., T.M. Hume, A. Swales, and M.O. Green, 1999. Magnitudes, Spatial Extent, Time Scales and Causes of Shoreline Changes Adjacent to an Ebb Tidal Delta, Katikati Inlet, New Zealand. *Jour. Coast. Research*, v.15, n.1, p.220-240.

<http://cdip.ucsd.edu> , 2004.

<http://userwww.sfsu.edu> , 2000

<http://www.pepps.fsu.edu/FSOC/> , 1996

Inman, D.L., and C.E. Nordstrom, 1971. On the Tectonic and Morphologic Classification of Coasts. *The Jour. of Geology*, v.79, n.1, p.1-20.

Jensen, J.R., 1986. Introductory Digital Image Processing. Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J. 379pp.

- Jiménez, J.A., A. Sánchez-Arcilla, J. Bou, and M.A. Ortiz, 1997a, Analyzing Short-Term Shoreline Changes Along the Ebro Delta (Spain) Using Aerial Photographs. *Journal of Coastal Research*, v.13, n. 4, pp. 1256-1266.
- Jiménez, J.A., A. Sanchez-Arcilla, and A. Maldonado, 1997b. Long to Short Term Coastal Changes and Sediment Transport in the Ebro Delta: a Multi-Scale Approach. *In: Transformations and Evolution of the Mediterranean Coastline*. Brian Frédéric and A. Maldonado (Eds.) CIESM Science Series No. 3.
- Komar, P.D., 1978. Wave Conditions on the Oregon Coast During the Winter of 1977-78 and the Resulting Erosion of Nestucca Spit. *Shore and Beach*, v.46, n.4, pp. 3-8.
- Komar, P.D., 1998. Beach Processes and Sedimentation. 2nd Ed. Prentice Hall Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 544 pp.
- Kraus, N.C., M. Larson, and D. Kriebel, 1991. Evaluation of Beach Erosion and Accretion. Proceedings Coastal Sediment '91, American Society of Civil Engineers, p. 572-587
- Lacey, E.M., and J.A. Peck, 1998. Long-term Beach Profile Variations Along the South Shore of Rhode Island, U.S.A. *Journal of Coastal Research*, v. 14, n.4., p. 1255-1264.
- Langbein, W.B. and S.A. Schumm, 1958. Yield of Sediment in Relation to the Mean Annual Precipitation. *Transactions American Geophysical Union*, v.39, pp. 1076-1084.

- Larson, M., and N.C. Kraus, 1989. SBEACH: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change, Report 1. Empirical Foundation and Model Development. *Tech. Report CERC-89-9*. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Larson, M. and N.C. Kraus, 1991. Mathematical Modelling of the Fate of Beach Fill. *Coastal Engineering*, v. 16, n.1, p. 83-114.
- Larson, M., and N.C. Kraus, 1994. Temporal and Spatial Scales of Beach Profile Change, Duck, North Carolina. *Marine Geology*, v. 117, p. 75-94.
- Lee, G., R.J. Nicholls and W.A. Birkemeier, 1998. Storm-Driven Variability of the Beach-Nearshore Profile at Duck, North Carolina, USA, 1981-1991. *Marine Geology*, v. 148, p.163-177.
- Legg, M.R., V. Wong O., and F. Suarez V., 1991. Geologic Structure and Tectonics of the Inner Continental Borderland of Northern Baja California. In: *The Gulf and Peninsular Province of California*. Douphin, Paul and Simonpit Bernard (ed). American Assoc. Petroleum Geol. Memoir # 47, p. 145-177.
- Lizárraga-Arciniega, J.R., C.M. Appendini-Albretchen y D.W. Fischer, 1998. Planificación para el Manejo de la Erosión de Playa en Playas de Rosarito, B.C.: Un prototipo para México. *Gaceta Ecológica*, INE-Semarnap, n. 49, p. 44-57.
- Lizárraga-Arciniega, R., A. Chee-Barragán, E. Gil-Silva, T. Mendoza-Ponce and A. Martínez Díaz de León, 2003. Effect of El Niño on the Subaerial Beach Playas de Rosarito, B.C., Mexico. *Geofísica Internacional*, v.42, n.3, pp. 419-428.

- Macdonel, J.G. y J. Torres-Coto, 1962. Estudio de Corrientes y Agitación Dentro de la Obra de Toma Marina en la Planta Termoeléctrica de Rosarito, B.C. UNAM, Mexico. *No publicado*.
- Macintosh Program Performs Time-Series Analysis, 1996. http://www.agu.org/eos_elec . American Geophysical Union p.1-4
- Marichal-González, A.M., 2001. Análisis Estadístico del Oleaje Medido Frente a las Costas de Rosarito, B.C. de 1994 a 1998. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C., 70 pp
- Marmolejo-Lara, M., 1985. Control de Azolvamiento en una Obra de Toma de Agua Marina. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias Marinas, UABC, Ensenada, B.C., 60 pp
- Martínez-Díaz de León, A., R. Lizarraga-Arciniega, and F.J. Ocampo-Torres, 2002. The Usefulness of CDIP Wave Data Further South of the U.S.-Mexican Border. *Shore and Beach*, v.70, n.4, p.2-4.
- Mason, T., and T. T. Coates, 2001. Sediment Transport Processes on Mixed Beaches: A Review for Shoreline Management. *Journal of Coastal Research*, v.17, n.3, pp. 645-657.
- Masselink, G., and C.B. Pattiaratchi, 2001. Seasonal Changes in Beach Morphology Along the Shelterd Coastline of Perth, Western Australia. *Marine Geology*, V. 172, p. 243-263.
- Mendoza-Ponce, E.T., 1999. Variación Espacio-Temporal del Perfil de Playa en Rosarito, Baja California, Mexico. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias Marina, UABC. Ensenada, B.C. 50 pp.

- Minch, J.A., 1967. Stratigraphy and Structure of the Tijuana-Rosarito Beach Area, Northwestern Baja California, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* v. 78, p.1155-1178
- Minch, J.A., 1970. The Miocene of NorthWestern Baja California, Mexico. *Pacific Slope Geology of Northern Baja California and Adjacent Alta California*, p. 100-102.
- Minnich, R.A., E.F. Vizcaíno, and R.J. Dezzani, 2000. The El Niño/Southern Oscillation and Precipitation Variability in Baja California, Mexico. *Atmosfera*, v. 13, pp. 1-20
- Moffat & Nichol Engineers, 1989. Historic Wave and Sea Level Data Report, San Diego Region. *Coast of California Storm and Tidal Wave Study 88-6*. U.S.Army Corps of Engineers, Los Angeles District.
- Montes de Oca, M., 1989. Topografía. Ediciones Alfaomega S.A. de C.V., Mexico. 344 pp.
- Moore, L.J., and G.B. Griggs, 2002. Long-term Cliff Retreat and Erosion Hotspots Along the Central Shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. *Marine Geology*, v.181, pp. 265-283.
- NOAA, 2002 . www.cdc.noaa.gov
- Nordstrom, C.E., and D.L. Inman, 1975. Sand Level Changes on Torrey Pines Beach, California. *Misc. Paper 11-75*. U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, CERC, Vicksburg, MS.

Oropeza-Rosales, F., 1998. Descripción del Clima de Oleaje para las costas Mexicanas del Oceano Pacífico en los Estados de Baja California, Colima, Michoacán y Guerrero. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias Marinas, UABC., Ensenada, B.C. 218pp.

Pacific ENSO Application Center, 2004.
<http://tutt1.soest.hawaii.edu/Enso/index.html>

Parker, B.B., 2003. The Difficulties in Measuring a Consistently Defined Shoreline: The Problem of Vertical Referencing. *Journal of Coastal Research, Special Issue # 38*, p. 44-56.

Philander, S.G.H., 1983. El Niño Southern Oscillation Phenomena. *Nature*, v. 302, p.295-301.

Pou-Alberu, S., y G. Pozos-Salazar, 1992. Cantidad de Sedimento Drenado Hacia la Costa del Pacífico en el Noroeste de Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, v. 18, n.3, p.125-141.

Quinn, W.H., V.T. Neal, and S.E. Antunez de Mayolo, 1987. El Niño Occurrences Over the Past Four and a Half Centuries. *Journal of Geophysical Research*, v.92, n.C13, pp. 14449-14461.

Ramos-Rodriguez, S., F.J. Ocampo-Torres, C. Nava-Button y R. Lizárraga-Arciniega, 2001. Condiciones Oceanográficas y Meteorológicas Extremas Durante El Niño 1997-1998, en Rosarito, B.C. *Memorias III Congreso Internacional de la AMIP: Puertos y Costas, Retos del Siglo XXI*; Veracruz, Ver.

- Rivera-Lemus, E.R., 2004. Análisis de la Variabilidad de Perfiles de Playa en Playas de Rosrito, Baja California. Comparación entre Playas con Muro y Playas sin Muro. *Tesis de Licenciatura*, Facultad de Ciencias Marinas, UABC. Ensenada, B.C. 49p.
- Reyes-Coca, S. y R. Troncoso-Gaytan, 2004. Modulación Multidecenal de la Lluvia Invernal en el Noroeste de Baja California. *Ciencias Marinas*, v.30, n. 1A, p.99-108
- Sallenger, A.H.Jr., W.B. Krabill, R.N. Swift, J. Brock, J. List, M. Hansen, R.A. Holman, S. Manizade, J. Sontag, A. Meredith, K. Morgan, J.K. Yunkel, E.B. Fredrick, and H. Stockdon, 2003. Evaluation of Airborne Topographic Lidar for Quantifying Beach Changes. *Journal of Coastal Research*, v. 19, n.1, p. 125-133
- Secretaría de Turismo, Mexico, 2002a. <http://datatur.sectur.gob.mx/pubbyrep/cua/2002>.
- Secretaría de Turismo, Mexico, 2002b. <http://sectur.gob.mx>
- Seymour, R.J., R.R. Strange III, D.R. Cayan, and R.A. Nathan. 1984. Influence of El Niños on California's Wave Climate. *Proc. 19th Coastal Engineering Conference*. Edge, Billy L. (ed). P. 577- 592.
- Seymour, R.J., M.H. Sessions, and D. Castel, 1985. Automated Remote Recording Analysis of Coastal Data. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 111, n.2, p. 338-400
- Seymour, R.J., 1996. Wave Climate Variability in Southern California. *Jour. Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v.122, n.4, pp.182-186

- Seymour, R.J. 1998. Effects of El Niños on the West Coast Wave Climate. *Shore and Beach*, v.66, n.3, p. 3-6.
- Sheppard, F.P., 1950a. Beach Cycles in Southern California. *Technical Memorandum*. # 20, Beach Erosion Board, US Army Corps of Engineers, 26 pp.
- Sheppard, F.P., 1950b. Longshore-Bars and Longshore-Troughs. *Technical Memorandum No. 15 Beach Erosion Board*, U.S. Army Corps of Engineers. 31 pp.
- Short, A.D., A.C. Trembanis, and I.L. Turner. 2000. Beach Oscillation, Rotation and the Southern Oscillation, Narrabeen Beach, Australia. *Proc. International Conference on Coastal Engineering*, Sydney 2000. ASCE. p. 2-15.
- Smith, G.L., and G.A. Zarillo. 1990. Calculating Long-Term Shoreline Recession Rates Using Aerial Photographic and Beach Profiling Techniques. *Journal of Coastal Research*, v.6, n.1, p.111-120.
- State of the Coast Report, 1996. <http://www.pepps.fsu.edu/FSOC/>).
- Storlazzi, C.D., and G.B. Griggs, 2000. Influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) Events on the Evolution of Central California's Shoreline. *Geological Society of America Bulletin*, v.112, n. 2, p.236-249.
- Thompson, W.C. 1987. Seasonal Orientation of California Beaches. *Shore and Beach*, v.55, n.3-4, p67-70.
- USACERC (U.S. Army Coastal Engineer Research Center), 1984. Shore Protection Manual, 3 vol.

- USACE (U.S. Army Corps of Engineers), 1991. Coast of California Storm and Tidal Waves Study. *State of the Coast Report*, Volume 1,
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 1992. Engineering and Design: Coastal Littoral Transport, Engineer Manual No. 1110-2-2502, Washington, D.C.
- USACE (U.S. Army Corp of Engineers), 2002. Coastal Engineering Manual, EC 1110-2-292.
- Winant, C.D., D.L. Inman, and C.E. Nordstrom. 1975. Description of Seasonal Beach Changes Using Empirical Eigenfunctions. *Journal of Geophysical Research*, v. 80, p. 1979-1986.
- Wolter, K., 2004. <http://www.cdc.noaa.gov/pepole/klaus.wolter/>
- Wozencraft, J., 2002. Coastal Mapping with Airborne LIDAR: Past, Present and Future. *Shoreline Change Conference Proceeding, NOAA Coastal Services Center*. <http://www.csc.noaa.gov/shoreconf/>
- Wozencraft, J.M., and W.J. Lillycrop, 2003. SHOALS Airborne Coastal Mapping: Past, Present, and Future. *Journal of Coastal Research, Special Issue # 38*, Shoreline Mapping and Change Analysis: Technical Considerations and Management Implication, p. 207-215.
- Wright, L.D., and A.D. Short. 1983. Morphodynamics of Beaches and Surf Zones in Australia, *In: Handbook of Coastal Processes and Erosion*, P.D. Komar (Editor), CRC Press, Boca Raton, pp. 35-64.
- Wright, L.D., A.D. Short, and M.O. Green, 1985. Short-Term Changes in the Morphodynamic States of Beaches and Surf Zones: An Empirical Predictive Model. *Marine Geology*, v.62, p. 339-364.

Wright,R. and A. Winckell, 1997. Technical and Human Issues in GIS Data Integration: The Tijuana River Watershed Project. *In: California and the World Ocean' 97. Conference Proceedings. Eds. Orville T. Magoon, Hugh Converse, Brian Baird, and Melissa Miller-Henson*, p. 369.

Zetler,B.D., and R.E. Flick, 1985. Predicted Extreme High Tides for California: 1983-2000. *Jour. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v.111, n.4, pp.758-765.